



Instabilités de combustion basse-fréquence dans une enceinte mécaniquement ventilée

Maxime Mense^a, Yannick Pizzo^b, Hugues Prétrel^a, Bernard Porterie^b

^a Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN), PSN-RES, SA2I, Laboratoire commun ETiC, Cadarache, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance, France

^b Aix-Marseille Université (AMU), CNRS, IUSTI UMR 7343, Laboratoire commun ETiC, 13453 Marseille, France

maxime.mense@irsn.fr, yannick.pizzo@univ-amu.fr, hugues.pretrel@irsn.fr, bernard.porterie@univ-amu.fr.

Résumé : La présente étude exploratoire a pour objectif de comprendre les phénomènes physiques à l'origine d'instabilités basse-fréquence (BF) de combustion dans une enceinte confinée et ventilée mécaniquement, comme celles observées lors de feux d'hydrocarbures dans une des enceintes (120m³) du dispositif à grande échelle DIVA de l'IRSN. Cette étude a été motivée par le fait que ces instabilités BF peuvent conduire à des fluctuations importantes de la pression dans l'enceinte et donc à une possible dégradation du niveau de confinement de l'enceinte. Pour répondre à l'objectif fixé, une maquette à échelle ¼ du dispositif DIVA a été réalisée. Utilisée pour des feux de nappe d'heptane, elle a permis de reproduire les oscillations BF de combustion. Les résultats obtenus pour une nappe d'heptane de 0,18m de diamètre montrent que ces oscillations apparaissent pour un taux de renouvellement de 10 à 18h⁻¹ et qu'elles affectent non seulement le débit de pyrolyse du combustible mais aussi l'ensemble des grandeurs physiques, avec une fréquence comprise entre 0,0167 à 0,025Hz. Ils suggèrent que ce comportement oscillatoire résulte d'un couplage entre le débit de pyrolyse, la pression, le débit d'admission d'air, l'approvisionnement en oxygène de la zone de réaction et les transferts thermiques de la flamme vers la surface du combustible. Les observations révèlent que ce phénomène oscillatoire s'accompagne d'un déplacement périodique de la flamme hors du bac, vers des régions plus riches en oxygène. L'augmentation du taux de renouvellement d'air (Tr) entraîne une augmentation de la fréquence des oscillations du débit de pyrolyse et fait apparaître deux régimes de feu : pour $Tr \leq 15h^{-1}$, le débit de pyrolyse est plus faible et ses fluctuations plus marquées. La flamme qui se détache du bac a alors plus de difficulté à revenir au-dessus du bac et l'extinction se produit rapidement (<500s). Pour des Tr plus élevés, l'apport d'oxygène au-dessus du bac augmente, ce qui a pour effet d'accroître le débit de pyrolyse, de limiter le déplacement de la flamme et donc l'amplitude des oscillations BF, et de conduire à une durée du feu plus longue (>2000s). Les travaux en cours portent sur la réalisation de nouveaux essais, afin d'accéder à la concentration locale d'oxygène au voisinage du foyer, et sur la simulation numérique de l'écoulement résultant de l'interaction feu/ventilation.

Mots clés : incendie, expérimentation, instabilités de combustion, ventilation mécanique, oscillations, basse-fréquence

1. Introduction

Lorsqu'un feu se déclare dans une enceinte confinée et mécaniquement ventilée, son développement peut conduire, selon la puissance du foyer et les conditions de ventilation, à une combustion sous-oxygénée, voire à l'extinction du foyer par manque d'oxygène. Dans certains cas, des instabilités basse-fréquence peuvent même apparaître sur les grandeurs caractéristiques de l'incendie, comme le débit de pyrolyse et donc la puissance du foyer. Ce phénomène oscillatoire a notamment été mis en évidence lors d'expérimentations de feux d'hydrocarbure dans une des enceintes (120m³) du dispositif à grande échelle DIVA de l'IRSN, les fréquences obtenues étant comprises entre 0,005 et 0,007Hz, soit une période d'oscillations comprise entre 140 et 200s. Dans le contexte nucléaire ou naval militaire, ces instabilités conduisent à des fluctuations importantes de pression, ce qui peut avoir un impact direct sur la sécurité des installations en entraînant notamment une dégradation du confinement dynamique et une perte d'intégrité des équipements de sectorisation.

Dans la littérature, la plupart des travaux sur les instabilités de combustion ont été conduits dans des enceintes ventilées naturellement au travers d'ouvertures en parois ou au plafond. Ces travaux montrent un comportement instable du débit de pyrolyse lié au facteur de ventilation $AH^{1/2}$ [1]-[4]. Takeda et al. [1] ont étudié expérimentalement les instabilités de combustion lors de feux de combustibles liquides et solides dans une enceinte cubique de 0,44m de côté, ouverte vers l'extérieur, et ont obtenu des oscillations du taux de pyrolyse de l'ordre 1,33Hz en fréquence pour un diamètre de nappe combustible de 0,17m. La fréquence de ces oscillations reste néanmoins haute et très proche de celles observées en milieu ouvert ($f \sim 1,5/\sqrt{D}$ où D est le diamètre de la nappe [5], soit 3,5Hz). Kim et al. [4] ont mis en évidence des oscillations dont la fréquence varie entre 0,02 et 0,2Hz selon l'importance du facteur de ventilation. Dans leur étude sur la combustion sous-oxygénée d'une nappe de méthanol de 0,3m de diamètre dans une enceinte naturellement ventilée au travers de petites ouvertures, Sugawa et al. [6] ont corrélé les oscillations observées à un déplacement peu commun de la flamme, que les auteurs ont nommé *ghosting flame*. La flamme se détache du bac et se déplace dans le compartiment à la recherche d'oxygène. Ces flammes fantômes (voir aussi [2],[7]-[9]) sont caractérisées par une couleur bleue marquée, qui est due à la chimiluminescence de la réaction d'oxygène avec le monoxyde de carbone produit par la combustion réductrice. Peu d'études sur les oscillations de combustion en milieu confiné et mécaniquement ventilé ont été menées. On peut citer dans ce domaine les travaux de Audouin et al. [10] et de Prêtre et al. [11] dans le dispositif DIVA. Ces derniers ont obtenu un comportement oscillatoire BF, avec une fréquence comprise entre 0.005 et 0.007Hz, pour des feux d'heptane d'environ 0,5MW et un taux de renouvellement de 12 à 17h⁻¹.

Dans la poursuite de ces travaux, le présent travail a consisté à réaliser une maquette à échelle ¼ du dispositif DIVA, appelée NYX, afin de reproduire les oscillations BF et de mieux comprendre les phénomènes physiques responsables de leur formation. Nous distinguerons par la suite deux régimes d'instabilités selon leur fréquence d'oscillations : les fréquences intermédiaires, entre 0,04 et 1 Hz, générant de faibles fluctuations de pression, et les basses fréquences, inférieures à 0,04Hz, pour lesquelles les fluctuations de pression sont importantes. L'acquisition à une fréquence de 1Hz constitue un filtre passe-bas qui atténue, voire supprime, les oscillations hautes fréquences associées au détachement des structures turbulentes sous forme de bouffées de gaz (*puffing* en anglais) (>1Hz). Cet article est organisé comme suit : on présente tout d'abord la maquette NYX et sa métrologie. Les résultats obtenus pour un feu de nappe d'heptane (C₇H₁₆) de 18cm de diamètre et un taux de renouvellement de 15h⁻¹ sont analysés et une première explication du processus physique responsable de ces oscillations BF est proposée. On étudie enfin l'influence du taux de renouvellement, entre 8 et 20h⁻¹, sur le régime de combustion et sur les caractéristiques des oscillations BF lorsqu'elles apparaissent.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental NYX, donné sur la Figure 1, est une représentation à échelle ¼ d'un local mécaniquement ventilé de DIVA [5]. Le rapport d'échelle est basé sur la similitude de Froude appliquée à l'écoulement d'air à l'admission. La maquette est un parallélépipède rectangle d'un volume de 1.875m³ (1.5m×1.25m×1m) dont les parois sont interchangeable, ce qui permet de modifier leurs propriétés thermiques et donc l'interaction avec le foyer.

Dans notre cas, les parois E, S, N, B et F (Figure 1) sont multicouches, composées d'une plaque d'acier de 2mm d'épaisseur et d'une plaque de silicate de calcium de 45mm d'épaisseur. La paroi W est en verre afin de visualiser et d'enregistrer le déplacement de la flamme dans l'enceinte. L'admission d'air est naturelle alors que l'extraction est mécanique, via des gaines cylindriques de 4cm de diamètre. Une vanne placée à 2m du plafond dans la gaine d'extraction permet de réguler le débit d'air. Les bouches d'admission et d'extraction sont rectangulaires (0,06m×0,12m) et positionnées en plafond, à la verticale et respectivement à 0,08m des parois W et E. Le combustible, ici l'heptane, est disposé dans un bac cylindrique en inox de 0,18m de diamètre, lui-même posé sur un support métallique, le tout étant placé au centre du plancher. L'inflammation de la nappe d'heptane est réalisée à l'aide d'un brûleur à propane monté sur un bras automatisé permettant son contrôle à distance. Afin de pouvoir définir la puissance du foyer, la perte de masse est mesurée au cours du temps en utilisant une balance électronique SARTORIUS®, précise au centième de gramme. Afin de protéger la balance des sollicitations thermiques induites par le feu, celle-ci est placée sous le plancher de l'enceinte. Des mâts équipés de 5 thermocouples de type K et d'un diamètre de 0.5mm sont positionnés dans les quatre coins de la maquette (Figure 1) permettent de mesurer la température locale du gaz. Les fractions molaires d'oxygène sont mesurées simultanément grâce à des analyseurs de gaz placés à l'intérieur de la maquette (un dans le coin BW, un autre dans le coin FE, à 0,42m du plancher) et dans la gaine d'extraction (Figure 1). Deux sondes McCaffrey bidirectionnelles [12], préalablement calibrées, sont positionnées dans les conduites de ventilation et reliées à des transmetteurs de pression afin de mesurer la différence de pression dans la sonde et ainsi déterminer les débits d'admission et d'extraction. Pour corriger la masse volumique de l'air qui dépend de la température, un thermocouple est positionné dans chaque conduite de ventilation. Deux transmetteurs de pression ROSEMOUNT™, positionnés au niveau du plancher dans les coins BW et FE, mesurent une pression différentielle entre l'intérieur et l'extérieur de

la maquette. Enfin, pour visualiser le déplacement de la flamme, une camera CCD est placée à l'extérieur du dispositif et face à la paroi W.

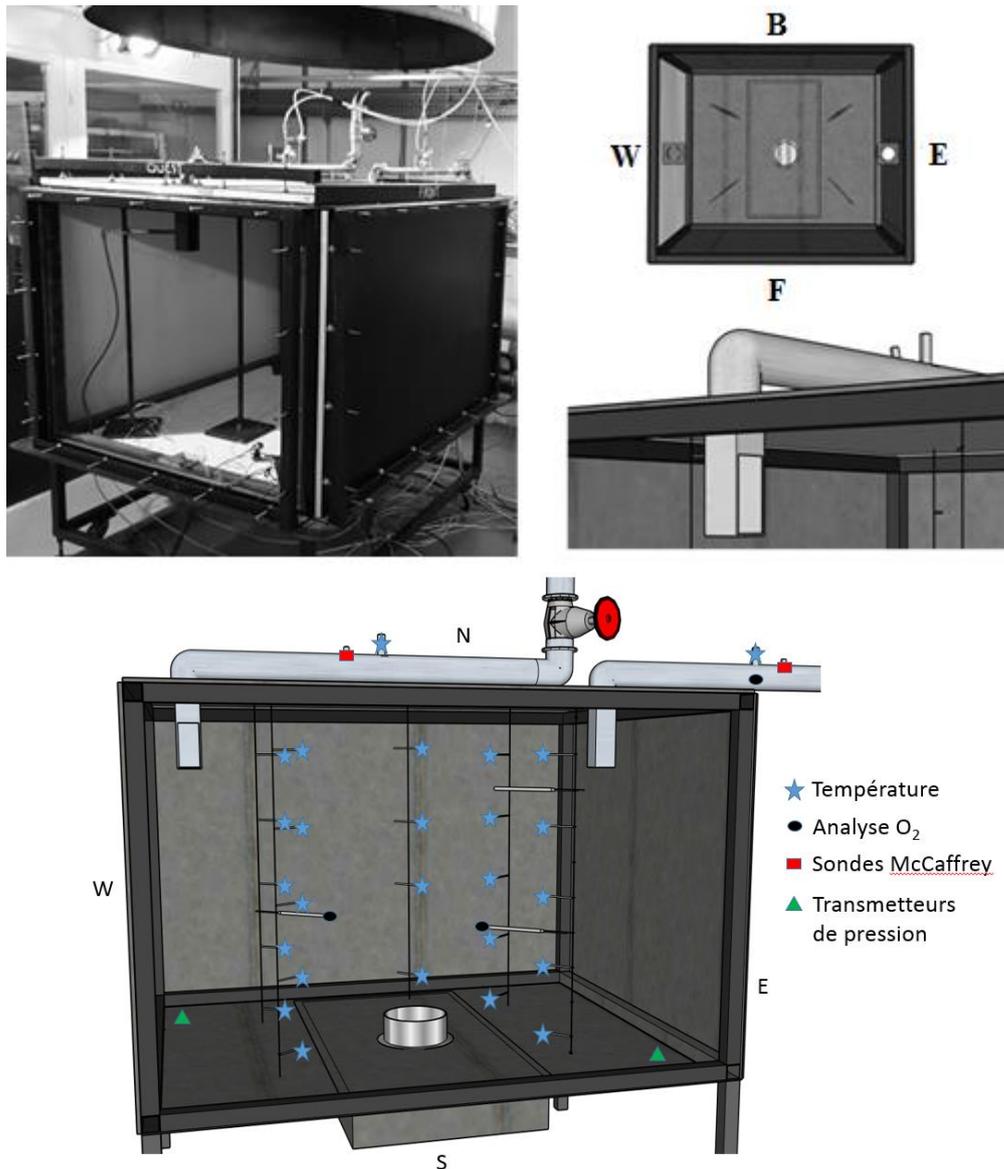


Figure 1 : Maquette NYX et schémas montrant le système de ventilation et la position de l'instrumentation.

La campagne expérimentale porte sur 7 essais pour lesquels nous avons fait varier le taux de renouvellement d'air (Tr) de 8 à $20h^{-1}$. Ce paramètre, Tr , est déterminé comme le rapport entre le débit volumique d'air d'admission à froid et le volume du local. Il correspond au nombre de fois où l'air est renouvelé dans le local pendant une période d'une heure.

3. Description des oscillations BF pour un Tr de $15h^{-1}$

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à la combustion d'une nappe d'heptane de 0,18m de diamètre avec un taux de renouvellement de $15h^{-1}$. La masse initiale d'heptane est de 750g.

3.1. Débit de pyrolyse

La Figure 2 représente l'évolution temporelle du taux de perte de masse du combustible, communément appelé débit de pyrolyse ou MLR (*Mass Loss Rate* en anglais). Le MLR est obtenu en dérivant la perte de masse par rapport au temps. Des oscillations de fréquence intermédiaire, de l'ordre de 0,05Hz, apparaissent dès l'inflammation, mais après 250 s de feu, la période et l'amplitude de ces oscillations augmentent significativement.

Sur l'exemple de la Figure 2 pour lequel $Tr = 15h^{-1}$, on distingue clairement, entre 250 et 500s, cinq cycles d'oscillations BF d'une période d'environ 50s chacun, soit une fréquence d'environ 0,02Hz. L'analyse des vidéos montre le lien direct entre les fluctuations du débit de pyrolyse et le déplacement de la flamme. Dans ce mode instable de combustion, l'extinction, qui se produit après 496s de feu, suit la phase oscillatoire, comme cela a été observé par Kim et al. [13].

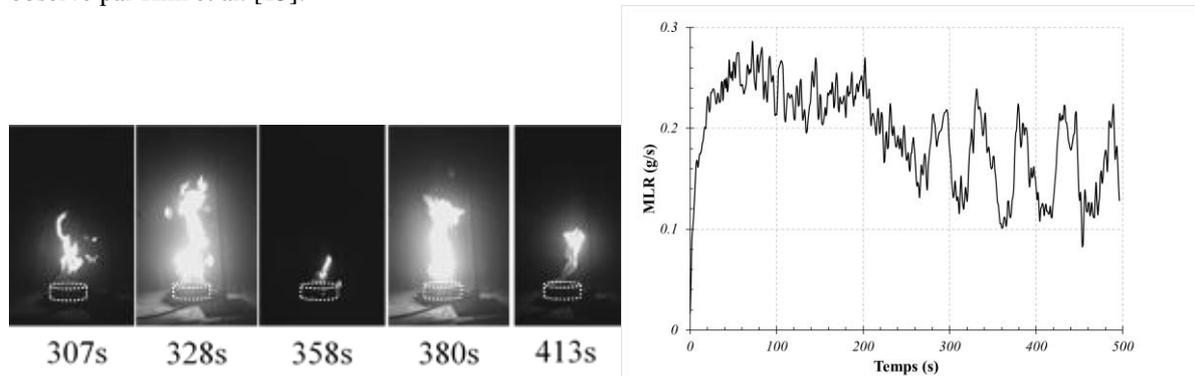


Figure 2 : Photographies du feu à $t=307, 328, 358, 380$ et $413s$ et évolution temporelle du MLR. Le Tr est de $15h^{-1}$.

Considérons par exemple la phase oscillatoire observée entre 328s et 380s. A 328 s, lorsque la flamme est au-dessus du bac, les transferts de chaleur de la flamme vers la surface du combustible sont importants et font que le MLR est maximal. La flamme diminue ensuite de hauteur, se déplace et sort du bac (*ghosting flame*). Durant ce laps de temps, le débit de pyrolyse diminue et passe par un minimum. Lorsque la flamme revient au-dessus du bac, le débit croît à nouveau et redevient maximal. La période du cycle BF correspond au laps de temps qui s'écoule entre deux maximums du débit de pyrolyse ou deux maximums de la hauteur de flamme, ici en moyenne 52 s. A noter que lorsque la flamme se trouve au-dessus du bac, l'examen des vidéos révèle des modifications de la structure de flamme dans la zone de réaction. Le feu transite alternativement d'un régime laminaire à un régime turbulent. De petites structures turbulentes apparaissent puis disparaissent alternativement. Ce régime transitionnel a déjà été observé pour des feux de nappe d'un diamètre compris entre 0,03 et 1m [14], la dépendance en diamètre pouvant s'expliquer par l'importance relative des mécanismes de transferts de chaleur de la flamme vers la surface du combustible.

3.2. Autres grandeurs physiques

Outre le débit de pyrolyse, ce comportement oscillatoire est aussi observable sur d'autres grandeurs physiques telles que la pression différentielle (définie comme la différence entre la pression moyenne dans l'enceinte et la pression extérieure), la fraction molaire d'oxygène et la température du gaz dans l'enceinte, et les débits de ventilation, dont les évolutions temporelles sont données sur la Figure 3. Le calcul de la fréquence des oscillations BF par transformée de Fourier de ces courbes d'évolution conduit à des valeurs sensiblement identiques, de l'ordre de 0,02Hz.

Sur la Figure 3, on observe clairement que les fluctuations de certaines grandeurs sont en phase avec celles du MLR, comme celles de la pression différentielle, du débit d'extraction, de la température du gaz, tandis que d'autres sont en opposition de phase, comme celle du débit d'admission. Les évolutions de la fraction molaire d'oxygène dans l'enceinte et à l'extraction traduisent un comportement plus complexe.

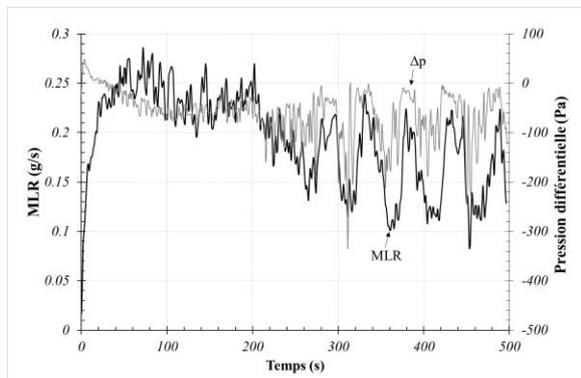
La Figure 3a montre des fluctuations de pression de l'ordre de 300Pa dans la phase d'oscillations BF, alors qu'elles ne dépassent pas 100Pa sur les 200 premières secondes durant lesquelles des oscillations de fréquence intermédiaire apparaissent. Les évolutions des températures de gaz dans la maquette suivent celle du débit de pyrolyse (Figure 3b et Figure 3c). Le long de l'axe central (Figure 3b), la température à 0,15m de hauteur est plus élevée et oscille avec une plus grande amplitude que celle mesurée à 0,85m de hauteur. Au plus près de la zone de réaction, la température du gaz est très sensible aux mouvements de la flamme. Lorsque la flamme se trouve au-dessus du bac, il mesure une température élevée, en moyenne autour de $450^{\circ}C$ avec des pics à plus de $750^{\circ}C$, alors que lorsque la flamme n'occupe pas la totalité de la surface de la nappe ou se déplace hors du bac, la température peut descendre en-dessous de $200^{\circ}C$. Au contraire, le long de l'arbre de thermocouples situé dans le coin FE (Figure 3c), la température et l'amplitude de ses oscillations augmentent avec la hauteur. Cela témoigne d'une part, d'une stratification des fumées et, d'autre part, de l'influence du panache turbulent impactant le plafond.

La Figure 3d représente l'évolution temporelle des fractions molaires d'oxygène mesurées dans l'enceinte et dans la gaine d'extraction. Ces fractions molaires diminuent pendant les 250 premières secondes et oscillent ensuite autour d'une valeur moyenne comprise entre 14,6% et 16,5%. Ceci tend à montrer que le feu se développe

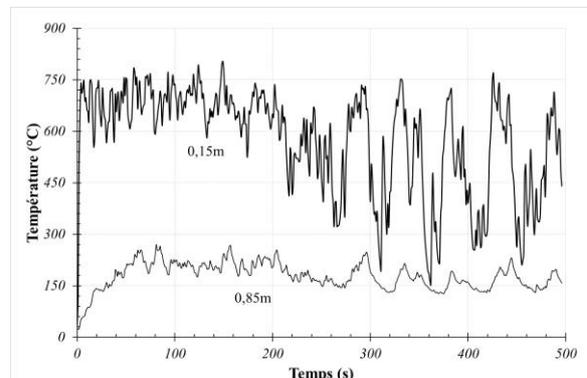
dans un milieu particulièrement vicié et que la combustion est contrôlée par l'apport d'oxygène, en limite d'extinction [15].

Les diagrammes (e) à (f) de la Figure 3 donnent les évolutions de certaines grandeurs durant la phase oscillatoire, entre 300 et 450s. Comme le montre la Figure 3e, le débit d'admission et le MLR ont des évolutions en opposition de phase, ce qui peut paraître contradictoire dans la mesure où une plus grande admission conduit à une meilleure oxygénation du foyer et donc à une meilleure combustion. En fait, dans ce régime contrôlé par la ventilation, l'air admis met un certain temps pour être transporté dans la zone de réaction. C'est ce couplage entre l'admission d'air et la combustion qui génère les oscillations BF et le déplacement périodique de la flamme hors du bac. Pretrel et al. [11] suggèrent même que le comportement chaotique de la flamme peut être à l'origine d'un mécanisme de « pompage » qui permet à l'air admis d'atteindre la zone de réaction. On observe également que les fluctuations du débit d'admission sont plus importantes que celles du débit d'extraction. Cela s'explique par l'importance relative des résistances aérauliques des branches de ventilation. En effet, en admission naturelle, la résistance aéraulique est très faible car l'entrée d'air se fait librement, tandis qu'à l'extraction, la régulation du débit par la vanne placée dans la conduite rend la sortie d'air plus résistive et entraîne donc moins de fluctuations du débit d'extraction.

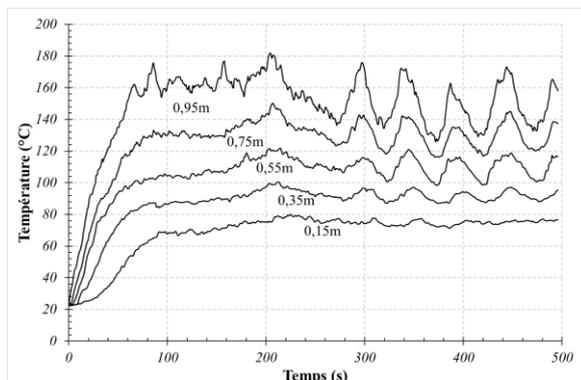
Les fractions molaires d'oxygène en partie basse (Figure 3f) sont légèrement plus élevées qu'en partie haute (Figure 3g), comme cela a été observé dans DIVA [11], avec des oscillations BF moins marquées, la teneur en oxygène dans cette zone étant moins sensible aux fluctuations de combustion. Les évolutions de la concentration en O_2 en partie haute et du MLR sont en opposition de phase (Figure 3g). A l'extraction, on observe un comportement analogue mais avec un léger décalage dû au transport des fumées dans la gaine.



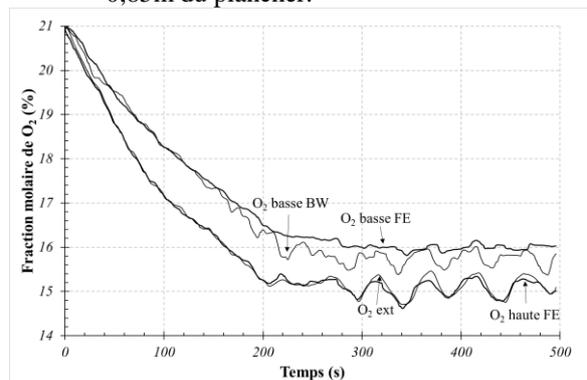
(a) MLR et pression différentielle du gaz.



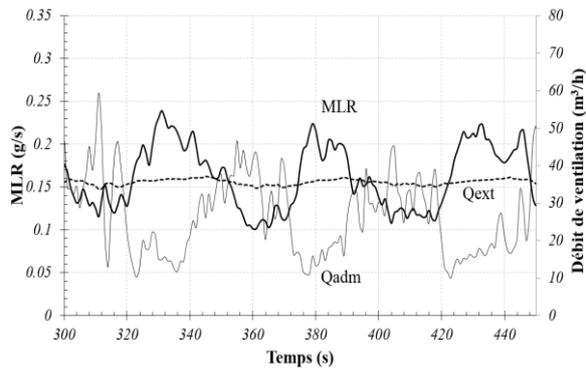
(b) Températures du gaz dans l'axe de flamme à 0,15 et 0,85m du plancher.



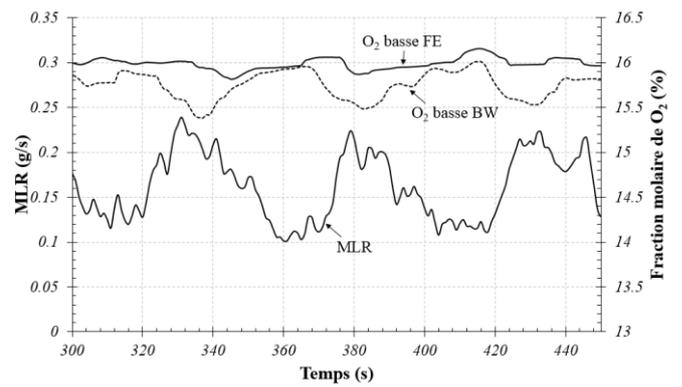
(c) Températures du gaz à différentes hauteurs dans le coin FE.



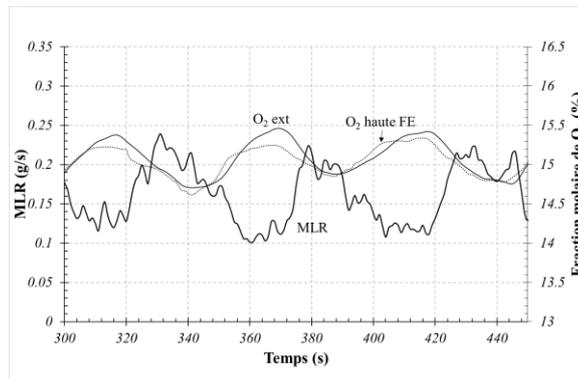
(d) Fractions molaires d'oxygène dans l'enceinte et à l'extraction.



(e) MLR et débits d'admission et d'extraction dans la phase d'oscillations BF, entre 300 et 450s.



(f) MLR et fractions molaires d'oxygène en partie basse de l'enceinte dans la phase d'oscillations BF, entre 300 et 450s.



(g) MLR et fractions molaires d'oxygène en partie haute de l'enceinte dans la phase d'oscillations BF, entre 300 et 450s.

Figure 3: Evolutions temporelles de grandeurs caractéristiques. Le Tr est de 15h⁻¹.

3.3. Interprétation du phénomène oscillatoire

Les observations montrent clairement que ce comportement oscillatoire peut être relié au déplacement périodique de la flamme hors du bac. En s'appuyant sur les résultats obtenus et sur le schéma donné sur la Figure 4, nous proposons ci-dessous une explication du mécanisme qui génère et entretient le comportement oscillatoire BF.

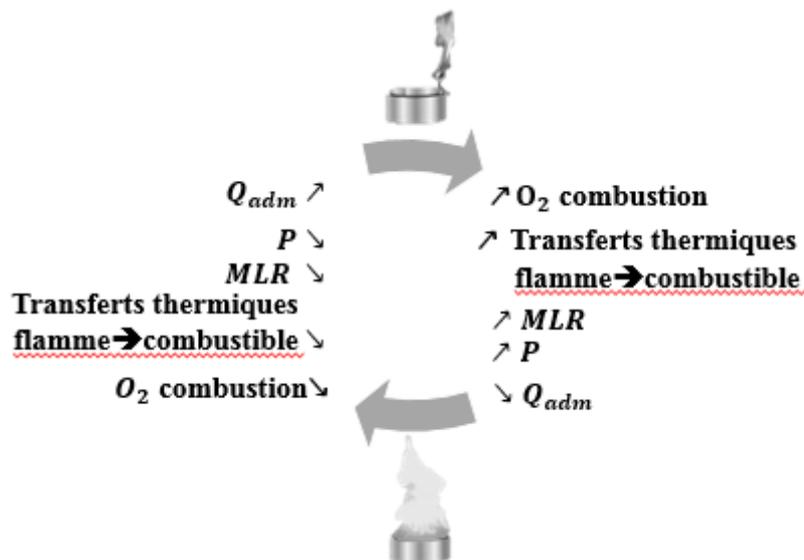


Figure 4: Illustration des mécanismes conduisant aux oscillations BF.

Lorsque la flamme est au-dessus du bac, et que la quantité d'oxygène disponible pour la combustion diminue, la flamme devient moins puissante et les transferts de chaleur vers la surface du combustible moindres, ce qui entraîne une diminution du débit de pyrolyse, et par conséquent de la puissance du foyer [15]. Il s'ensuit une diminution de la pression dans le local. La flamme n'occupe plus la totalité de la surface de la nappe et se déplace hors du bac dans la direction FE, à la recherche d'oxygène. La pression diminuant, la quantité d'air à l'admission augmente alors que le débit d'extraction diminue. Après un certain laps de temps, l'air admis arrive au-dessus du bac, ce qui permet à la flamme d'y revenir. Les transferts de chaleur de la flamme vers la surface du combustible ré-augmentent et, par conséquent, le débit de pyrolyse. La pression dans la maquette augmente et entraîne une diminution du débit d'admission. Ce cycle d'oscillations peut se répéter plusieurs fois selon le taux de renouvellement d'air. Compte tenu des mesures réalisées, il est à ce stade difficile de corrélérer le déplacement de la flamme et la concentration locale d'oxygène. De nouveaux essais incluant la mesure de la fraction molaire d'oxygène au voisinage du foyer sont en cours.

4. Influence du taux de renouvellement

Dans ce paragraphe, nous étudions l'influence du taux de renouvellement d'air (Tr) dans l'enceinte sur le débit de pyrolyse, la fraction molaire d'oxygène en partie basse de l'enceinte et la température du gaz en zone chaude, mais aussi sur les caractéristiques, en fréquence et amplitude, des oscillations sur ces grandeurs et la pression différentielle.

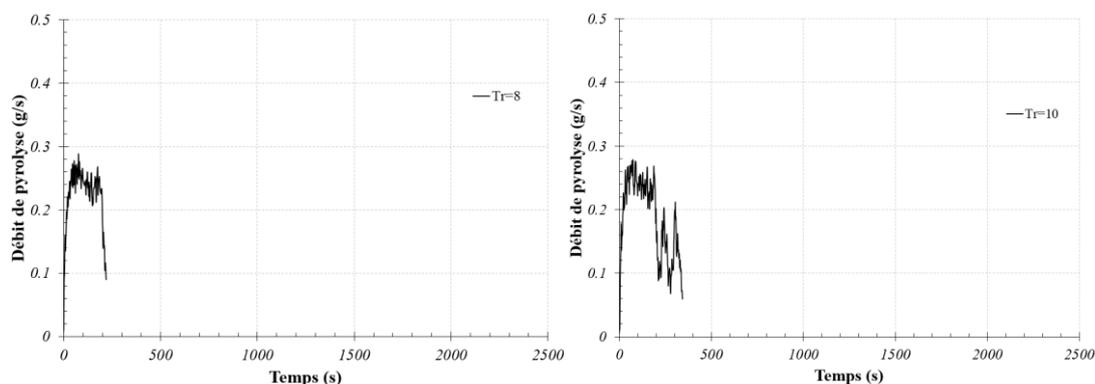
4.1. Débit de pyrolyse

Les évolutions temporelles du débit de pyrolyse (MLR) d'heptane pour des Tr compris entre 8 et $20h^{-1}$ sont données sur la Figure 5. On observe tout d'abord que sur les 200 premières secondes, les évolutions au cours du temps du MLR sont similaires, ce qui suggère que durant ce laps de temps la combustion est peu influencée par la ventilation. Pour un Tr de $8h^{-1}$, la Figure 5 montre que l'extinction du foyer se produit rapidement, après 220 s de feu et qu'aucun phénomène oscillatoire BF n'apparaît. Pour le taux de renouvellement le plus élevé, $Tr=20h^{-1}$, l'extinction du foyer a lieu sans que le phénomène oscillatoire BF n'ait été clairement observé, comme cela est confirmé par une analyse en transformée de Fourier du signal. Entre les deux, des oscillations BF apparaissent.

Sur la Figure 5, on observe clairement deux régimes de feu selon que le taux de renouvellement est inférieur ou égal à $15h^{-1}$ ou supérieur à cette valeur :

- Pour $Tr \leq 15h^{-1}$, si la durée du feu augmente avec le taux de renouvellement, l'extinction se produit rapidement, avant 500s. Des oscillations BF de grande amplitude apparaissent pour des Tr compris entre 10 et $15h^{-1}$.
- Pour $Tr > 15h^{-1}$, le débit moyen de pyrolyse augmente avec le taux de renouvellement, ce qui semble cohérent dans la mesure où l'oxygénation du foyer améliore la qualité de la combustion. La flamme est plus puissante et génère des flux thermiques à la surface du combustible plus importants, ce qui favorise sa pyrolyse.

L'apport d'oxygène au-dessus du bac augmente avec Tr , ce qui limite le déplacement de la flamme et donc l'amplitude des oscillations BF. La durée du feu diminue avec le taux de renouvellement mais dépasse les 2000s. Par exemple, pour $Tr=16,5h^{-1}$, elle a lieu à 2384s, alors que pour $Tr=18h^{-1}$, elle intervient à 2105s, et à 2040s pour $Tr=20h^{-1}$. L'analyse comparative de ces essais montre que l'extinction se produit pour ces trois taux de renouvellement lorsqu'il ne reste qu'environ $300 \pm 20g$ d'heptane dans le bac (soit une hauteur de liquide d'environ $1,7 \pm 0,1cm$). En d'autres termes, lorsque Tr augmente de $16,5$ à $20h^{-1}$, le débit de pyrolyse est plus important, mais la quantité de combustible consommée sur la durée du feu est pratiquement la même et l'extinction a lieu après une augmentation rapide du MLR dû à la contribution du fond du bac, chauffé par la flamme. Là encore, une meilleure compréhension de ce phénomène d'extinction nécessiterait de connaître les teneurs en oxygène au voisinage du foyer.



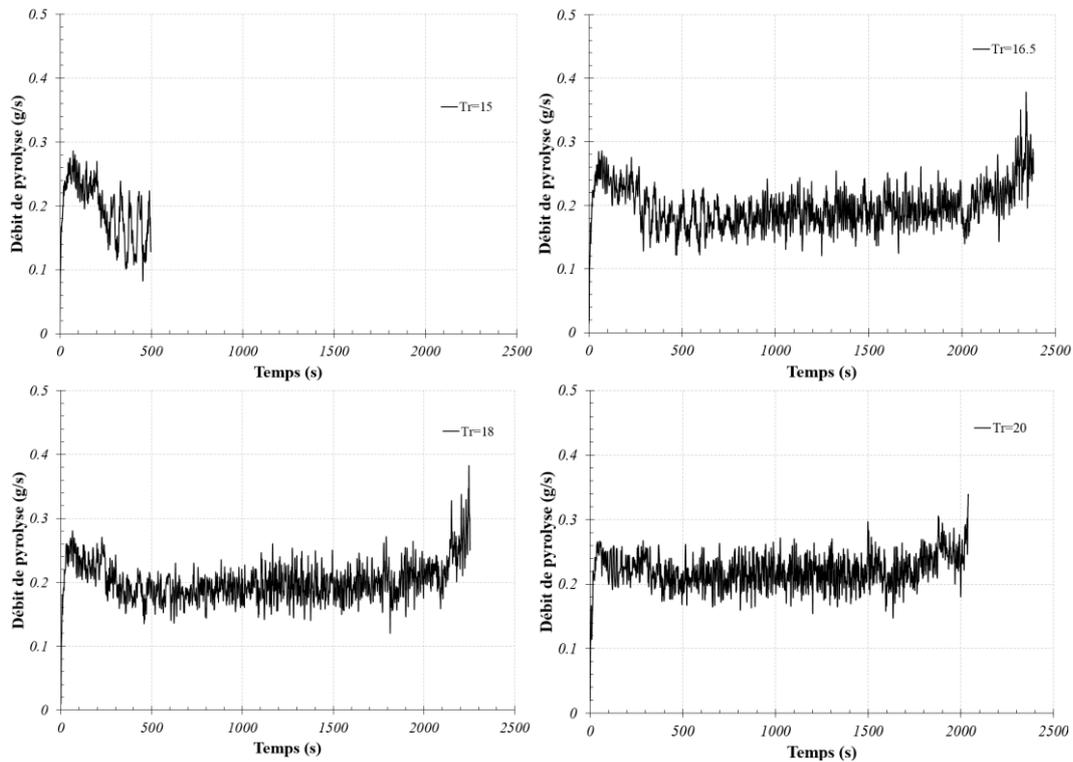
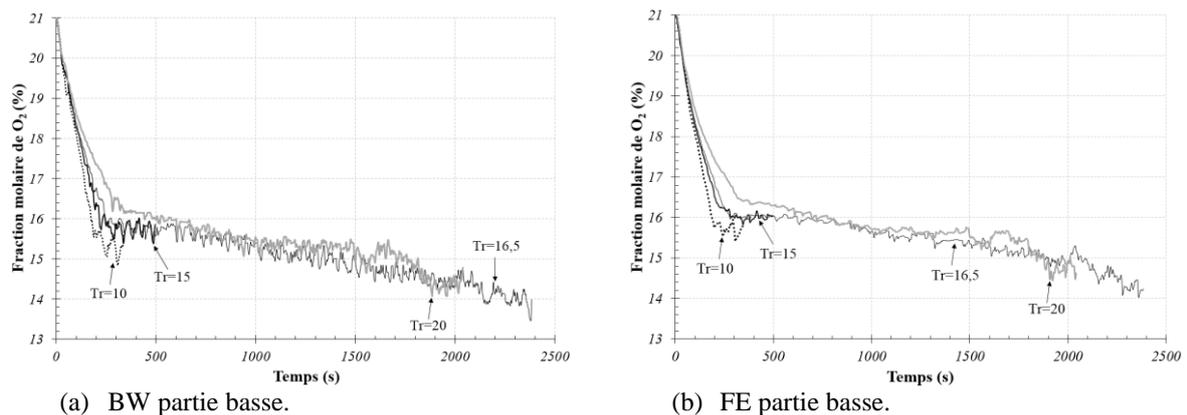


Figure 5: Evolutions temporelles du MLR pour différents taux de renouvellement.

4.2. Fraction molaire d'oxygène en partie basse de l'enceinte

L'examen de la Figure 6 révèle que l'extinction se produit pour des concentrations d'oxygène dans la partie basse de l'enceinte qui diffèrent selon le taux de renouvellement, autour de 15,5-16% pour un Tr inférieur ou égal à $15h^{-1}$ et autour de 14-14,5% au-delà. Ces dernières peuvent être rapprochées de la valeur d'environ 14% mesurée lors de l'extinction de nappes d'heptane (e.g. [15]). Cette différence de comportement peut s'expliquer par le fait que pour $Tr \leq 15h^{-1}$, le débit de pyrolyse est plus faible et ses fluctuations plus marquées (Figure 5). La flamme qui se détache du bac a alors plus de difficulté à revenir au-dessus du bac.



(a) BW partie basse.

(b) FE partie basse.

Figure 6: Evolution temporelle de la fraction molaire d'oxygène en partie basse de l'enceinte pour différents taux de renouvellement.

4.3. Température du gaz

La Figure 7 représente les évolutions au cours du temps de la température du gaz en zone chaude, dans le coin FE et à 0,95 m de hauteur, pour différents taux de renouvellement. Sur les 300 premières secondes, ces évolutions sont relativement proches, les débits de pyrolyse étant similaires (Figure 5). Le niveau légèrement plus faible obtenu pour un Tr de $20h^{-1}$, d'environ $50^{\circ}C$, est sans doute dû à l'admission d'air froid plus importante.

Après 300s de feu, pour les taux de renouvellement de 16,5 et 18h⁻¹, la température des gaz augmente avec le taux de renouvellement. L'effet de refroidissement dû à l'air d'admission est compensé, voire surcompensé, par une puissance de feu plus élevée résultant d'un débit de pyrolyse légèrement plus important.

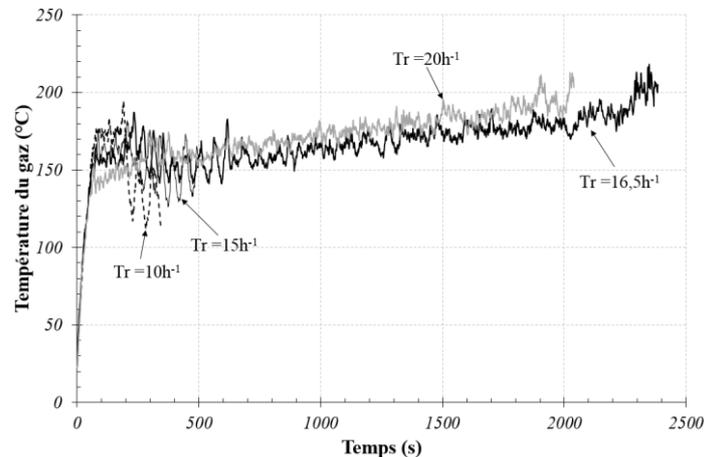


Figure 7 : Evolution temporelle de la température du gaz dans le coin FE à 0,95m de hauteur pour différents taux de renouvellement.

4.4. Fréquence des oscillations

Sur la Figure 8, les fréquences des oscillations BF obtenues sur le MLR, la pression, la fraction molaire d'oxygène en partie basse de l'enceinte et la température du gaz en zone chaude (à 0,95 m de hauteur) sont tracées en fonction du taux de renouvellement, entre 10 et 18h⁻¹. Comme cela a été mentionné précédemment, pour un Tr donné, les fréquences sont très proches. On constate également sur la Figure 8 que la fréquence augmente avec le taux de renouvellement, de 0.0167 à 0.025Hz (i.e. périodes de 40 à 60s). Cette tendance est similaire à celle observée à plus grande échelle [11].

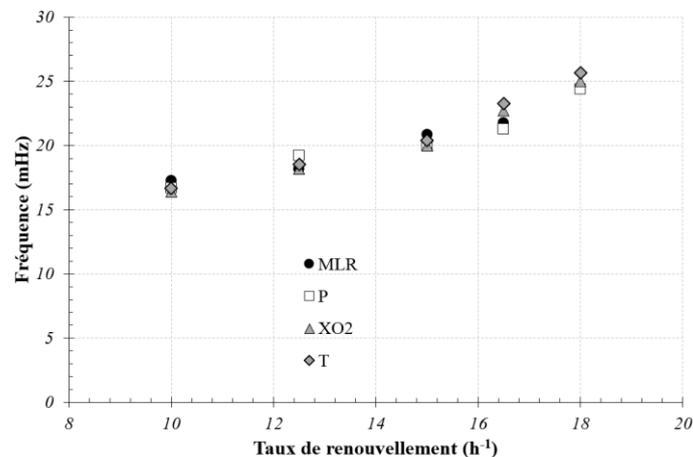


Figure 8: Fréquences des oscillations BF observées sur les évolutions temporelles du MLR, de la pression la fraction molaire d'oxygène en partie basse de l'enceinte et la température du gaz en zone chaude en fonction du taux de renouvellement.

5. Conclusion

Une maquette à échelle ¼ du dispositif DIVA de l'IRSN, dans lequel des oscillations BF ont été observées lors de feux d'hydrocarbure, a été réalisée. La campagne d'essais réalisés sur un feu de nappe d'heptane de 0,18m de diamètre pour différents taux de renouvellement d'air a permis de reproduire ces oscillations BF.

Compte tenu des résultats obtenus, un certain nombre de conclusions ont pu être dégagées :

- Pour un taux de renouvellement d'air entre 10 et 18h⁻¹, des oscillations BF apparaissent sur le MLR, la pression, la température du gaz, la fraction molaire d'oxygène et les débits de ventilation. Ces oscillations

sont reliées au déplacement périodique de la flamme hors du bac. Une explication du mécanisme qui conduit à ce comportement oscillatoire BF a été proposée.

- En faisant varier le taux de renouvellement de 10 à 18h⁻¹, la fréquence moyenne des oscillations BF augmente, de 0,0167 à 0,025Hz.
- Deux régimes de feu sont mis en évidence selon que le taux de renouvellement est inférieur ou supérieur à 15h⁻¹ : Pour Tr ≤ 15h⁻¹, des oscillations BF de grande amplitude apparaissent pour des Tr compris entre 10 et 15h⁻¹. La durée du feu augmente avec le taux de renouvellement, mais l'extinction se produit rapidement, avant 500s. Pour Tr > 15h⁻¹, l'apport d'oxygène au-dessus du bac augmente avec Tr, ce qui allonge la durée du feu (>2000s), limite le déplacement de la flamme et donc l'amplitude des oscillations BF. Pour ce second régime, l'augmentation du taux de renouvellement entraîne une augmentation du débit de pyrolyse, mais l'extinction se produit pour une même quantité restante de combustible, après une augmentation rapide du MLR due à la contribution thermique du fond du bac à la pyrolyse.

Les travaux en cours visent à conduire de nouveaux essais en apportant un soin particulier à l'analyse de gaz au voisinage du foyer afin de corréler le déplacement de la flamme et la teneur locale d'oxygène et de conclure plus précisément sur les régimes de combustion associés aux différents taux de renouvellement. En parallèle, une étude numérique est en cours afin de calculer l'écoulement induit par la ventilation et expliquer le mouvement préférentiel de la flamme dans l'enceinte.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la région Provence-Alpes-Côte d'Azur pour son soutien financier dans le cadre de cette thèse.

Références

- [1] H. Takeda, Oscillatory phenomenon and inverse temperature profile appearing in compartment fires, *Combustion and Flame*, Volume 61, Pages 103-105, 1985.
- [2] Q. He, C. Li, S. Lu, C. Wang, J. Zhang, Pool fires in a corner ceiling vented cabin: ghosting flame and corresponding fire parameters, *Fire Technology*, Volume 51, Pages 537-552, 2015.
- [3] Y. Utiskul, J.G. Quintiere, AS. Rangwala, BA. Ringwelski, K. Wakatsuki, T. Naruse, Compartment fire phenomena under limited ventilation, *Fire Safety Journal*, Volume 40, Pages 367-390, 2005.
- [4] KJ. Kim, H. Ohtani, Y. Uehara, Experimental study on oscillating behavior in a small-scale compartment fire, *Fire Safety Journal*, Volume 20, Pages 377-384, 1993.
- [5] E.E. Zukoski, B.M. Cetegen, T. Kubota, Visible structure of buoyant diffusion flames, *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, Pages 361-366, 1984.
- [6] O. Sugawa, K. Kawagoe, Y. Oka, I. Ogahara, Burning behavior in a poorly ventilated compartment fire-ghosting fire, *Fire Science and technology*, Volume 9, Pages 5-14, 1989.
- [7] K. Matsuyama, S. Okinaga, Y. Hattori, H. Suto, Experimental study on fire behavior in a compartment under mechanical ventilated conditions: the effects of air inlet position, *Fire Science and Technology*, Pages 111-119, 2015.
- [8] G. Bertin, J.M. Most, M. Coutin, Wall fire behavior in a under-ventilated room, *Fire Safety Journal*, Page 15, 2002.
- [9] K. Wakatsuki, Low ventilation small-scale compartment fire phenomena: ceiling vents, MS Thesis, Department of Fire Protection Engineering, University of Maryland, College Park, MD, 2001.
- [10] L. Audouin, L; Rigollet, H. Pretrel, W. Le Saux, M. Röwekamp, OECD PRISME project, fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments, *Fire Safety Journal*, Volume 62 (Part B), Pages 80-101, 2013.
- [11] H. Prétrel, S. Suard, L. Audouin, Experimental and numerical study of low frequency oscillatory behavior of large-scale hydrocarbon pool fire in a mechanically ventilated compartment, *Fire Safety Journal*,

Volume 83, Pages 38-53, 2016.

- [12] B.J. McCaffrey, G. Heskestad, A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application, *Combustion and Flame*, Volume 26, Pages 125-127, 1976.
- [13] K. Kim, H. Ohtani, Y. Uehara, Experimental study on oscillating behavior in a small-scale compartment fire, *Fire Safety Journal*, Volume 20, Pages 377-384, 1993.
- [14] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, Wiley, New York, 1985.
- [15] A. Loo, A. Coppalle, P. Aîné, Flame extinction in a ventilation-controlled compartment, *Procedia Engineering*, Volume 62, Pages 301-308, 2013.

25-27 Octobre 2017
Monastir – Tunisie