

Estimation du délai d'inflammation d'un élément structurel du bâti exposé à un feu extérieur.

P. Dias Lopes, T. Rogaume, B. Batiot, V. Dréan,
B. Guillaume, E. Guillaume

Institut Pprime, Efectis France

1. Contexte
2. Les 2 modèles étudiés
3. Essais expérimentaux
4. Comparaison des résultats
5. Conclusion

Façades soumises à des expositions très variées

- Deux types de foyers : primaires (végétation) et secondaires (combustibles autour de la maison)



- Fonction des conditions météorologiques : vent (flux convectif), taux d'humidité ambiant



Quel délai d'inflammation ?

Application à un bardage en bois

Les modèles étudiés

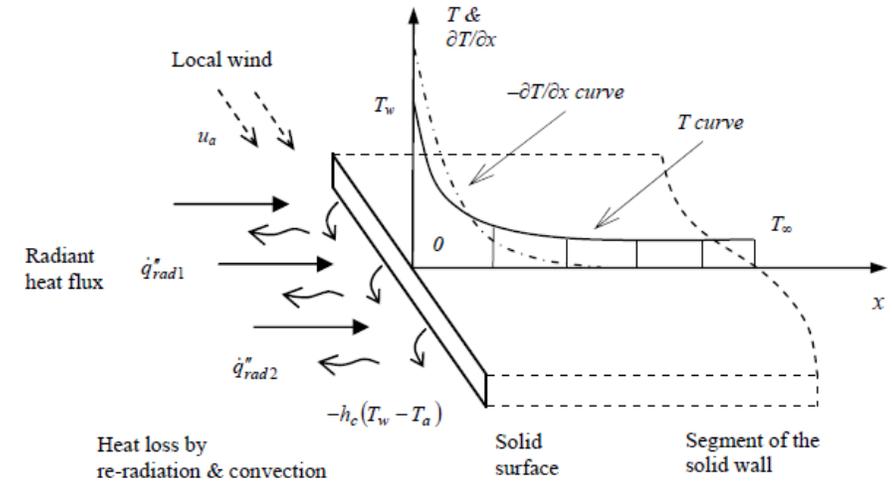
Hypothèses :

- Mur d'une façade exposé à un front de flamme, uniforme sur toute la surface
- Absorptivité du mur uniforme
- Thermiquement épais
- Vent parallèle à la surface de la façade
- Inflammation lorsque $T_{surface} = T_{ig}$

Energie absorbée par le solide :

$$E_{ig} = \int_0^{t_{ig}} \varepsilon * q_{rad}''(t) e^{h^2 \alpha t} \operatorname{erfc}(h\sqrt{\alpha t}) dt$$

Intégrale d'une série infinie...



Energie absorbée par le solide :

$$E_{ig} = \int_0^{t_{ig}} \varepsilon * \dot{q}_{rad}''(t) e^{h^2 \alpha t} \operatorname{erfc}(h\sqrt{\alpha t}) dt$$

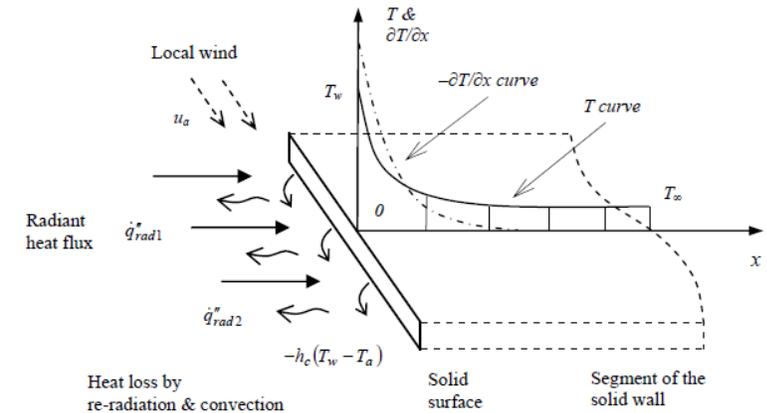
Intégrale d'une série infinie...

Aussi, pour les matériaux thermiquement épais, on a :

$$E_{ig} = \int_0^{t_{ig}} (\varepsilon \dot{q}_{rad}''(t) - \dot{q}_{loss}'') dt = Q_{ig} \sqrt{\frac{k_s}{\rho c_{ps}}} t_{ig} \quad (1)$$

Qui dans le cas d'un matériau humide s'écrit :

$$\int_0^{t_{ig}} \varepsilon \dot{q}_{rad}''(t) dt - 0,67 \dot{q}_{cr}'' t_{ig} = \left((1 - m_f)(T_{ig} - T_a) + m_f(373 - T_a) \frac{c_{pw}}{c_{ps}} + m_f \frac{L_v}{c_{ps}} \right) \sqrt{\rho k_s c_{ps} t_{ig}} \quad (2)$$



Variable qui permet de décrire la quantité de flux de chaleur emmagasinée par le matériau au cours du temps

$$FTP = \int_0^{t_{ex}} (\dot{q}_i'' - \dot{q}_{cr}'')^{n*} dt$$

Avec :

- \dot{q}_{cr}'' : flux critique d'inflammation
- \dot{q}_i'' : flux incident reçu au cours de l'exposition
- n : coefficient lié au matériau

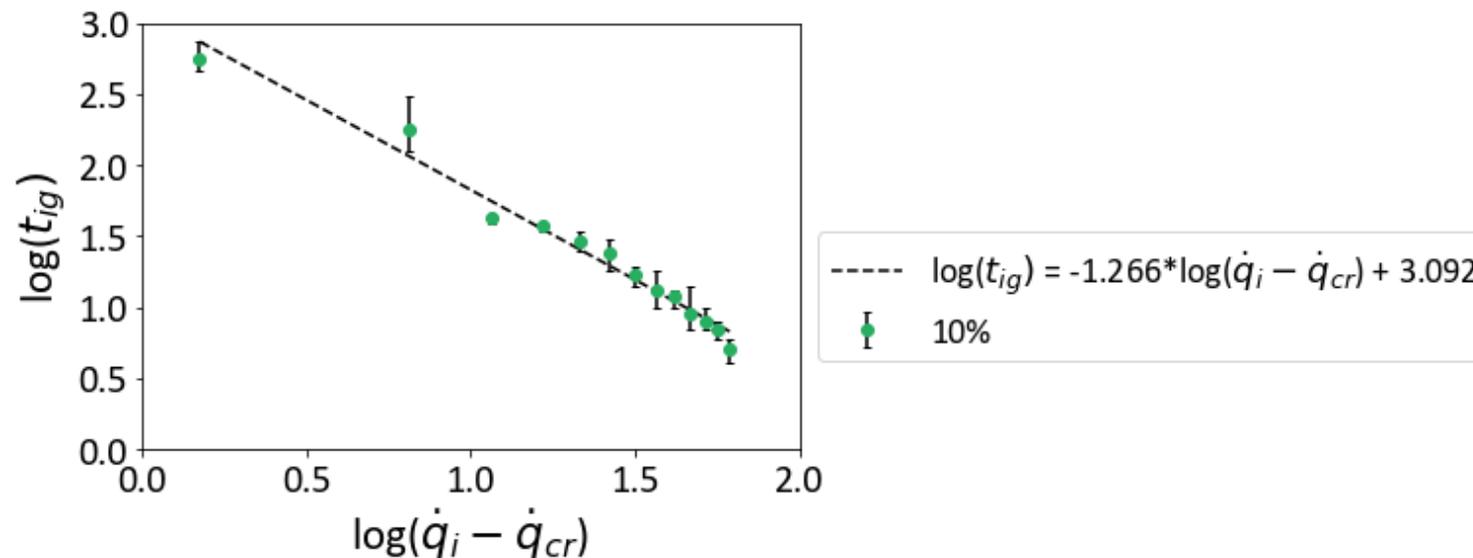
Lorsque $FTP > FTP_{cr}$: inflammation du matériau

Les paramètres \dot{q}_{cr}'' , n et FTP_{cr} peuvent être déterminés à l'aide de 2 méthodes :

- Basé sur les travaux de Janssens pour les matériaux bois.
- Par essais en utilisant des expositions à flux constant.

Réalisation d'essais en cône calorimètre en configuration vertical sur du bois Douglas

- Flux constant entre 20 kW/m² et 80 kW/m²
- Bois humide à 10%

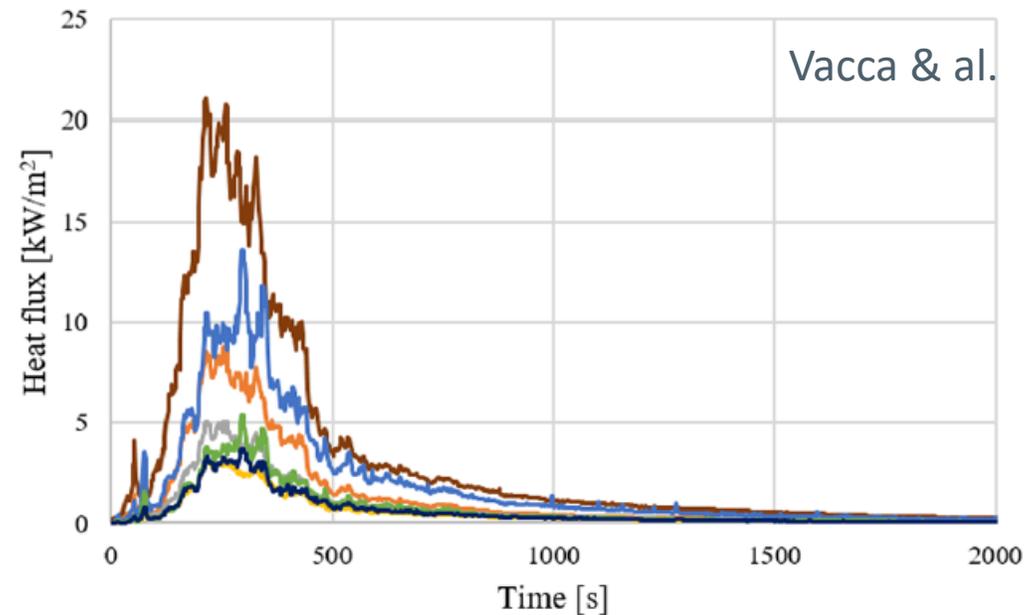
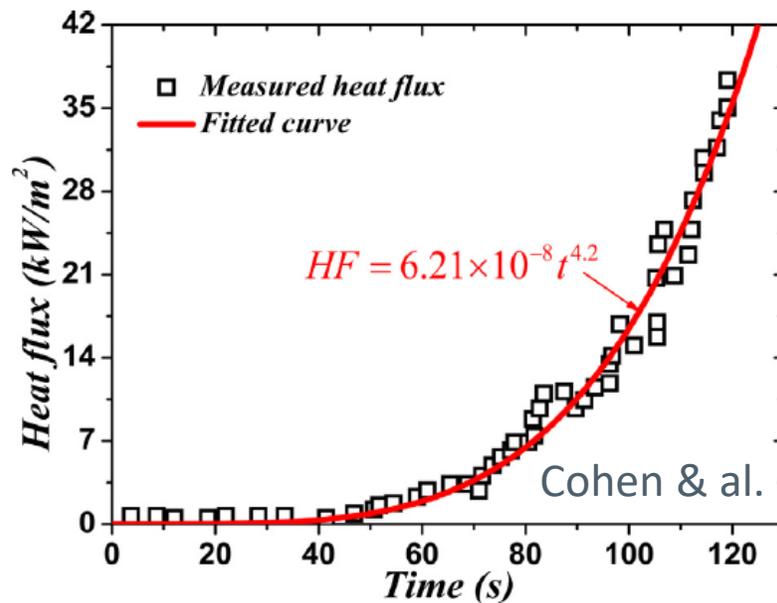


Bois humide à 10% : $n = 1.266$ and $FTP_{cr} = 10^{3.092}$

Essais expérimentaux

Pour un feu de végétation, Cohen a montré que le flux reçu peut s'exprimer sous la forme $q''_{rad} = rt^z$.

Pour un foyer secondaire, le taux de dégagement de chaleur peut se mettre sous la forme $HRR = \alpha t^2$ lors de la phase de croissance. Des expériences ont été réalisées par Vacca & al. sur de nombreux combustibles présents dans les jardins. Le flux reçu à une distance d peut également s'écrire sous la forme $q''_{rad} = rt^z$.



Cohen J.D. "Relating flame radiation to home ignition using modeling and experimental crown fires.", Special Issue on The International Crown Fire Modelling Experiments (ICFME) in Canada's Northwest Territories, 34, 1616-1626, 2004, <https://doi.org/10.1139/x04-049>

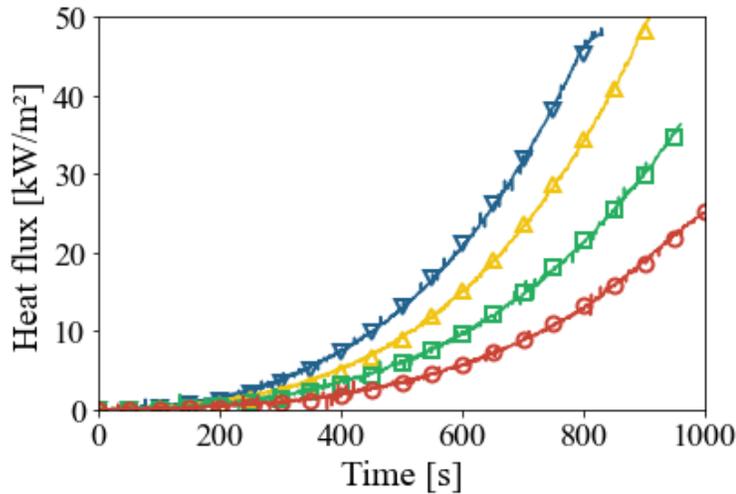
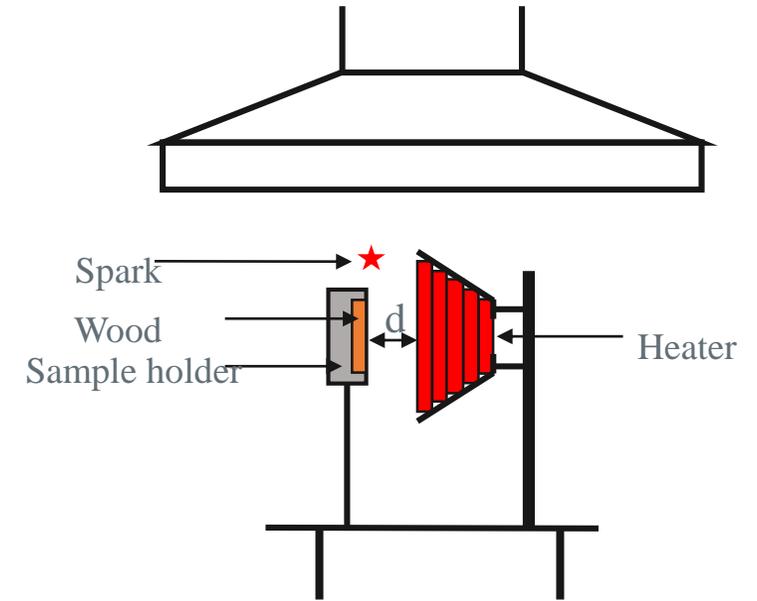
Vacca & al., "Experimental analysis of real-scale burning tests of artificial fuel packs at the Wildland-Urban Interface.", Safety science, 146, 105568, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105568>

Protocole expérimental – Cône calorimètre

A $t = 0s$:

- allumage de la spirale avec $T_{consigne} = 1000^{\circ}C$
- mise en place de l'échantillon face à la spirale

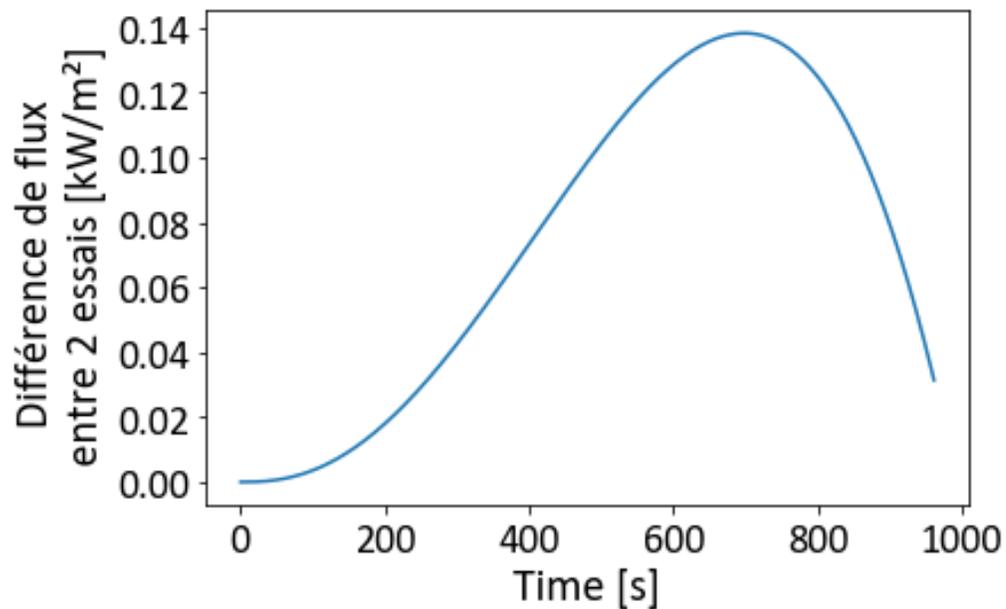
Selon la distance d , la cinétique de chauffage reçu par l'échantillon diffère (la cinétique de chauffage est celle de la spirale du cône)



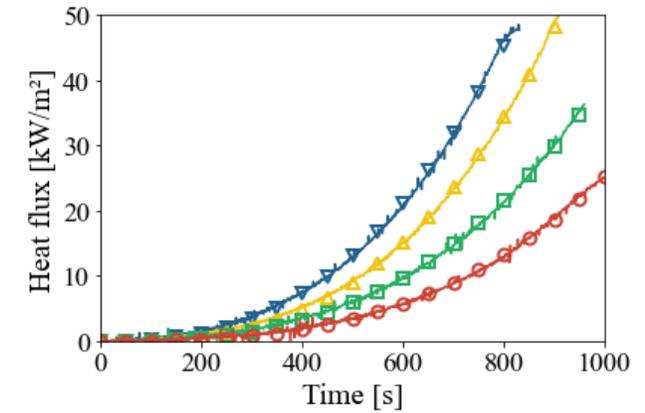
▽	25mm - $\dot{q}_{inc} = 9.41 * 10^{-7} * t^{2.65}$
△	47mm - $\dot{q}_{inc} = 2.04 * 10^{-7} * t^{2.84}$
□	92mm - $\dot{q}_{inc} = 1.89 * 10^{-7} * t^{2.77}$
○	130mm - $\dot{q}_{inc} = 5.21 * 10^{-8} * t^{2.89}$

Protocole expérimental

Avant les essais, 2 calibrations ont été faites pour chaque distance



Au maximum, 138 W/m² d'écart entre les essais : le flux reçu est bien le même entre les essais à une distance donnée

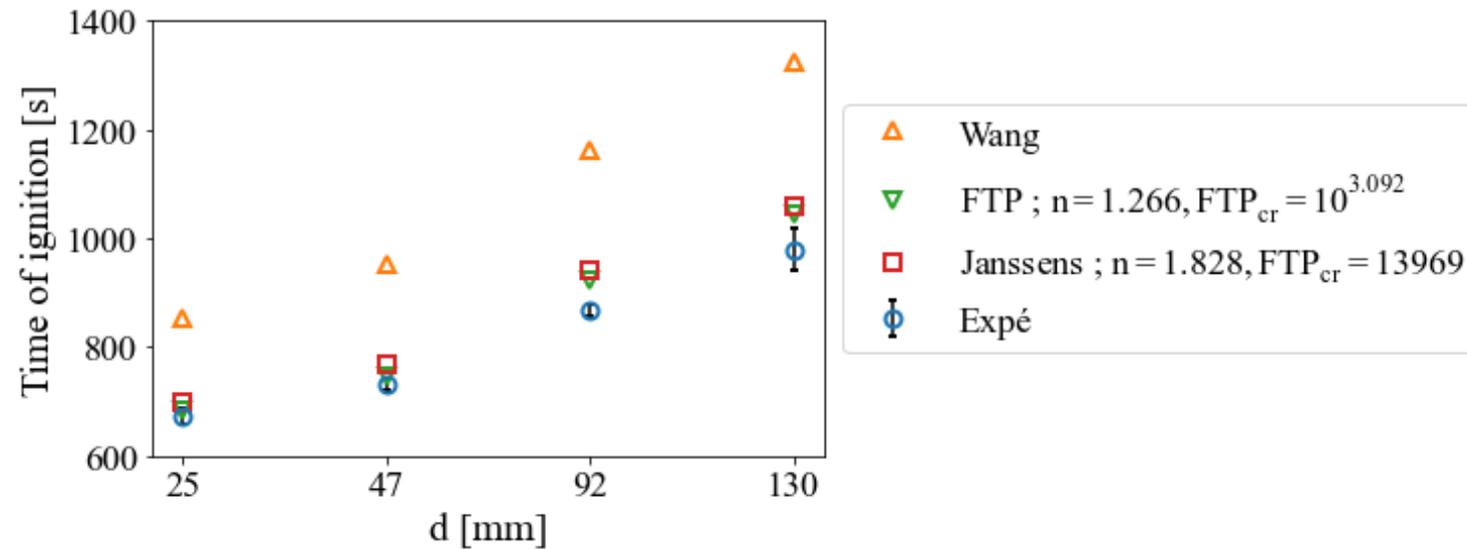


Comparaison des résultats

3 tests ont été faits pour chacune des distances.

Les écarts entre les expériences et les différentes méthodes de calculs sont :

- Entre 27% et 35% pour le modèle de Wang
- Entre 4% et 8,2% pour le modèle FTP-Janssens
- Entre 1,8% et 6,5% pour le modèle FTP avec détermination des paramètres par essai



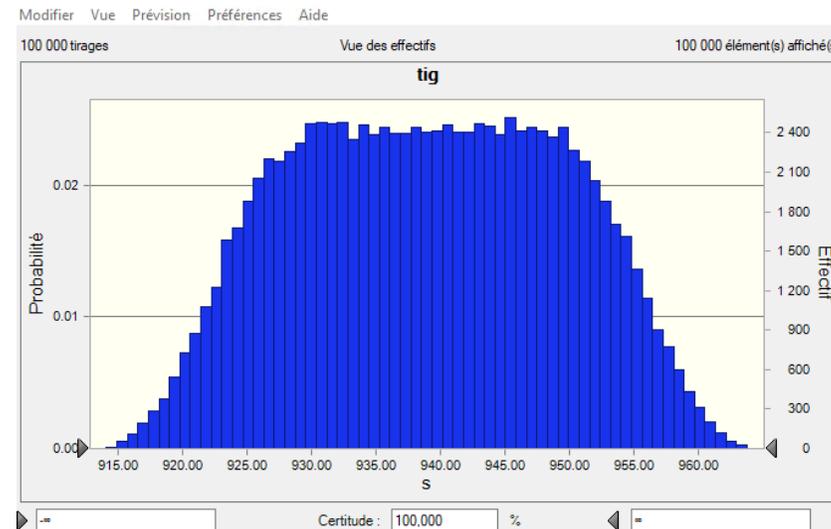
Pourquoi de tels écarts ?

A l'aide de l'outil Cristal Ball, analyse de sensibilité sur l'équation de Wang

$$\varepsilon \frac{r}{z+1} t_{ig}^{z+1} - 0,67 \dot{q}_{cr}'' t_{ig} = \left((1 - m_f)(T_{ig} - T_a) + m_f(373 - T_a) \frac{C_{pw}}{C_{ps}} + m_f \frac{L_v}{C_{ps}} \right) \sqrt{\rho k_s C_p t_{ig}}$$

Dans la littérature, pour les paramètres nécessaires au calcul :

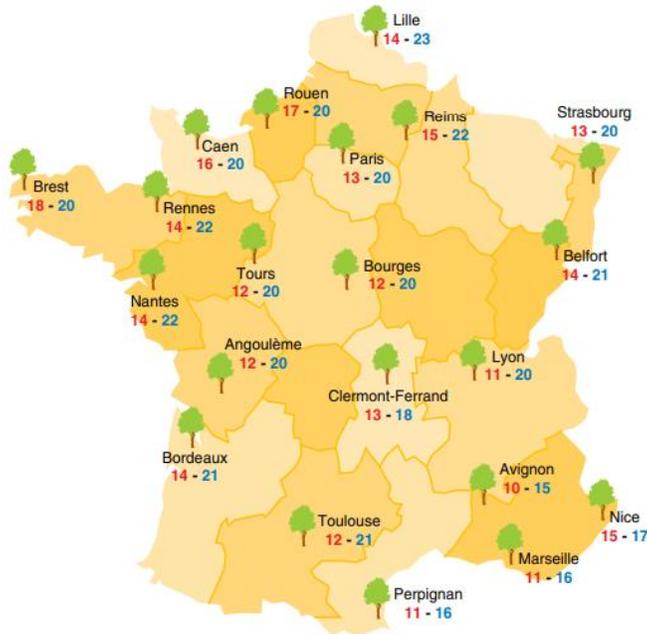
- 0,88 < ε < 0,93 [1-2-3]
- 602 < T_{ig} < 655 K [1-2]
- 0,23 < $\rho k_s C_p$ < 0,25 kW².s.m⁻⁴K⁻²



$$915s < t_{ig} < 964s$$

1. Janssens, M.L., "Improved method for analyzing ignition data from the cone calorimeter in the vertical orientation.", Fire Safety Science, 7, 803-814, 2003, <http://dx.doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.7-803>
2. Li, Y., "Measurement of the ignition temperature of wood"
3. Lopez, G., "Determination of the emissivity of wood for inspection by infrared thermography", J Nondestruct Eval, 32, 172-176, 2013 <https://doi.org/10.1007/s10921-013-0170-3>
4. Janssens M., "A thermal Model for Piloted Ignition of Wood Including Variable Thermophysical Properties", Proceedings of the 3rd International Symposium on Fire Safety Science, Elsevier Applied Science, New York, pp. 167-176, 1991, <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.3-167>

Taux d'humidité du bois selon les saisons



Compris entre 10% et 20% en moyenne

Objectif : trouver une corrélation pour avoir le délai d'inflammation en utilisant le FTP quelque soit le taux d'humidité

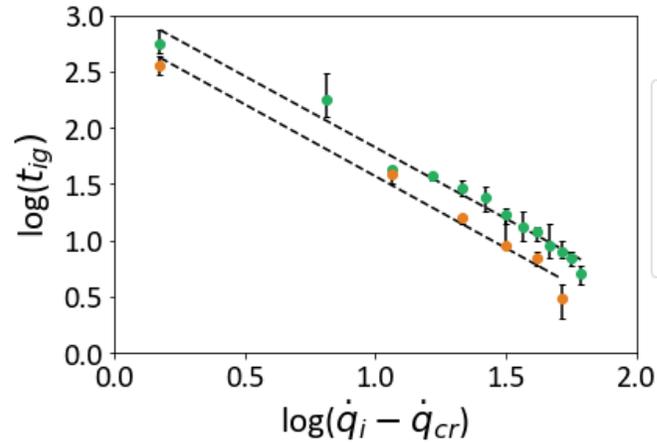
↳ Réalisation d'essais sur du bois à 0% d'humidité

↳ Obtention des paramètres n_{dry} et $FTP_{cr,dry}$

↳ En utilisant la relation de Moghtaderi et en l'introduisant dans la formule du FTP, il vient :

$$n_{dry} = n_{wet} \text{ et } FTP_{cr,wet} = FTP_{cr,dry} * (1 + 0.035m_f)^2$$

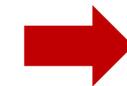
Paramètres du FTP



$$\text{---} \log(t_{ig}) = -1.266 \cdot \log(\dot{q}_i - \dot{q}_{cr}) + 3.092$$

$$\text{---} \log(t_{ig}) = -1.2774 \cdot \log(\dot{q}_i - \dot{q}_{cr}) + 2.8465$$

● 10%
● 0%



Paramètre	Valeur expérimentale, $m_f = 10\%$	Valeur calculée utilisant $m_f = 0\%$	Ecart relatif (%)
n	1.266	1.774	0.90
FTP_{cr}	$10^{3.092} \approx 1236$	1279	3.48

Délai d'inflammation

Distance (mm)	25	47	92	130
$n = 1.266$ $FTP_{cr} = 10^{3.092}$	684	755	924	1056
$n = 1.277$ $FTP_{cr} = 10^{2.8465}$	684	756	925	1056
Ecart relatif (%)	0	0,13	0,11	0

$$n_{wet} = n_{dry}$$

$$FTP_{cr,wet} = FTP_{cr,dry} * (1 + 0.035m_f)^2$$

$$FTP = \int_0^{t_{ex}} (\dot{q}_i'' - \dot{q}_{cr}'')^{n*} dt$$

2 types de foyers : primaires/secondaires

Le flux reçu par la façade peut s'écrire sous la forme $q_{rad}'' = rt^z$

Comparaison de 2 modèles : celui développé par Wang H.H. et celui développé par Smith & Green (FTP)

De manière générale, écarts bien plus faibles pour le modèle du FTP

Merci
Des questions ?