

Étude expérimentale du comportement des feux de nappe et du risque d'inflammation des gaz imbrûlés dans une chambre à échelle réduite du château de Chambord

Ziyuan CHEN^{1*}, Brady MANESCAU¹, Khaled CHETEHOUNA¹, Ilyas SELLAMI¹, Ludovic LAMOOT¹

¹INSA Centre-Val de Loire, Université en orléans, PRISME UR 4229

88, boulevard Lahitolle, 18000 Bourges, France

*(Auteur correspondant : ziyuan.chen@insa-cvl.fr)

Résumé - Le comportement des feux de nappe et le risque d'inflammation des gaz imbrûlés sont analysés dans un modèle réduit d'une chambre historique ventilée. Des essais ont été réalisés avec divers diamètres de nappe et taux de renouvellement d'air pour examiner le feu en milieu confiné. Les résultats montrent que le comportement du feu varie selon le régime de combustion. L'évaluation du risque, basée sur une approche globale, indique que le plus grand feu de nappe présente un risque d'inflammation élevé, tandis que le plus petit reste sous le seuil d'inflammation. Cette étude apporte des perspectives pour la sécurité incendie des bâtiments historiques.

Nomenclature

| | | | |
|-------|---------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| RR | taux de renouvellement de l'air | Xi | fraction molaire d'espèce, % |
| AIT | température d'auto-inflammation, °C | T | température, °C |
| CAO | conception assistée par ordinateur | \dot{m}_f | débit massique de combustible, g/s |
| MLR | taux de perte de masse, g/s | \dot{m}_{air} | débit massique d'air, g/s |
| LFL | limite inférieure d'inflammabilité, % | st | stœchiométrique |
| GER | rapport d'équivalence global | | |

1. Introduction

La préservation des bâtiments historiques à forte valeur culturelle reste gravement menacée par les incendies. Ces dernières décennies, plusieurs sinistres dévastateurs ont détruit des structures et des quartiers entiers à travers le monde. Parmi les incidents notables figurent l'incendie du Chiado à Lisbonne (1988), l'incendie du palais de Bretagne de Rennes (1994) l'incendie de la cathédrale de la Trinité à Saint-Pétersbourg (2006), l'incendie de Notre-Dame à Paris (2019) et celui de la Bourse XVIIème siècle de Copenhague (2024).

Dans ce contexte, les bâtiments historiques posent des défis uniques pour l'étude du comportement du feu en raison de leurs caractéristiques architecturales spécifiques, telles qu'une ventilation limitée, l'usage de matériaux de construction hautement inflammables comme le bois et des systèmes de ventilation interne distincts de ceux des structures modernes. Ces particularités engendrent des scénarios d'incendie complexes et souvent imprévisibles. Pourtant, bien que la recherche sur les incendies en milieux confinés ait considérablement progressé couvrant des domaines tels que les installations nucléaires, les scénarios multi-compartiments et les chambres en haute altitude [1–3], peu de publications ont été identifiées sur le comportement du feu sous l'effet de la ventilation dans les bâtiments patrimoniaux.

Cette étude analyse la dynamique du feu et les risques associés selon trois régimes de combustion. L'expérimentation repose sur un modèle réduit reproduisant une pièce typique du

château de Chambord. Une analyse paramétrique examine l'influence de la surface de feu et du débit de ventilation, tandis qu'une approche globale évalue le risque potentiel d'inflammation des gaz imbrûlés.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Étude de cas

Le château de Chambord, classé au patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1981, est un exemple emblématique de l'architecture de la Renaissance française dans la région Centre-Val de Loire. Récemment, Brunetaud et al. [4] ont mené une étude sur le château, se concentrant sur certaines zones pour évaluer la dégradation naturelle de l'intégrité mécanique des murs grâce à l'imagerie 3D et à la modélisation CAO. Cette étude fournit également des données géométriques pour la recherche actuelle, où la chambre de la Reine (12,0 m de longueur, 8,32 m de largeur et 6,4 m de hauteur) a été choisie comme cas d'étude afin d'examiner les caractéristiques du feu dans les pièces typiques des châteaux, comme illustré aux figures 1 et 2.



Figure 1 : Vue intérieure de la chambre de la Reine au château de Chambord

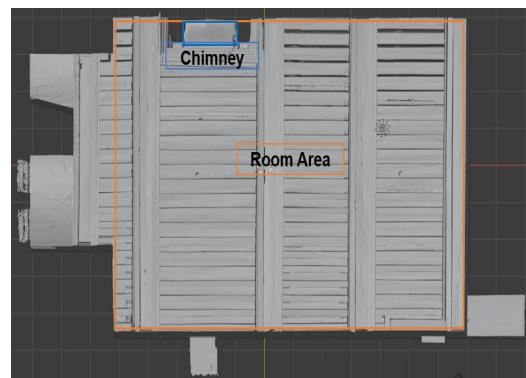


Figure 2 : Scan 3D de la chambre de la Reine au château de Chambord

2.2. Modèle réduit avec ventilation contrôlée

Au laboratoire GreenSprink de l'INSA Centre-Val de Loire, un compartiment modèle à l'échelle 1/8 a été conçu pour reproduire avec précision la géométrie et les dimensions de la chambre de la Reine. La construction de ce compartiment s'est appuyée sur les lois de mise à l'échelle de Froude, une technique largement utilisée et éprouvée pour les études à échelle réduite, proposée par Quintiere [5] et Hesketh [6]. Cette approche permet d'assurer une bonne corrélation entre les résultats des études à échelles réduite et réelle, garantissant ainsi la fiabilité des prévisions de l'étude.

La figure 3 détaille l'instrumentation du compartiment modèle. Une coupelle à combustible a été placée sur une balance au centre du compartiment afin de suivre l'évolution de la perte de masse au cours du temps. Trois arbres de thermocouples de type K sont disposés pour mesurer la température : TC1 au-dessus de la coupelle pour la flamme, TC2 et TC3 aux coins opposés pour les gaz près de l'entrée et de la sortie. Chaque arbre comprend 17 thermocouples pour capter la distribution verticale des températures. Des capteurs de flux thermique sont fixés aux parois arrière et latérale droite pour évaluer l'exposition thermique. Un analyseur de gaz est installé sous le plafond, près de la sortie. Enfin, les vitesses d'air avant l'allumage dans les conduits d'extraction et d'admission ont été mesurées avec un anémomètre à fil chaud.

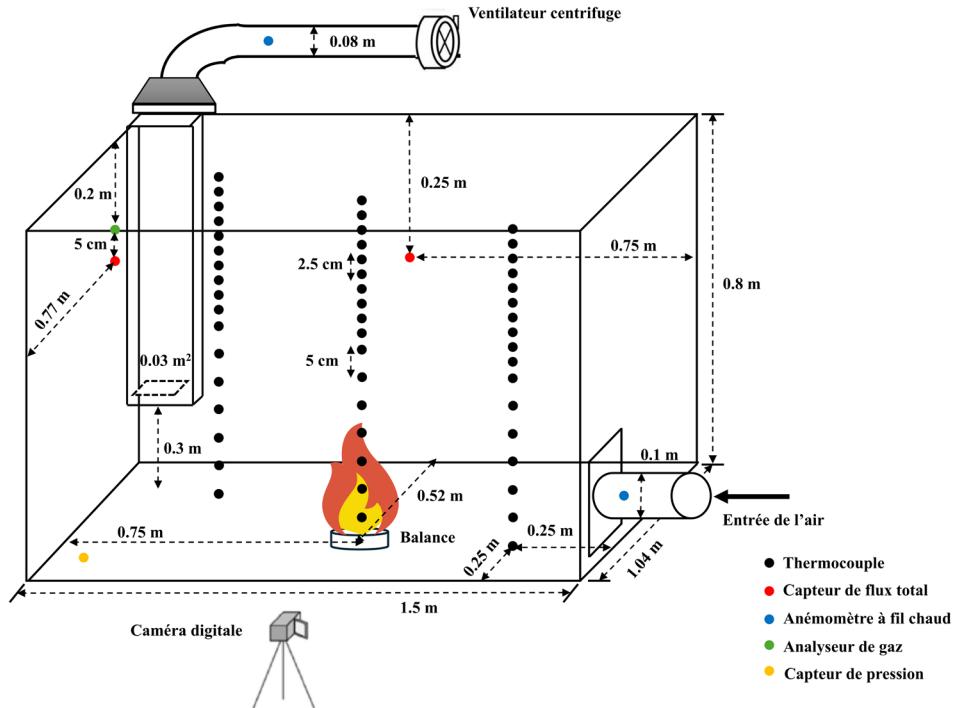


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental

2.3. Essais au feu

36 essais au feu ont été réalisés pour évaluer l'impact de la surface de feu et du taux de ventilation sur le comportement de feu dans le compartiment modèle. En variant le diamètre de la coupelle circulaire (13, 16, 20, et 24 cm), trois taux de renouvellement de l'air (RR) ont été appliqués : 10, 20 et 30, respectivement. Les essais à différents RR avec ventilation forcée simulent divers niveaux en ouverture des fenêtres et conditions environnementales externes, comme le vent. Le n-heptane a été choisi comme combustible pour cette étude, avec une masse initiale de 200 g pour les différents essais.

3. Résultats et discussion

Cette section présente les résultats expérimentaux obtenus. La sous-section 3.1 analyse les différents comportements du feu selon les régimes de combustion. La sous-section 3.2 évalue le risque potentiel d'inflammation des gaz imbrûlés accumulés sous le plafond pour deux configurations représentatives : 16 cm et 24 cm avec un taux de ventilation de 10 RR.

3.1. Comportement du feu selon les différents régimes de combustion

Dans le domaine du feu en milieu confiné, le concept de GER (rapport d'équivalence global) est utilisé pour caractériser le régime d'un feu de compartiment. Le GER est défini de la manière suivante : $\Phi = (\dot{m}_f / \dot{m}_{air}) / (\dot{m}_f / \dot{m}_{air})_{st}$, d'où \dot{m}_f est le taux de perte de masse de combustible, \dot{m}_{air} est le débit massique d'air entrée, et l'indice st correspond à la condition stoechiométrique [7]. Par l'analyse comparative des corrélations entre le rendement de la production en CO et le GER pour les diverses combustibles étudiés, trois régimes peuvent être identifiés : bien ventilé ($GER < 0,7$), sous-ventilé ($0,7 < GER < 1,5$), et fortement sous-ventilé ($1,5 < GER$).

Une étude paramétrique a été menée avec une coupelle de 13 cm, générant systématiquement des feux bien ventilés. Le taux de perte de masse (MLR), le GER, et la concentration en O₂ sous le plafond, pour différents débits de ventilation, sont présentés aux figures 4-6. Dans toutes les conditions, le MLR atteint un plateau après la phase de croissance et se maintient jusqu'à l'extinction, un comportement similaire à un feu en milieu ouvert. La concentration en O₂ reste supérieure à 10 %, garantissant une combustion bien ventilée. L'évolution du GER pour différentes configurations indique également un régime bien ventilé. Par ailleurs, il est notable qu'avant l'extinction (1050–1500 s) de la flamme, dans la condition à 10 RR, le feu présente une oscillation de basse fréquence, et que la valeur maximale du GER atteint 0,75, ce qui correspond à une transition entre les régimes bien ventilé et sous-ventilé. Ce phénomène pourrait s'illustrer par une boucle de rétroaction : une baisse du taux d'oxygène local durant la combustion le rend insuffisant pour maintenir la réaction, ce qui réduit localement le taux de combustion. Lorsque le MLR diminue, le gradient de concentration en oxygène se rééquilibre, ce qui favorise la reprise du MLR.

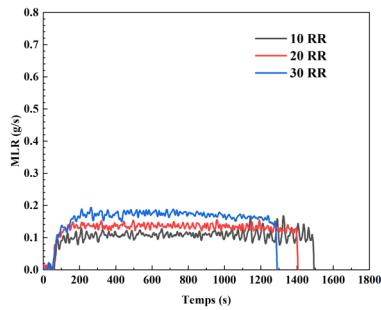


Figure 4 : Évolution du MLR pour $D = 13 \text{ cm}$

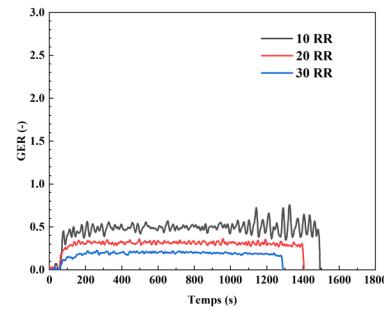


Figure 5 : Évolution du GER pour $D = 13 \text{ cm}$

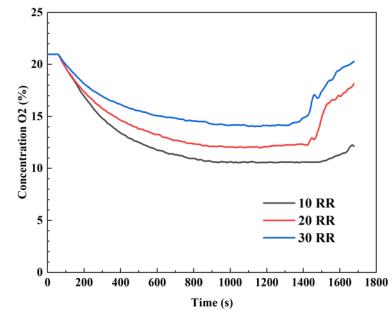


Figure 6 : Évolution de la concentration en O₂ pour $D = 13 \text{ cm}$

Lorsque le diamètre de la coupelle augmente à 16 cm, les feux deviennent sous-ventilés. Les figures 7-9 illustrent l'évolution du MLR, du GER et de la concentration en O₂. Comme pour les feux bien ventilés (13 cm), le MLR atteint un pic après la phase de croissance. Cependant, elle diminue ensuite vers un plateau inférieur en raison de la disponibilité limitée en O₂, ce qui est insuffisant pour maintenir le taux de combustion à un niveau similaire au cas d'un feu bien ventilé. Enfin, à un débit de ventilation de 30 RR, un comportement oscillatoire est également observé entre 430 et 890 s, où le GER varie autour de 0,75.

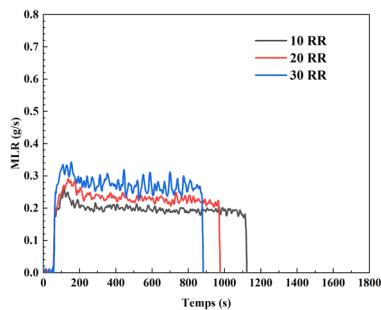


Figure 7 : Évolution du MLR pour $D = 16 \text{ cm}$

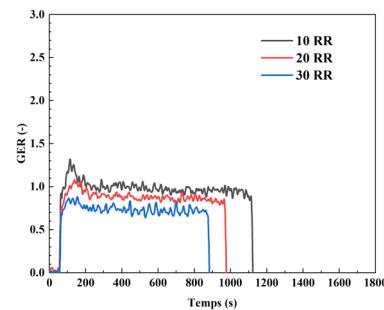


Figure 8 : Évolution du GER pour $D = 16 \text{ cm}$

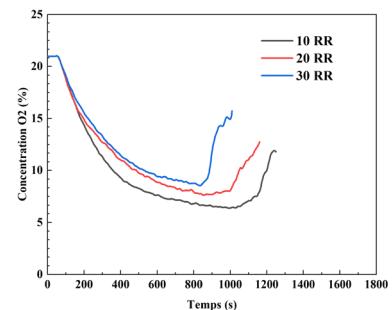


Figure 9 : Évolution de la concentration en O₂ pour $D = 16 \text{ cm}$

Avec les coupelles de 20 et 24 cm, le feu peut devenir davantage « sous-ventilé » (amplitude du GER plus élevée), entraînant la production d'une grande quantité de gaz imbrûlés. Comme le montrent les figures 10 et 13, le MLR atteint d'abord un pic, similaire à celui observé pour

les coupelles de 13 et 16 cm. Cependant, contrairement à ces derniers cas, le MLR continue de diminuer jusqu'à l'extinction au lieu de se stabiliser sur un plateau. Ce comportement s'explique par une concentration en O₂ extrêmement limitée, rapidement épuisée, empêchant le maintien d'un MLR stable, comme illustré aux figures 12 et 15. Selon le concept de GER, les feux évoluent dans un régime fortement sous-ventilé, à l'exception de la configuration de 20 cm à 10 RR. De plus, pour la coupelle de 20 cm à 20 RR, le feu présente des oscillations de basse fréquence entre 420 et 700 s, le GER oscillant autour de 1,4 (transition entre les régime sous-ventilé et fortement sous-ventilé).

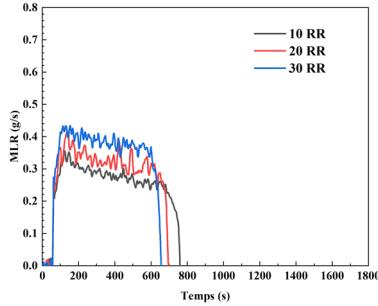


Figure 10 : Évolution du MLR pour $D = 20\text{ cm}$

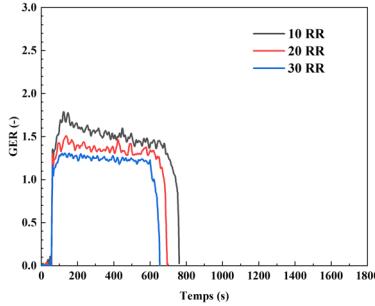


Figure 11 : Évolution du GER pour $D = 20\text{ cm}$

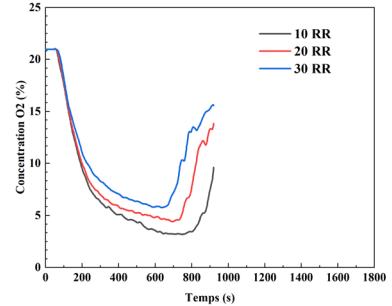


Figure 12 : Évolution de la concentration en O₂ pour $D = 20\text{ cm}$

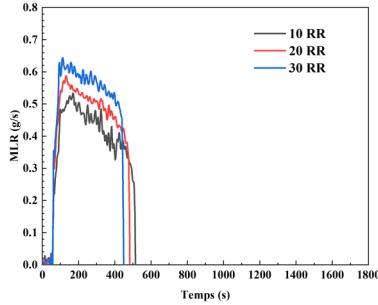


Figure 13 : Évolution du MLR pour $D = 24\text{ cm}$

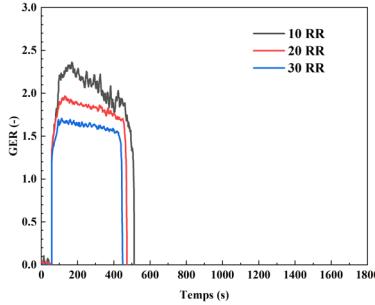


Figure 14 : Évolution du GER pour $D = 24\text{ cm}$

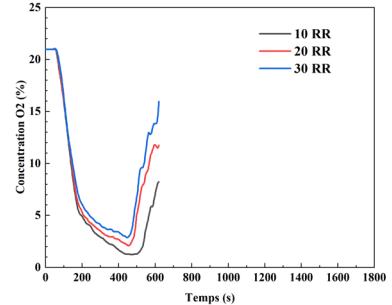


Figure 15 : Évolution de la concentration en O₂ pour $D = 24\text{ cm}$

Enfin, plusieurs observations importantes doivent être soulignées. Tout d'abord, à mesure que le GER augmente, l'amplitude du MLR s'élève tandis que la concentration en O₂ sous le plafond diminue fortement. Ensuite, dans nos conditions expérimentales (ventilation de type cheminée avec des ouvertures perpendiculaires en entrée et en sortie dans la partie inférieure du compartiment, représentative d'une structure de château), l'influence du débit de ventilation sur le comportement du feu est moins marquée par comparaison avec l'effet du diamètre de la coupelle. Par ailleurs, des phénomènes d'oscillation de basse fréquence sont observés dans certains essais, notamment pour 13 cm à 10 RR, 16 cm à 30 RR et 20 cm à 20 RR. L'évolution du GER montre que ces oscillations apparaissent lors des transitions entre les régimes. L'analyse plus compréhensive des mécanismes et des conditions déclenchant ces oscillations constituera un axe principal des travaux futurs.

3.2. Gaz imbrûlés et leur risque d'inflammation

En milieu confiné, les incendies produisent d'importantes quantités de gaz imbrûlés en raison d'une combustion incomplète, surtout en conditions fortement sous-ventilées. Ces gaz inflammables (CO, H₂, CxHy) peuvent s'accumuler et s'enflammer au contact de l'O₂ à haute

température, générant des surpressions, des feux secondaires et des dommages structurels. Comprendre leurs mécanismes d'inflammation est donc crucial en ingénierie de la sécurité incendie pour améliorer l'évaluation des risques et les stratégies de ventilation.

Du fait des contraintes de pagination de cet article, seules l'évolution des gaz imbrûlés et l'analyse du risque d'inflammation représentatives de l'ensemble des résultats, sont présentées dans deux cas : 16 cm à 10 RR (sous-ventilé) et 24 cm à 10 RR (fortement sous-ventilé). Les figures 16 et 17 comparent l'évolution du CO, du H₂ et des CxHy entre ces deux configurations. Les résultats montrent que le plus grand feu de nappe (24 cm) génère des quantités de gaz imbrûlés significativement élevées, car l'augmentation du MLR entraîne une combustion plus incomplète à faible taux de ventilation (10 RR). Cependant, le cas d'un foyer de 16 cm présente des concentrations de gaz imbrûlés plus faibles, indiquant une combustion plus complète. L'analyse de la fraction de chaque gaz dans le mélange apporte un éclairage supplémentaire. Pour le cas de 16 cm, la fraction de CO est plus élevée, suggérant que dans une combustion peu enrichie en carburant, le CO devient le principal produit imbrûlé, augmentant la LFL et réduisant le risque d'inflammation. En revanche, pour le cas de 24 cm, un MLR plus élevé et une consommation rapide en O₂ favorisent la formation d'hydrocarbures partiellement oxydés, très réactifs et amplifiant le risque d'inflammation. Globalement, comme le CO, le H₂ et les CxHy sont tous combustibles en conditions viciées, le cas de 24 cm présente le risque d'inflammation le plus élevé, soulignant l'importance d'un contrôle strict de la ventilation et de stratégies adaptées aux feux de nappe de grande taille en milieu confiné.

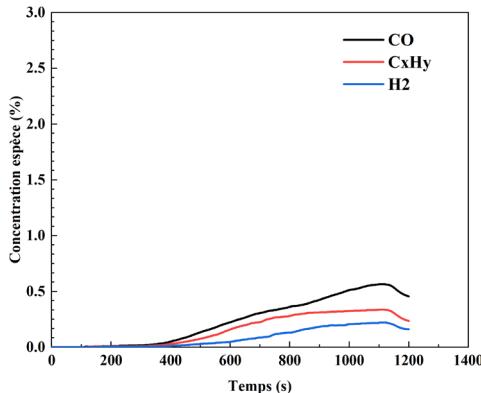


Figure 16 : Évolution de la concentration en espèces combustibles pour $D = 16 \text{ cm}$ et $RR = 10$

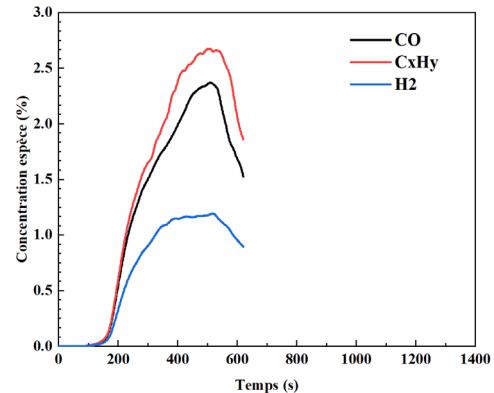


Figure 17 : Évolution de la concentration en espèces combustibles pour $D = 24 \text{ cm}$ et $RR = 10$

En 2020, Manescau et al. [8] ont proposé une approche globale pour prédire le risque d'inflammation des gaz imbrûlés dans des enceintes confinées et ventilées mécaniquement. Un modèle simplifié suppose que l'auto-inflammation se produit lorsque la température des gaz atteint la température d'auto-inflammation (AIT) et que la concentration du mélange dépasse la limite inférieure d'inflammabilité (LFL). L'évaluation repose sur la détermination de la composition et de la température du mélange afin de vérifier si la proportion de gaz imbrûlés dépasse la LFL. Pour un gaz pur, la LFL dépend de sa température, tandis que pour un mélange, elle est calculée en fonction de la fraction molaire de chaque composant. La loi de Burgess-Wheeler décrit la LFL d'une espèce gazeuse unique, $LFL_i(T)$, en fonction de la température :

$$LFL_i(T) = LFL_i(T_0) \cdot \left[1 - \frac{T - T_0}{1300 - T_0} \right] \quad (1)$$

Les valeurs de l'AIT et de la LFL à $T_0 = 25^\circ\text{C}$ pour les trois principales espèces combustibles sont résumées dans le tableau 1. Pour un mélange de combustibles, la LFL est déterminée à l'aide de la loi de Le Châtelier :

$$LFL(T) = \left[\sum_i \frac{X_i}{LFL_i(T)} \right]^{-1} \quad (2)$$

où X_i représente la fraction molaire de chaque composant gazeux dans le mélange à 1 atm.

| | $AIT, {}^\circ\text{C}$ | $LFL (T_0=25^\circ\text{C}), \%$ |
|----------------|-------------------------|----------------------------------|
| CO | 588 | 12,5 |
| H ₂ | 520 | 4 |
| Heptane | 233 | 1,05 |

Tableau 1 : Propriétés thermiques des principaux combustibles [9]

Pour des raisons de sécurité, lorsque certaines espèces à longue chaîne ne sont pas identifiées lors de l'échantillonnage des gaz, la LFL des CxHy est supposée être la plus basse des cas étudiés. Comme la LFL diminue avec la longueur de la chaîne carbonée, celle de l'heptane est adoptée comme estimation conservatrice pour les feux d'heptane. L'AIT, dépendant de cinétiques chimiques complexes, est difficile à déterminer. Comme la LFL, elle diminue avec la longueur de la chaîne carbonée avant de se stabiliser pour les hydrocarbures longs. En l'absence de loi universelle pour l'AIT d'un mélange, la plus basse valeur est considérée comme représentative du mélange.

Les figures 18 et 19 présentent les résultats de l'évaluation du risque d'inflammation des gaz imbrûlés pour les deux cas étudiés. L'analyse est effectuée uniquement durant les périodes où la production de gaz imbrûlés devient significative. Selon les résultats, le feu de nappe de 24 cm présente un fort potentiel d'inflammation après 300 s, tandis que le cas de 16 cm reste sous le seuil, malgré que la température est légèrement supérieure à l'AIT. Cette observation souligne l'importance de l'optimisation de la ventilation et de la surveillance des gaz imbrûlés, en particulier dans les feux fortement sous-ventilés.

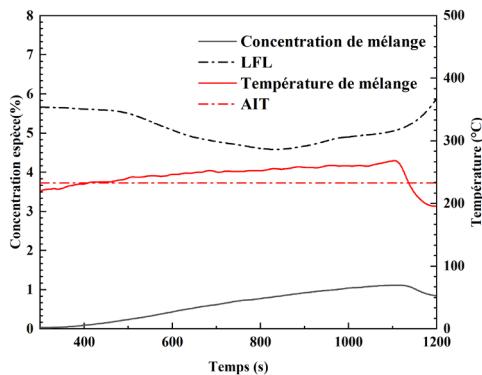


Figure 18 : Évaluation du risque d'inflammation des gaz imbrûlés pour $D = 16 \text{ cm}$ et $RR = 10$

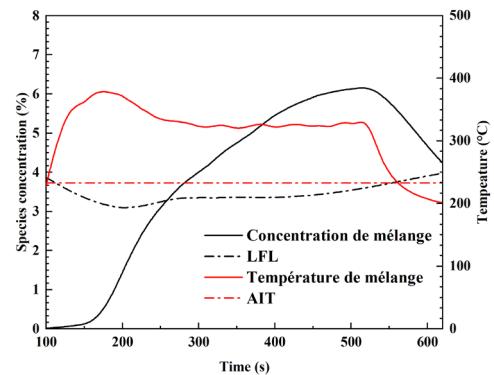


Figure 19 : Évaluation du risque d'inflammation des gaz imbrûlés pour $D = 24 \text{ cm}$ et $RR = 10$

4. Conclusion

Cette étude expérimentale met en évidence l'impact de la surface de feu de nappe et du taux de ventilation sur le comportement incendiaire et le risque d'inflammation des gaz imbrûlés en milieu confiné. Les résultats confirment que le comportement du feu varie selon le régime de

combustion et les conditions environnementales. Dans les feux bien ventilés, le MLR et le GER (entre 0,2 et 0,75) se stabilisent sur un plateau avec une concentration en O₂ supérieure à 10 %, assurant une combustion soutenue. Dans les feux sous-ventilés, le MLR et GER (entre 0,7 et 1,3) atteint un pic avant de chuter vers un plateau inférieur en raison de la faible quantité en O₂. Dans les feux plus « sous-ventilés », l'apport en O₂ est insuffisant pour maintenir une combustion stable, entraînant une diminution continue du MLR et du GER (entre 1,3 et 2,35) et une accumulation de gaz imbrûlés. Des phénomènes d'oscillation sont aussi observés au cours des phases de transition entre le régimes.

Une approche globale d'évaluation du risque d'inflammation des gaz imbrûlés, basée sur l'AIT et la LFL, est appliquée à deux cas représentatifs : 16 cm à 10 RR (sous-ventilé) et 24 cm à 10 RR (fortement sous-ventilé). Les résultats montrent que le cas d'une nappe de 24 cm présente un potentiel d'inflammation élevé, tandis que le cas de 16 cm reste sous le seuil. Ces conclusions soulignent la nécessité de stratégies adaptées pour limiter les risques d'incendies dans les bâtiments historiques.

Certaines questions restent ouvertes. L'influence des turbulences locales et des fluctuations de pression sur l'accumulation et l'inflammation des gaz imbrûlés doit être approfondie. De plus, les mécanismes et les conditions déclenchant les oscillations de basse fréquence lors de feux de compartiments nécessitent une meilleure compréhension. Les travaux futurs s'orienteront vers des simulations numériques et des études expérimentales élargies, intégrant divers types et profondeurs de combustible, afin d'affiner l'évaluation du risque incendie dans les bâtiments historiques.

Références

- [1] L. Audouin, L. Rigollet, H. Prétrel, W. Le Saux, M. Röwekamp, OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments - Overview and main experimental results, *Fire. Saf. J.*, 69 (2013), 80–101.
- [2] H. Pretrel, A. Koched, L. Audouin, Doorway Flows Induced by the Combined Effects of Natural and Forced Ventilation in Case of Multi-compartments Large-Scale Fire Experiments, *Fire Technol.*, 52 (2016) 489–514.
- [3] W. Yao, X. Hu, J. Rong, J. Wang, H. Zhang, Experimental study of large-scale fire behavior under low pressure at high altitude, *J. Fire. Sci.*, 31 (2013) 481–494.
- [4] X. Brunetaud, L. De Luc, S. Janvier-Badosa, K. Beck, M. Al-Mukhtar, Application of digital techniques in monument preservation, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 (2012) 543–556.
- [5] J.G. Quintiere, Scaling applications in fire Research, *Fire Saf. J.*, 15 (1989) 3–29.
- [6] G. Hesketh, Scaling the interaction of water sprays and flames, *Fire Saf. J.*, 37 (2002) 535–548.
- [7] D.T. Gottuk, R.J. Roby, M.J. Peatross, C.L. Beyler, Carbon monoxide production in compartment fires, *Journal of Fire Protection Engineering*, 4 (1992) 133–150.
- [8] B. Manescau, L. Courty, L. Acherar, B. Coudour, H.Y. Wang, J.P. Garo, Effects of ventilation conditions and procedures during a fire in a reduced-scale room, *Process Safety and Environmental Protection*, 144 (2020) 263–272.
- [9] Babrauskas Vytenis, Ignition Handbook, Fire Science Publishers (2003).