

Réaction au feu d'un composite époxy de carbone : comparaison de la dégradation fournie par une flamme de kérosène ou de propane

Chazelle T., Perrier A., Schuhler E., Cabot G., *Coppalle A.*

¹ Normandy University//INSA Rouen/CORIA/.ST Etienne du Rouvray/France
coppalle@coria.fr

► Plan de la présentation

- Le contexte et les objectifs
- Les bruleurs et les propriétés des flammes
- Résultats and discussions
 - perte de masse
 - Température arrière
 - La deposition de la suie
- conclusions

Contexte and objectifs

$T \approx 1000^{\circ}\text{C}$

Φ up to 200 kW/m²

- Les composites dans les avions: de nombreux avantages

Mais une question importante: la réaction du feu



====>Standard tests standards: grands echantillons



Developed Standard Test



Gas burner

- **Tests à petites échelles:**

- moins coûteux, plus de tests sont possibles

-ils fournissent plus de données pour comprendre la dégradation thermique et la diminution des propriétés mécaniques des échantillons

soumis à une contrainte thermique

(comparé à un verdict succès / échec des tests standard)

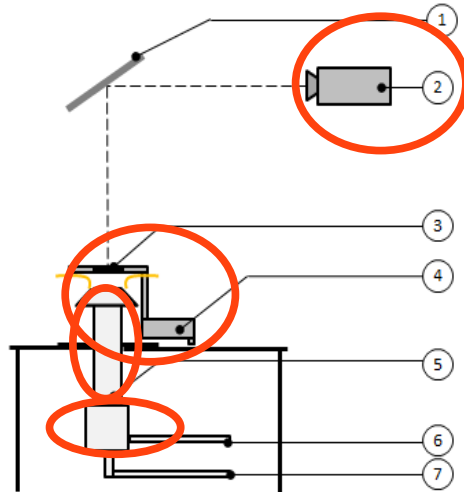
Contexte and objectifs

Tests à petites échelles: quelques points importants

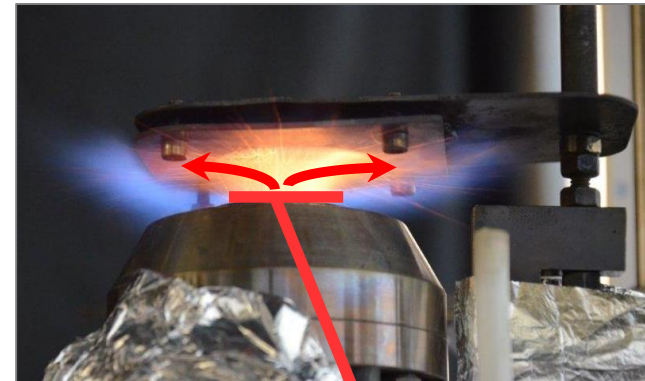
- la plupart des tests sont effectués avec un calorimétrie à cône
==> seul un flux radiatif peut être appliqué, et jusqu'à 100 kW / m²
- Jusqu'à présent, moins d'études avec l'utilisation de flammes pour induire un stress thermique sur les matériaux
==> Dans ce travail à petite échelle, dégradation de composites C-époxy soumis à des flammes de kérosène et de propane
- les flammes induisent à la fois des flux convectifs et radiatifs, avec une contribution différente selon la nature du carburant.
 - Dans le cas d'une flamme avec peu de suies, comme celle produite par la combustion du propane dans des conditions stœchiométriques,
==>le flux convectif est important.
 - Dans le cas d'une flamme avec beaucoup de suies, comme celle produite par la combustion du kérosène
==>augmentation de la contribution du flux radiatif.

bruleurs and propriétés des flammes

Propane burner



- (1) Mirror (2) infrared camera
- (3) Sample holder (4) Load cell
- (5) burner
- (6) air inlet (7) propane inlet



3.5 cm diameter

schematic view of the propane burner
and the measurement setup

bruleurs and propriétés des flammes

Kerosen burner



Burner: generation of the flame



Burner: details of the spray and the swirl generator

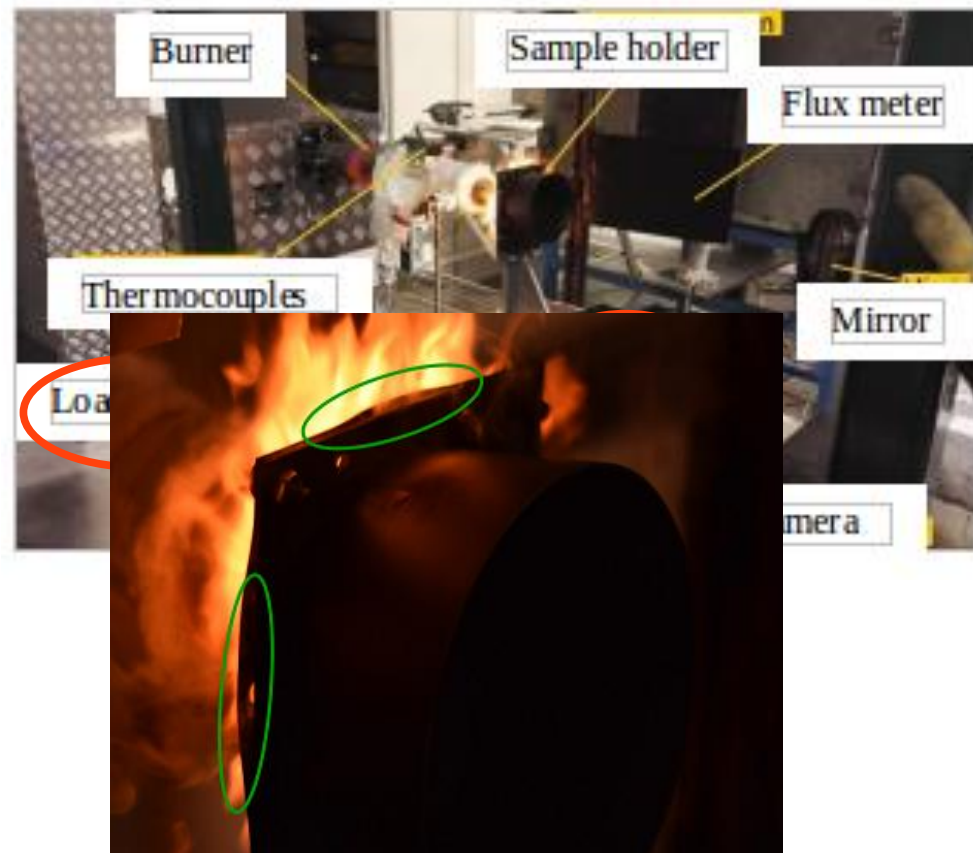
IMPORTANT: Pour les résultats présentés ici, cette partie du brûleur a été réglée pour produire une flamme à haute teneur en suie

Burner + flame-tube (without insulation)



bruleurs and propriétés des flammes

Bruleur kerosene: le système de mesures

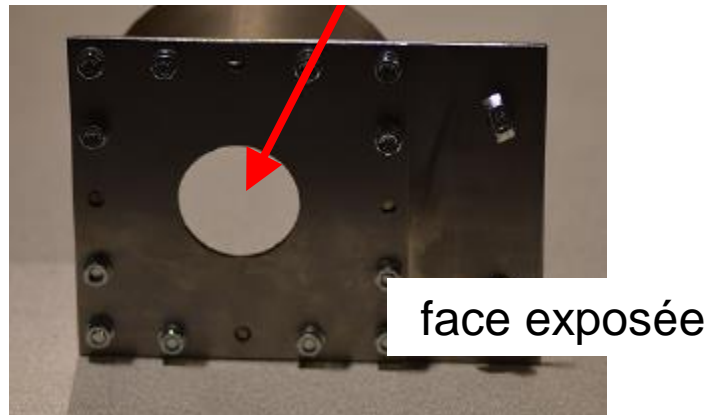


bruleurs and propriétés des flammes

Le porte échantillon

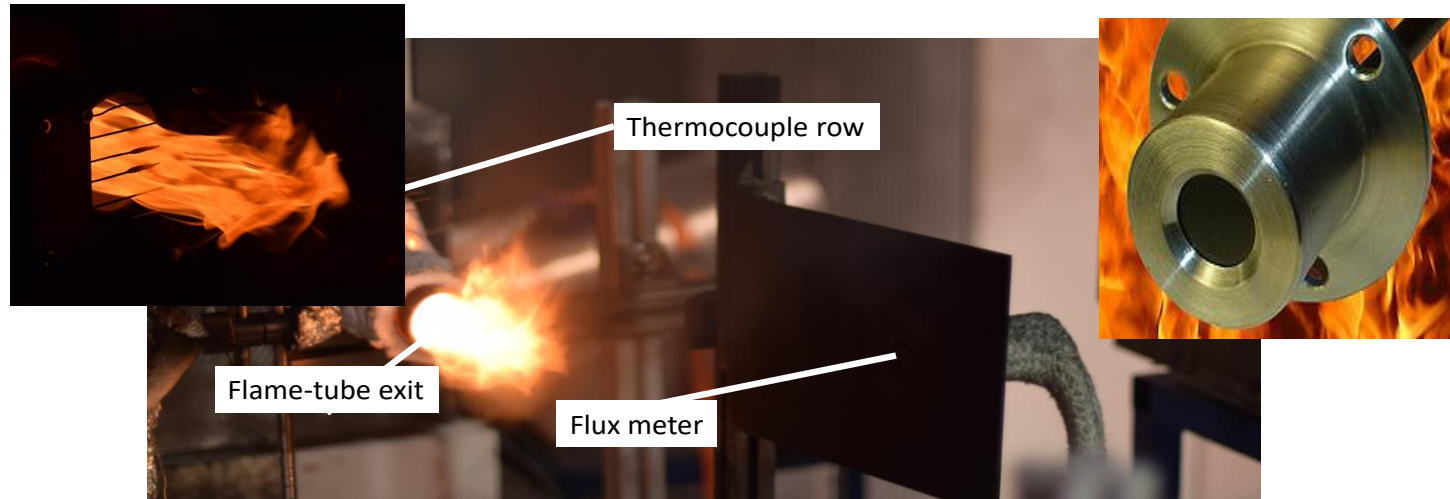
ouverture délimitant la surface de l'échantillon exposée à la flamme

Diameter: 3.5 cm propane
5 cm kerosen



bruleurs and propriétés des flammes

propriétés des flammes

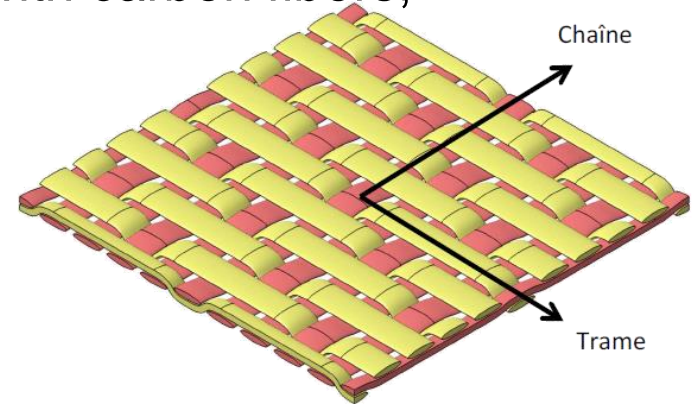
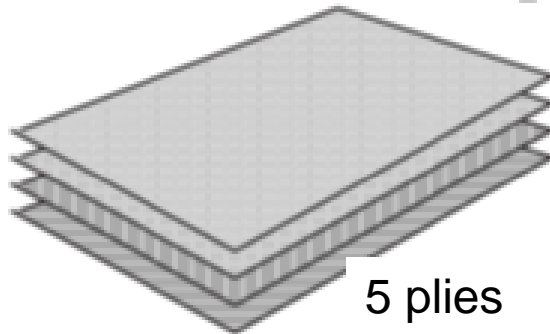


Avant chaque essai: mesures du flux thermique et de la température de flamme
====> au même endroit que le porte échantillon.

Propane flamme: 1110 °C sur l'axe et 106 kw/m²
Kerosen flamme: 1110 °C sur l'axe et 116 kw/m²

bruleurs and propriétés des flammes

Composite: epoxy-based reinforced with carbon fibers,



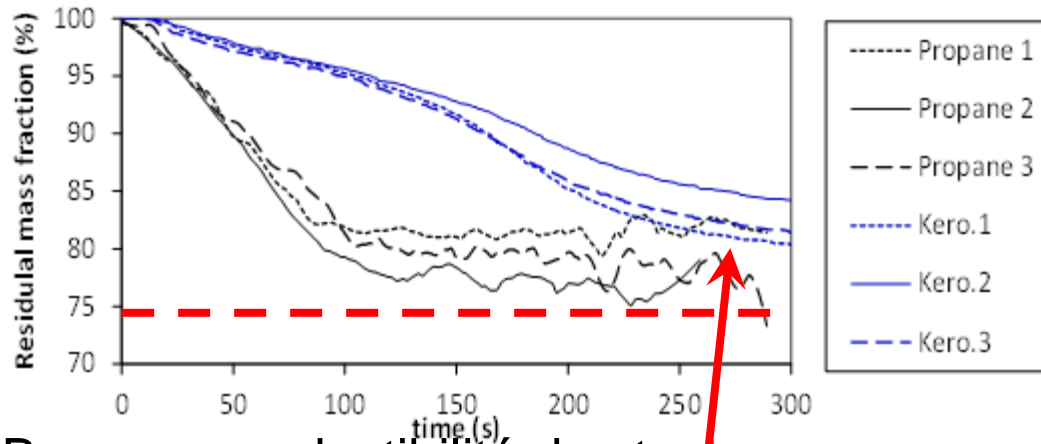
-2 mm thick plate,

Stacking sequence of carbon fiber: 5-harness satin weave
mass fraction of fiber is 74%.

-Onset temperature of degradation T_d at 320°C
peak of mass loss rate at T_p 390°C ,

Resultats et discussion

Perte de masse

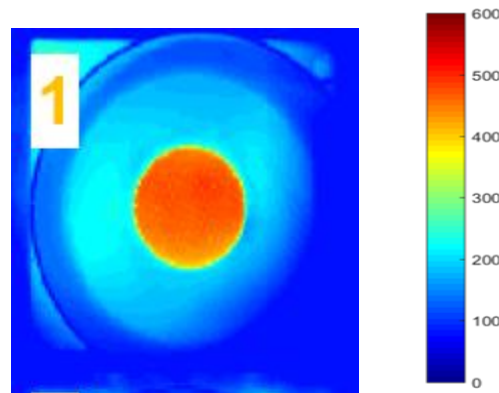


- Bonne reproductibilité des tests
- Fraction massique initiale des fibres: 74%
====> la masse résiduelle de résine après 300s est faible
- Pour la flamme de kérosène,
 - La perte de masse est plus faible par rapport au cas du propane.

Résultats et discussion

Temperature sur la face arrière (camera IR)

Un exemple: test 'kero 1', à 150s.

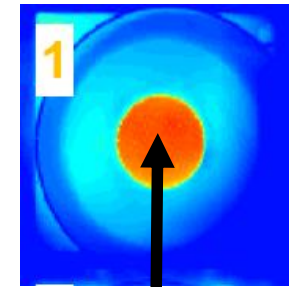
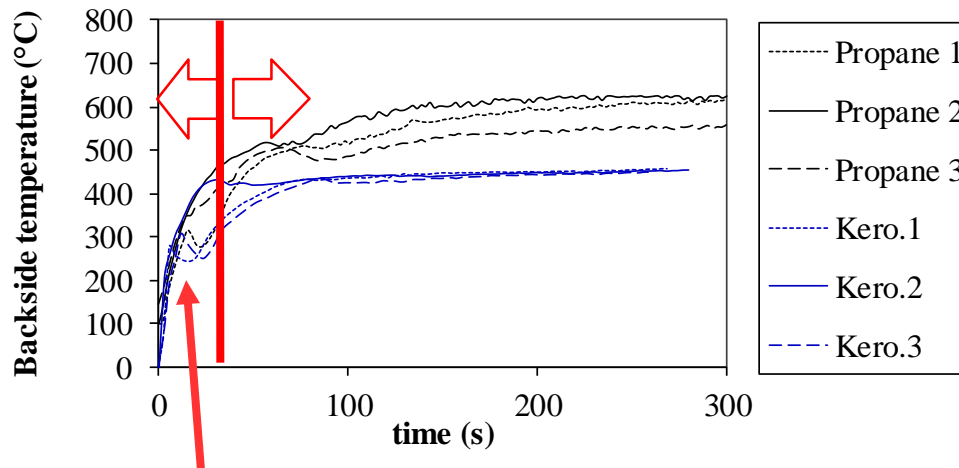


- homogénéité de la température sur la zone de la face arrière délimité par l'ouverture de 5cm
====> Cela suggère que la majeure partie du flux thermique appliqué sur la zone exposée correspondante est transmis à travers la profondeur de l'échantillon (faible flux radial).
- Résultats similaires pour les autres tests

Résultats et discussion

Temperature sur la face arrière (camera IR)

(a) Deux périodes



Valeurs au centre de la face arrière

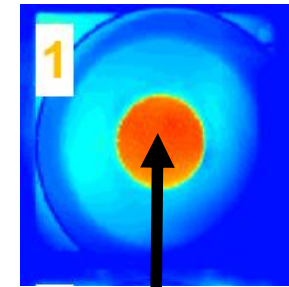
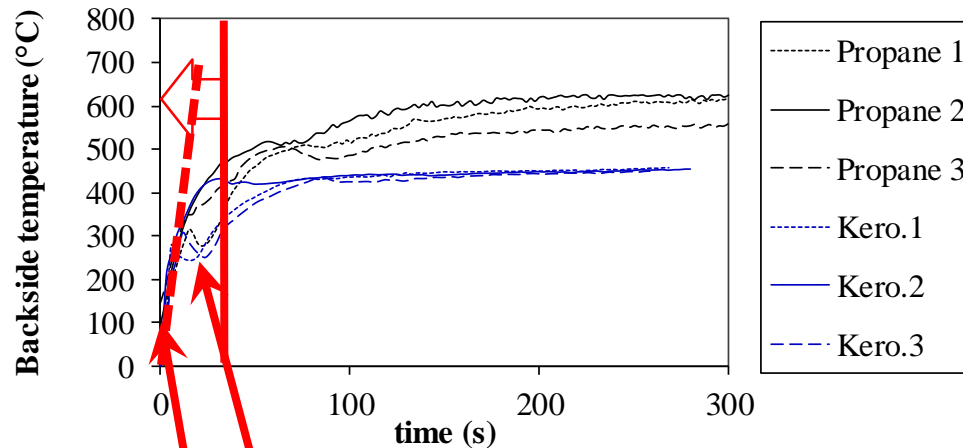
première période: jusqu'à 40s environ

- ▶ la température augmente rapidement avec le même taux pour les deux flammes,
====> forte conduction thermique à travers l'épaisseur de l'échantillon.
- ▶ À la fin de la première période, les températures se situent entre 300 et 400 ° C
====> correspondant au début de la dégradation thermique de la résine

Résultats et discussion

Température sur la face arrière (camera IR)

(a)



Valeurs au centre de la face arrière

première période: jusqu'à 40s environ

- La température 'face arrière' augmente rapidement: 750K/mn.

Donc, le gradient de température dans l'échantillon doit être très élevé,
====> cela entraîne de fortes contraintes mécaniques induites thermiquement entraînant la formation de *micro-fissures* et le *délamination*

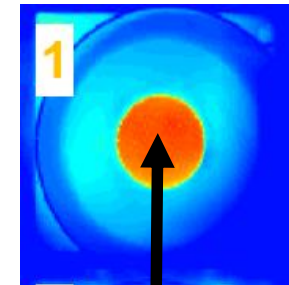
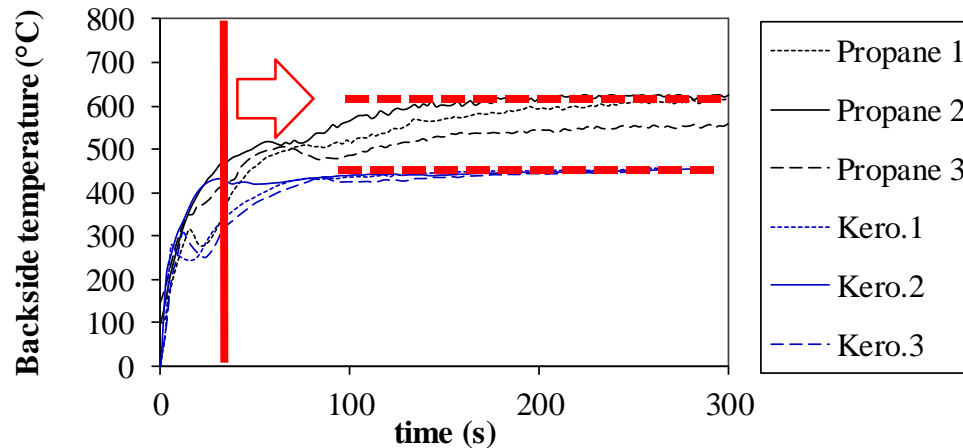
- Pour certains tests, la température chute

====> apparition de grandes fissures à l'intérieur de l'échantillon.
agissant comme une barrière thermique (ce phénomène ne se produit pas automatiquement)

Résultats et discussion

Température sur la face arrière (camera IR)

(a) **deuxième période: $t > 40s$**



Valeurs au centre de la face arrière

► Températures plus ou moins stationnaires à la fin des essais:

2 processus en compétition *sur la surface exposée*

- Un flux convectif décroissant de la flamme en raison de l'augmentation de T_p
- une augmentation des pertes radiatives

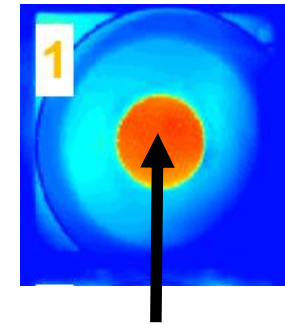
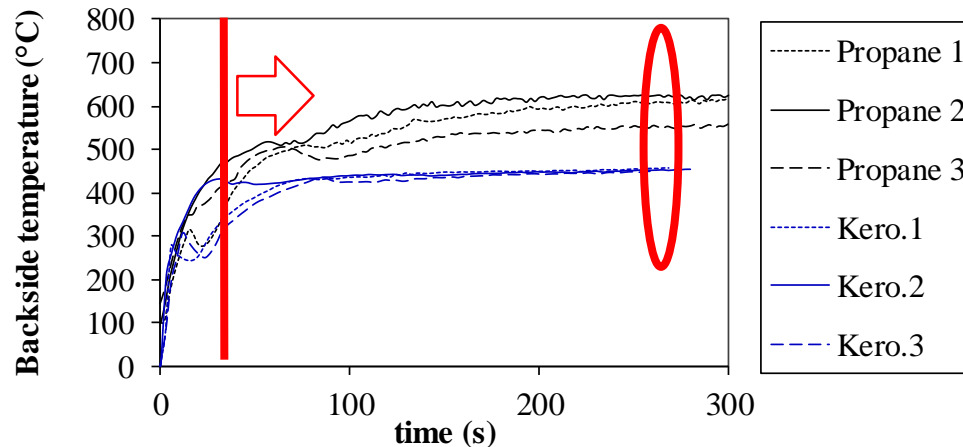
====> équilibre entre ces deux processus sur la surface exposée

Résultats et discussion

Température sur la face arrière (camera IR)

deuxième période: $t > 40s$

(a)



Valeurs au centre de la face arrière

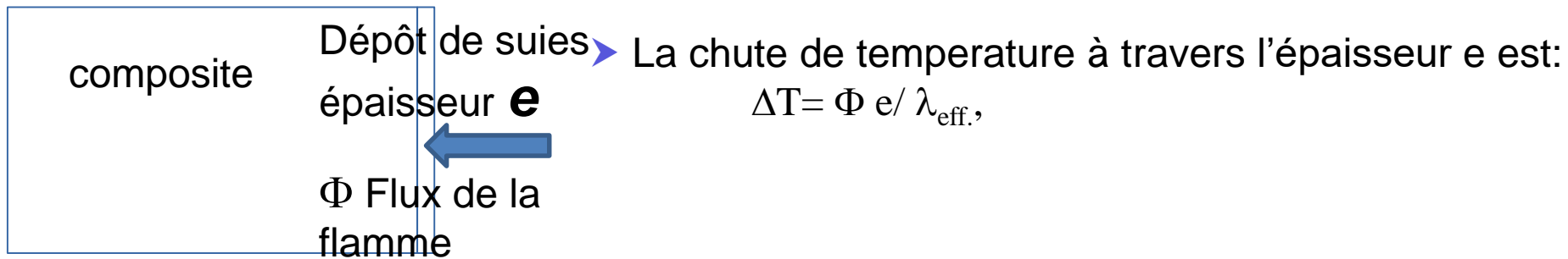
➤ Différence de température à la fin des tests

T_p kérosène $<$ T_p propane: la différence est assez significative (> 100 ° C).

➤ Ceci peut être expliqué par le dépôt de suie sur la face avant, qui est non négligeable pour le cas de la flamme de kérosène
====> barrière thermique, pour réduire le transfert de chaleur à l'intérieur de l'échantillon

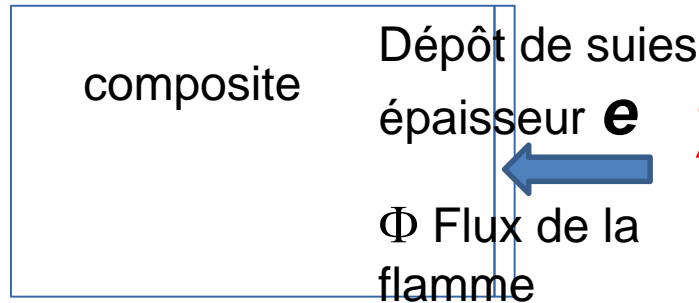
Résultats et discussion

- Températures plus ou moins stationnaires à la fin des tests
====> la *résistance thermique de la couche de suie* peut être estimée dans le régime stable



- λ_{eff} : La conductibilité effective de la couche depend de
 - la conductibilité du gaz λ_p et de la phase solide λ_s
 - la porosité v_p de la couche ($v_p = V_p/V$)

Resultats et discussion



λ_{eff} de la couche de suies?

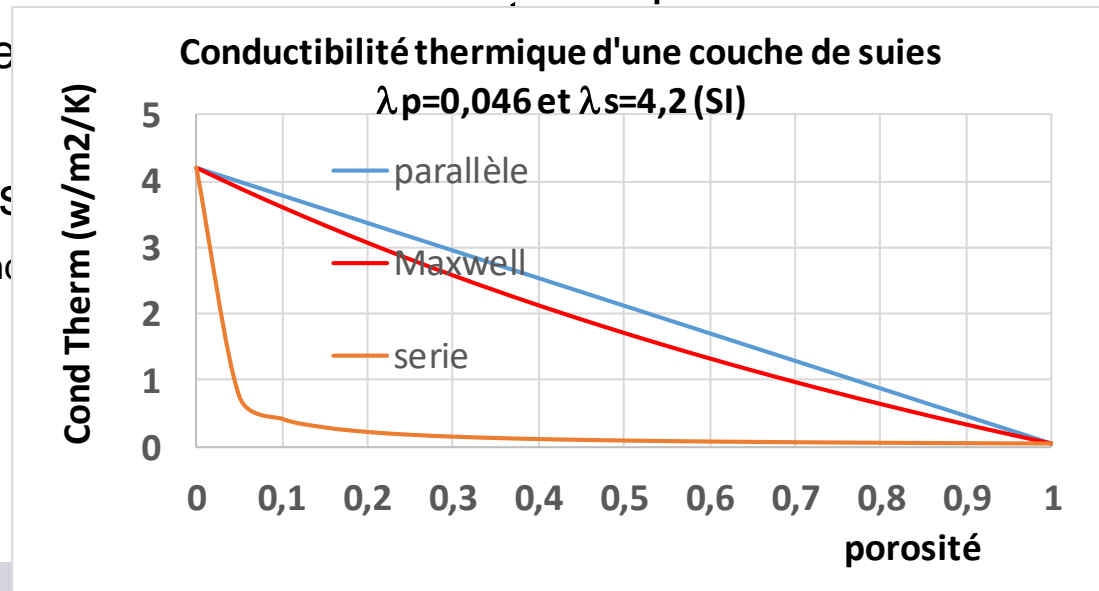
- La méthode la plus souvent utilisée pour calculer λ_{eff} : une loi de mélange
La couche de suies= materiel poreux (soot λ_s + gaz λ_p)

$1/\lambda_{\text{eff} \perp} = v_p / \lambda_p + (1 - v_p) / \lambda_s$ pour le cas série, ====> valeurs minimum

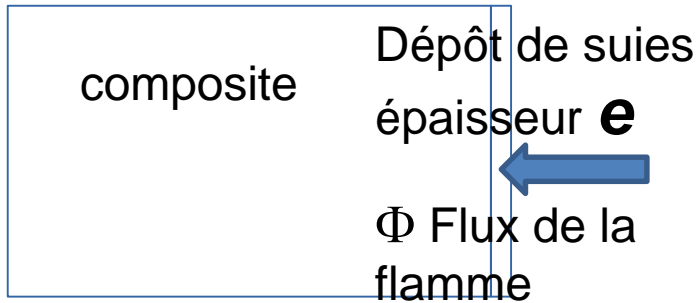
$\lambda_{\text{eff} //} = v_p \lambda_p + (1 - v_p) \lambda_s$ pour le cas parallèle

- Loi de mélange plus sophistiquée
====> basée sur une analogie avec la conduction

$$\lambda = \lambda_s \frac{\lambda_p + 2\lambda_s + 2v_p(\lambda_p - \lambda_s)}{\lambda_p + 2\lambda_s - v_p(\lambda_p - \lambda_s)}$$

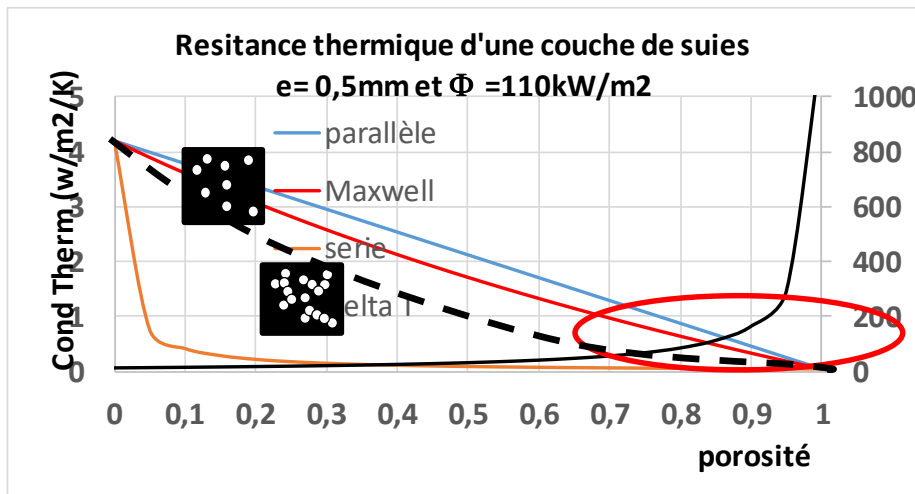


Results and discussion

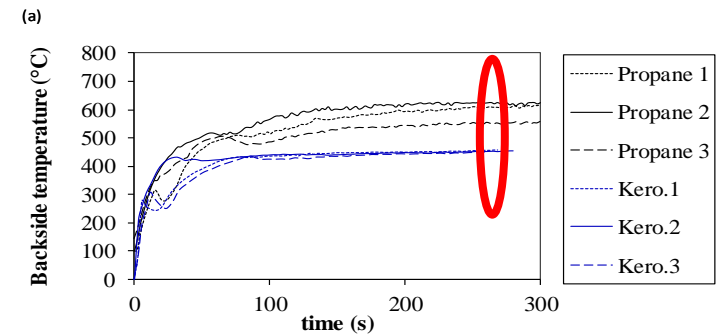


λ_{eff} de la couche de suies?

- Difficile de savoir quelle loi est la plus représentative d'un dépôt de suies
- En utilisant les trois lois précédemment citées,
 - ====> estimation de la résistance thermique, $\Delta T = \Phi e / \lambda_{\text{eff}}$, du dépôt



avec $e = 0.5\text{mm}$



- Ces calculs simples de l'écart de température dans la couche de suie montre que celle-ci peut induire une résistance thermique au flux de flamme

Conclusions

- Pour analyser la réaction au feu de composites soumis à des flammes,
====> des tests à petite échelle sont possibles,
tout en respectant les conditions (Tp, flux) des tests standards
- **Avantage:** Par rapport aux tests standard, ils permettent de réaliser des analyses plus détaillées de la réaction au feu des composites.
- Pour cela: Des brûleurs propane ou kerosene ont été développés pour agresser des échantillons de 10cm²
- Résultats avec un composite C-epoxy (2 mm d'épaisseur)
====> - La période de chauffage du composite est courte, environ 40 ans
- Cela induit de forts gradients de température à l'intérieur du composite, conduisant à des fissures pouvant agir comme une barrière thermique
- Avec le réglage utilisé dans cette étude pour le brûleur au kérosène:
un contenu en suies élevé a été généré,
====> induisant un dépôt de suie sur la surface exposée,
qui peut également agir comme une barrière thermique.