



**IMT Mines Alès**  
École Mines-Télécom



**École Doctorale**  
Sciences Chimiques Balard



INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



# 25<sup>ÈMES</sup> JOURNÉES DU GDR FEUX 07/12/2018

**C2MA**

*Centre des Matériaux des Mines d'Alès*





C2MA

Centre des Matériaux des Mines d'Alès

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET ANALYTIQUE DE L'INFLAMMATION DE CÂBLES ÉLECTRIQUES



**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



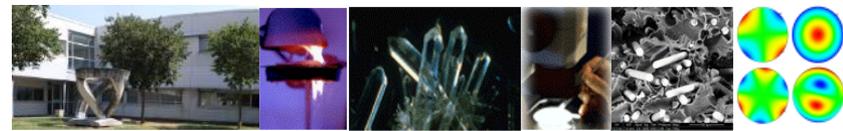
IMT Mines Alès  
École Mines-Télécom



École Doctorale  
Sciences Chimiques Balard

ROMAIN MEINIER  
LAURENT FERRY / RODOLPHE SONNIER  
PASCAL ZAVALETA / SYLVAIN SUARD

# 25<sup>ÈMES</sup> JOURNÉES DU GDR FEUX



C2MA

Centre des Matériaux des Mines d'Alès

## 1. INTRODUCTION

## 2. MODÈLE D'INFLAMMATION

## 3. ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DU TTI

- Campagne au cône calorimètre
- Application du modèle

## 4. LIMITES ET CORRECTION DU MODÈLE

- Origine de l'écart
- Photogrammétrie du charbonnement

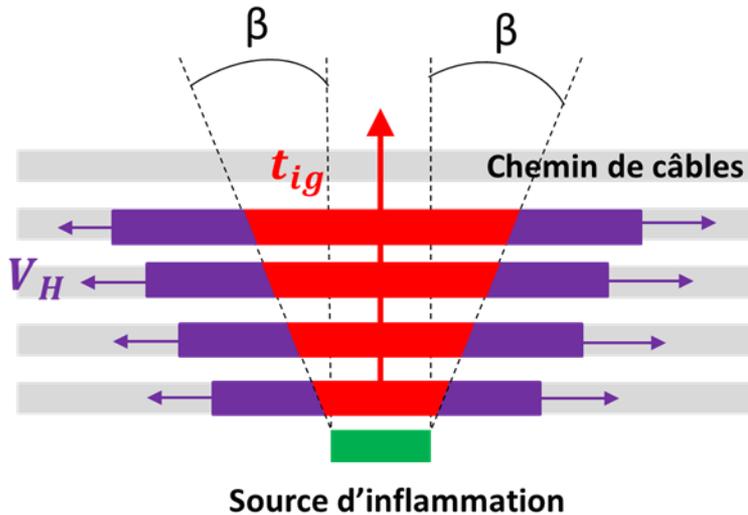
## 5. CONCLUSION





## Contexte des travaux de thèse

- ▶ Présence de milliers de kilomètres de chemin de câbles électriques dans les installations nucléaires
  - ▶ 70 incendies impliquant des chemins de câbles (fin des années 80 à 2014)
    - Incendie dans la centrale nucléaire de Browns Ferry en 1975 (Alabama)
  - ▶ Câbles électriques : Risque pour la sûreté des installations nucléaires
  - ▶ Nécessité de développer un modèle simplifié permettant de prédire le développement de l'incendie
- *Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), OECD FIRE Database (OECD FIRE DB 2010:1), Nuclear Energy Agency (NEA), 2011.*
  - *NRC, U. S. Cable Fire at Browns Ferry Nuclear Power Station. NRC Bulletin BL-75-04, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, March, 1975.*



## Objectif

Proposer et valider des modèles simplifiés de propagation du feu sur des chemins de câbles horizontaux

- ▶ Des études préalables menés à l'IRSN démontrent que ce modèle est dépendant :
  - Du délai d'inflammation  $t_{ig}$
  - De la vitesse de propagation horizontale  $V_H$

$t_{ig}$  and  $V_H$   
(data, laws)

FLASH-CAT,  
SYLVIA, ISIS

$\dot{Q}(t)$

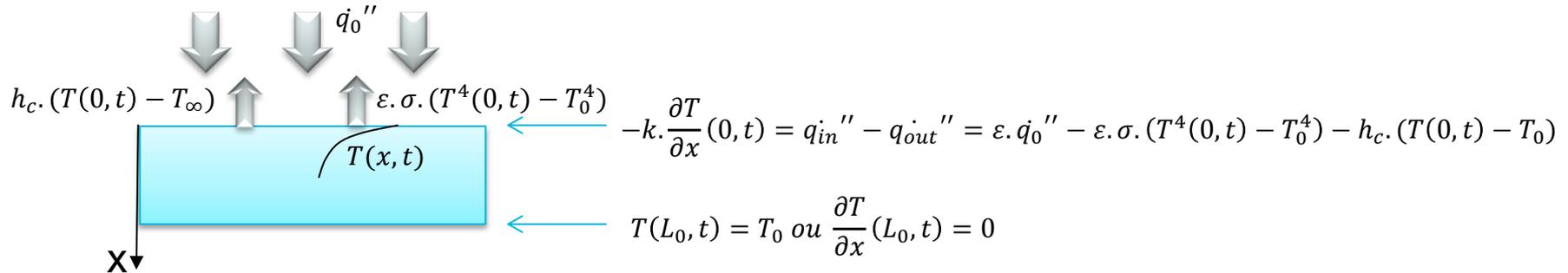


## Démarche

- ▶ Étude du modèle d'inflammation à petite échelle
  - 1<sup>ère</sup> année au C2MA (IMT Mines Alès)
  - Caractérisation sous cône calorimètre
  - Étude des phénomènes liés aux matériaux
  
- ▶ Étude des modèles d'inflammation et de propagation à échelle intermédiaire
  - 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> années à l'IRSN
  - Caractérisation de l'inflammation et de la propagation sur un chemin de câble réel
  - Dispositif CISCCO (*Cable Ignition and Spreading under Controlled Conditions*)

### Modélisation analytique du temps d'ignition

#### Description du modèle



#### Résolution

- ▶ Thermiquement fin : En  $x = 0$  avec  $T(L_0, t) \neq T_0$

$$t_{ign} = \rho \cdot C_p \cdot L_0 \cdot \frac{T_{ign} - T_0}{q_{in}'' - q_{out}''}$$

$$\frac{1}{t_{ign}} = \left[ \frac{\epsilon}{\rho \cdot C_p \cdot L_0 \cdot (T_{ign} - T_0)} \right] \cdot q_0'' - \left[ \frac{h_c \cdot (T_{ign} - T_0) + \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{ign}^4}{\rho \cdot C_p \cdot L_0 \cdot (T_{ign} - T_0)} \right]$$

- ▶ Thermiquement épais : En  $x = 0$  avec  $T(L_0, t) = T_0$

$$t_{ign} = \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot C_p \cdot k \cdot \frac{(T_{ign} - T_0)^2}{(q_{in}'' - q_{out}'')^2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{t_{ign}}} = \left[ \frac{\epsilon}{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \rho \cdot C_p \cdot k \cdot (T_{ign} - T_0)} \right] \cdot q_0'' - \left[ \frac{h_c \cdot (T_{ign} - T_0) + \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{ign}^4}{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \rho \cdot C_p \cdot k \cdot (T_{ign} - T_0)} \right]$$

B. T. Rhodes and J. G. Quintiere, "Burning rate and flame heat flux for PMMA in a cone calorimeter," *Fire Saf. J.*, vol. 26, no. 3, pp. 221–240, 1996.

### 4 câbles électriques étudiés

Gaine externe	Câble A	Câble B	Câble C	Câble D
Composition	PE/EVA + ATH	PE/EVA + ATH	PVC	PVC
$D_{\text{ext}}$	12 mm	21 mm	14 mm	28 mm
Épaisseur	2,5 mm	2 mm	2 mm	2 mm



# EVALUATION EXPÉRIMENTALE DU TTI

## Campagne d'essai au cône calorimètre

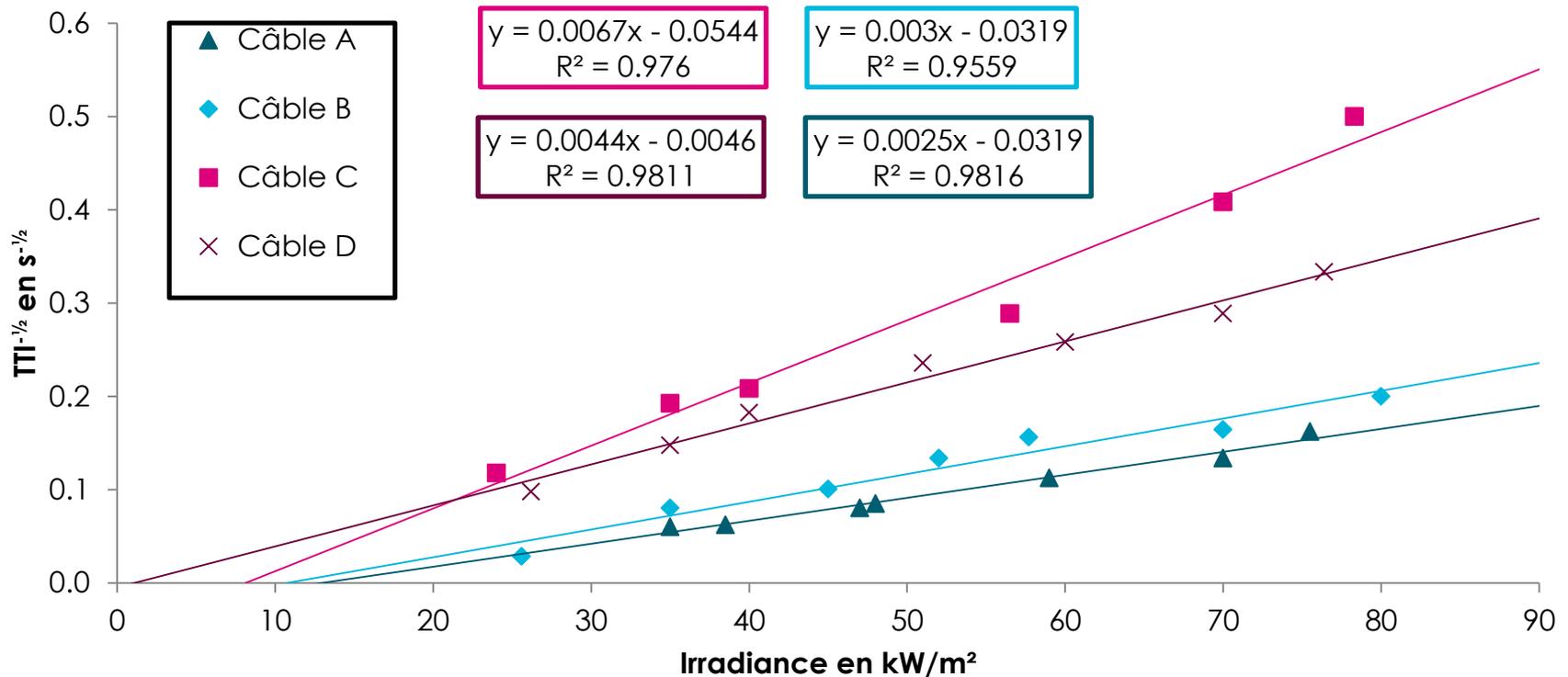
### Procédure

- ▶ Campagne d'essais réalisée au cône calorimètre
- ▶ Mise en place de sections de câbles de 100 mm de longueur
  - Inspirée du programme CHRISTIFIRE
  - Support du cône calorimètre rempli au maximum
  - Retrait de la grille de protection



- K. McGrattan, A. Lock, N. Marsh, M. Nyden, S. Bareham, and M. Price, *Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire (CHRISTIFIRE), Phase 1: Horizontal Trays*, vol. 1, no. July. 2012.

### Résultats expérimentaux



► Comportement thermiquement épais des 4 câbles

$$-\frac{1}{\sqrt{t_{ign}}} = A \cdot \dot{q}_0'' - B$$

### Relation utilisée

$$\frac{1}{\sqrt{t_{ign}}} = \left[ \frac{\varepsilon}{\sqrt{\frac{2}{3} \cdot \rho \cdot C_p \cdot k \cdot (T_{ign} - T_0)}} \right] \cdot \dot{q}_0'' - \left[ \frac{h_c \cdot (T_{ign} - T_0) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{ign}^4}{\sqrt{\frac{2}{3} \cdot \rho \cdot C_p \cdot k \cdot (T_{ign} - T_0)}} \right]$$

- ▶ 1 réponse :  $t_{ign}$
- ▶ 5 paramètres issus du matériau
  - 3 paramètres thermophysiques
  - Température d'inflammation
  - Coefficient d'émissivité
- ▶ 3 paramètres issus de l'essai
  - Flux externe incident
  - Température ambiante
  - Coefficient de convection

### Hypothèse :

Seule la gaine externe contribue à l'inflammation

- ▶ Première couche du câble sollicitée thermiquement
- ▶ Comportement thermiquement épais des câbles

### Paramètres issus du matériau

Paramètres thermophysiques de la gaine externe mesurés à température ambiante

- ▶ Masse volumique  $\rho$ 
  - Mesurée au pycnomètre à hélium
- ▶ Capacité calorifique  $C_p$ 
  - Mesurée au *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)
- ▶ Diffusivité thermique  $D$ 
  - Mise en forme en plaque par thermopresse
  - Mesurée au *Xenon-Flash Apparatus* (XFA)
- ▶ Conductivité thermique  $k$ 
  - $k = \rho \times C_p \times D$



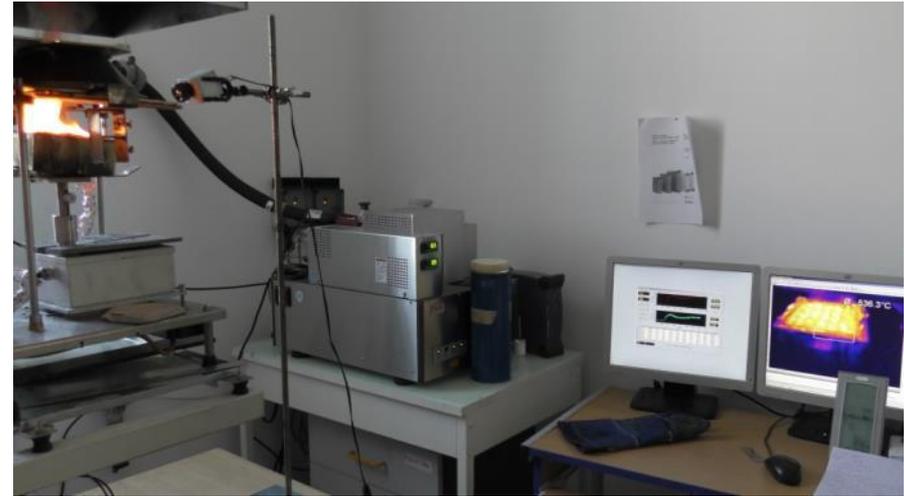
## Application du modèle

### Paramètres issus du matériau

- ▶ Température d'inflammation
  - Mesurée par caméra infrarouge
- ▶ Coefficient d'émissivité
  - Issu de la littérature
  - $\varepsilon = 0,95$

### Paramètres issus de l'essai

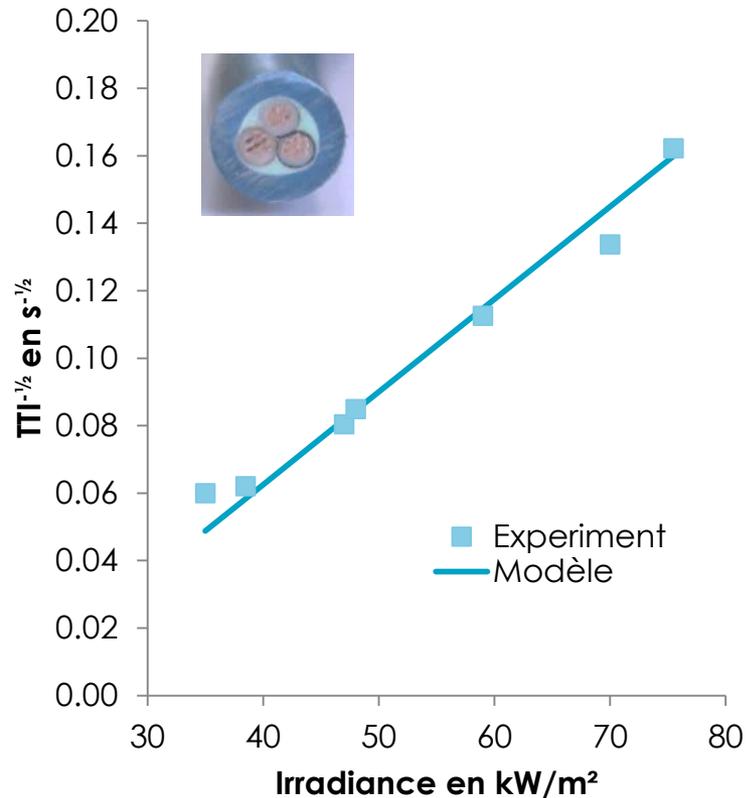
- ▶ Température ambiante
  - Mesurée lors de l'essai par un thermocouple
- ▶ Coefficient de convection
  - Issu de la littérature
  - $h_c = 10 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$



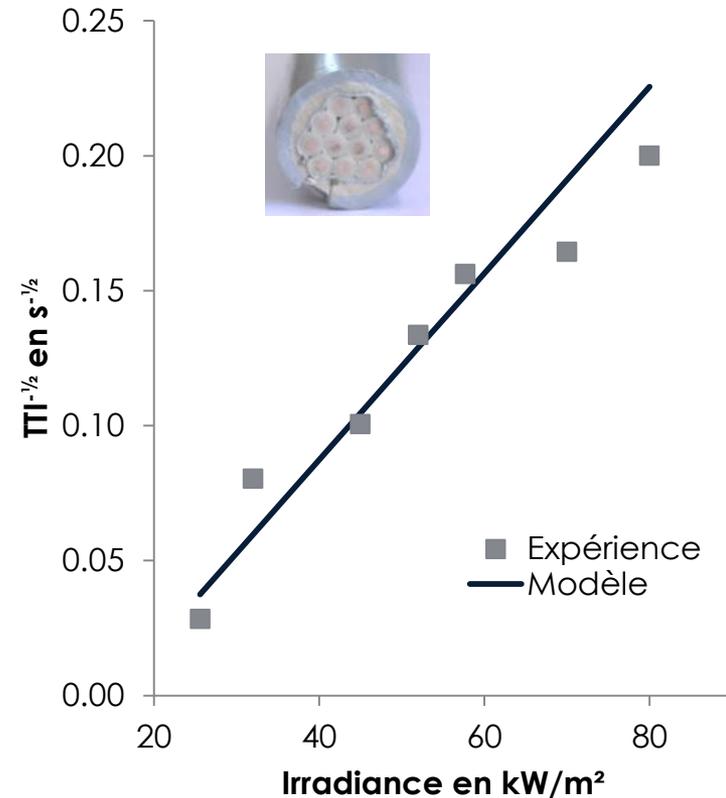
# EVALUATION EXPÉRIMENTALE DU TTI

Application du modèle

## Câble A (PE/EVA/ATH)



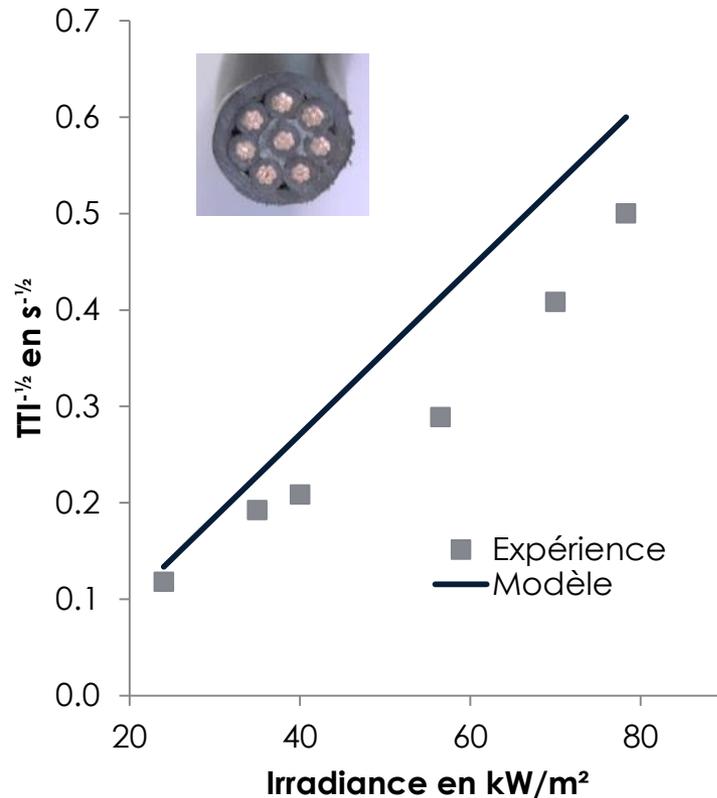
## Câble B (PE/EVA/ATH)



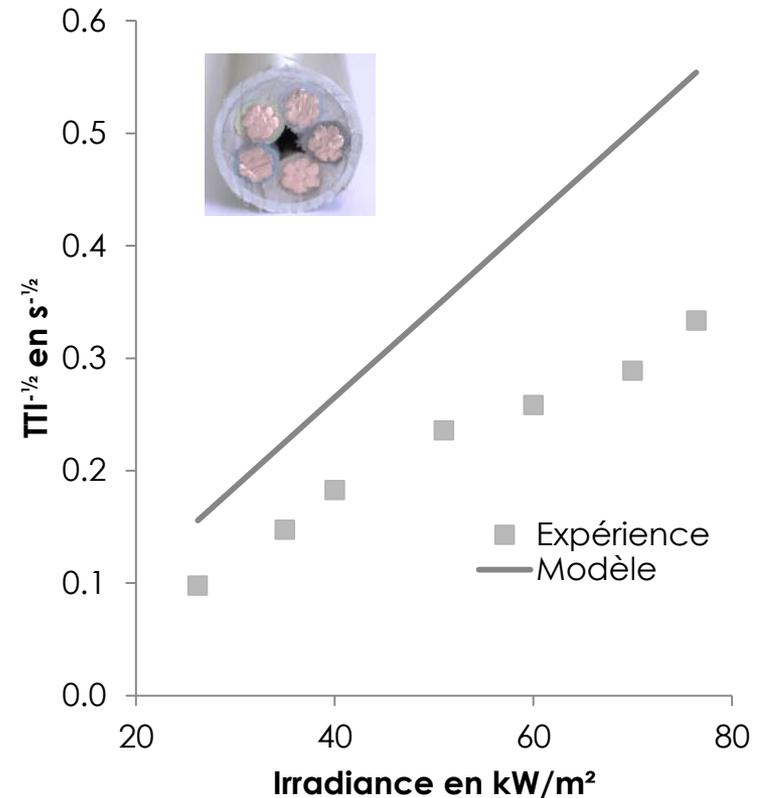
# EVALUATION EXPÉRIMENTALE DU TTI

Application du modèle

## Câble C (PVC)



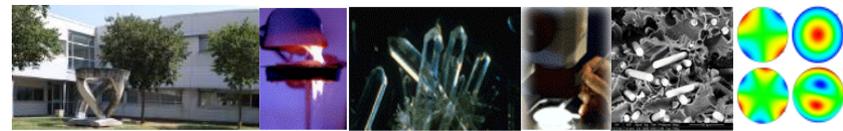
## Câble D (PVC)



## Conclusion

- ▶ **Bonne correspondance** entre le modèle de Rhodes et Quintiere et les points expérimentaux des câbles avec une gaine externe en PE/EVA/ATH
  - Malgré l'hypothèse d'un élément plan semi-infini
  - R. Meinier, R. Sonnier, P. Zavaleta, S. Suard, and L. Ferry, "Fire behavior of halogen-free flame retardant electrical cables with the cone calorimeter," *J. Hazard. Mater.*, vol. 342, pp. 306–316, 2018.
  
- ▶ Cependant **ce résultat ne se vérifie pas** sur les câbles avec une gaine externe en PVC
  - Quelle en est la cause ?

# 25<sup>ÈMES</sup> JOURNÉES DU GDR FEUX



C2MA

Centre des Matériaux des Mines d'Alès

## 1. INTRODUCTION

## 2. MODÈLE D'INFLAMMATION

## 3. ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DU TTI

- Campagne au cône calorimètre
- Application du modèle

## 4. LIMITES ET CORRECTION DU MODÈLE

- Origine de l'écart
- Photogrammétrie du charbonnement

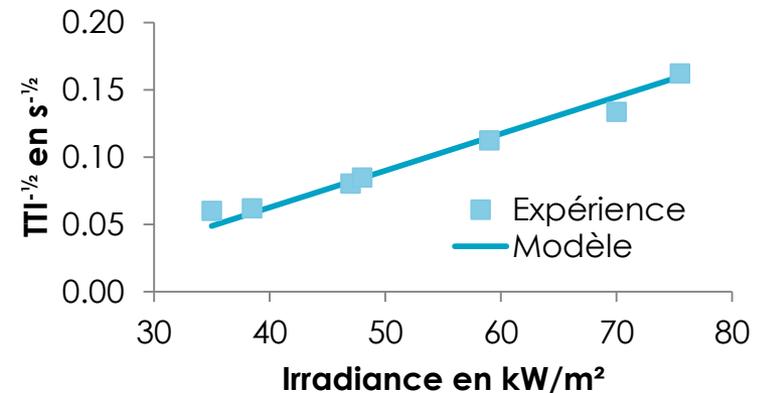
## 5. CONCLUSION



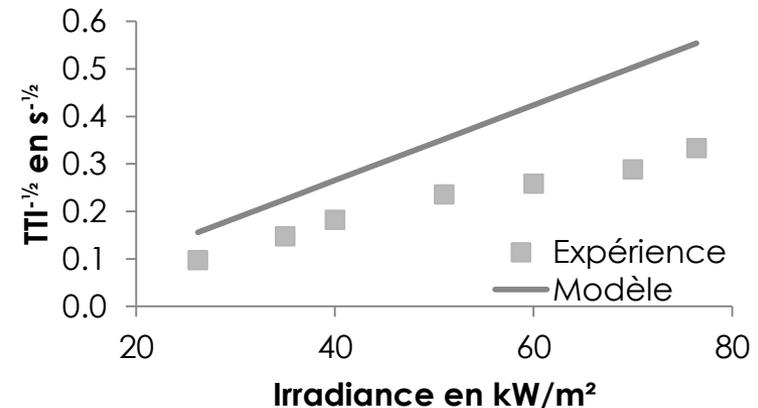
### Différence majeure entre câble en PE/EVA/ATH et en PVC

- ▶ Effet de la géométrie du câble (différent du système plan) ?
- ▶ Rôle des couches internes du câble (isolant et cuivre) dans les transferts thermiques ?
- ▶ Effet du charbonnement (Char) ?

#### Câble A (PE/EVA/ATH)



#### Câble D (PVC)



# LIMITES ET CORRECTION DU MODÈLE

Effet du cuivre et du diamètre externe

## Influence du cuivre sur le TTI

- ▶ Câble D, le plus problématique

	Avec Cu	Sans Cu	Modèle
25 kW/m <sup>2</sup>	171 s	196 s	47 s
50 kW/m <sup>2</sup>	29 s	33 s	8 s



- ▶ Influence négligeable : ordre de grandeur de l'incertitude

## Influence de la géométrie sur le TTI

- ▶ Câble A avec PE/EVA/ATH

	35 kW/m <sup>2</sup>	50 kW/m <sup>2</sup>	65 kW/m <sup>2</sup>	75 kW/m <sup>2</sup>
D = 12 mm	359 s	109 s	59 s	42 s
D = 38 mm	212 s	80 s	51 s	39 s
Modèle	420 s	123 s	58 s	48 s



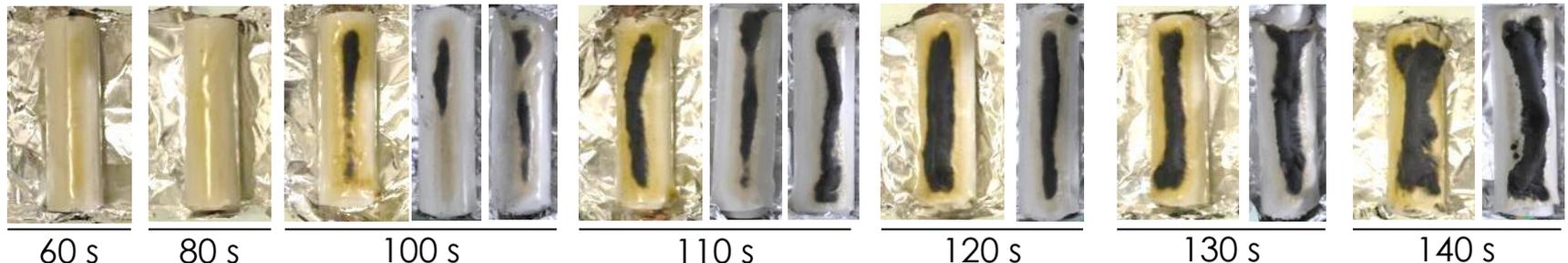
- ▶ Effet de la géométrie observée qui réduit le TTI
  - Effet contraire à celui observé sur le câble PVC (↗ TTI)
  - Investigation supplémentaire nécessaire par la suite

### Influence du Char

- ▶ Présent sur les câbles avec du PVC
- ▶ Charbonnement intumescent
- ▶ **Apparition avant l'inflammation**



- ▶ Étude de l'évolution du Char dans le temps  
- Irradiance à 25 kW/m<sup>2</sup>

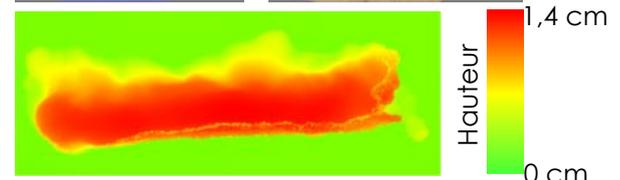
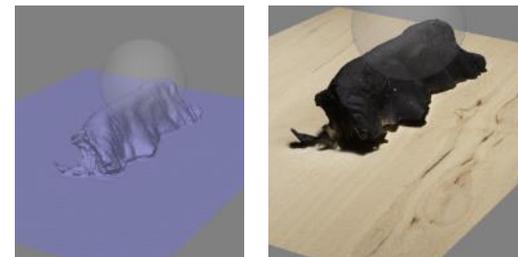
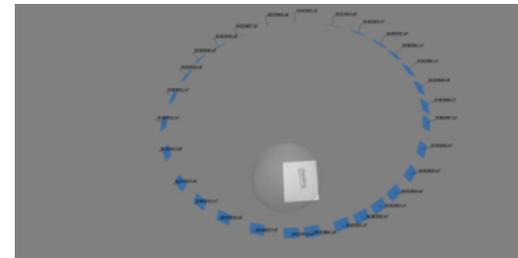


$t_{ign}$

### Etude du volume du Char intumescent

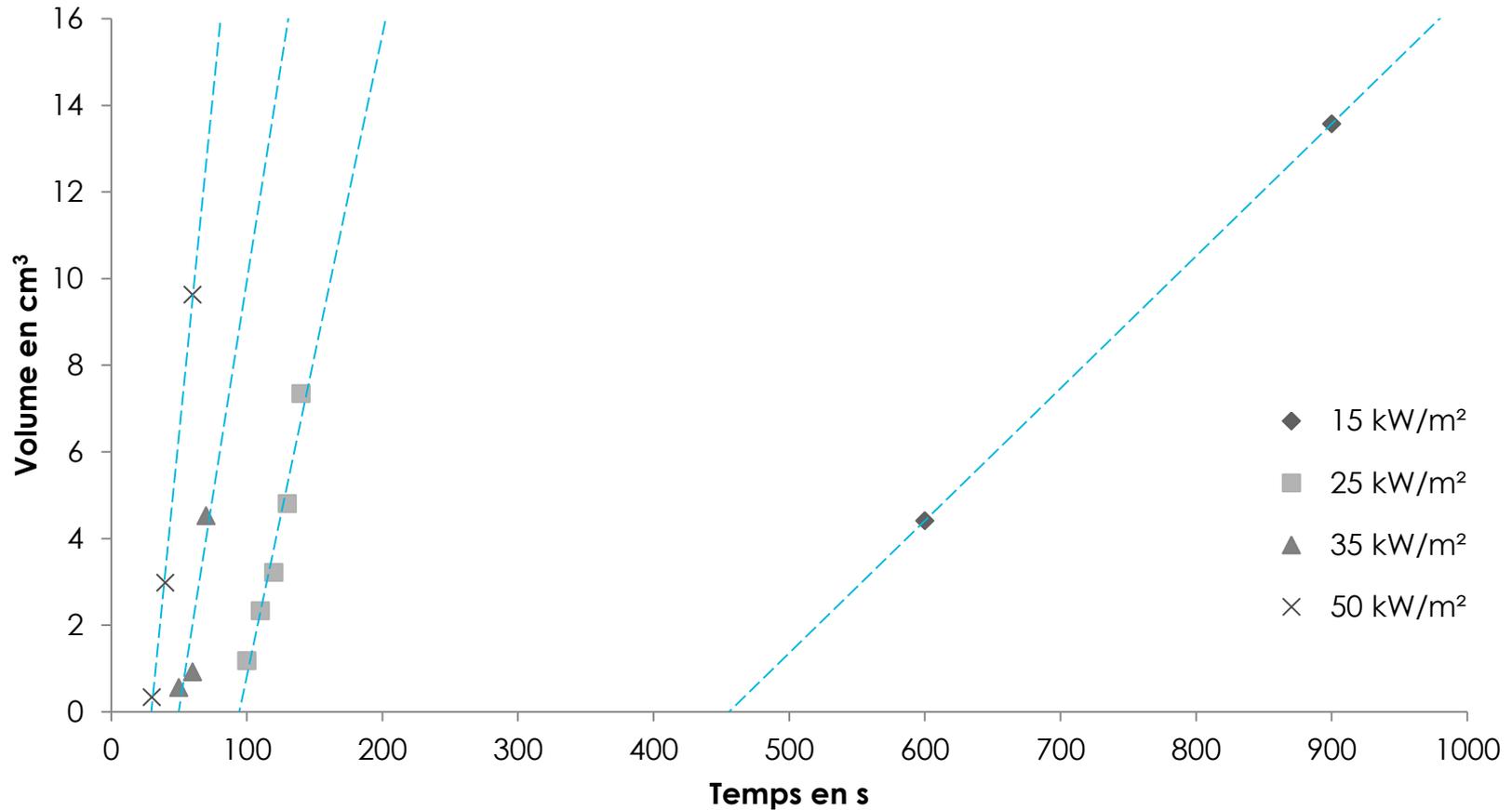
#### Photogrammétrie

- ▶ Extraction du Char de l'échantillon
- ▶ Prises des vues par un appareil photo
  - Char étudié sur un plateau tournant
  - Source de lumière directionnelle placée sur l'axe de rotation
  - Variation de 10° maximum entre les prises de vues pour le recouvrement
- ▶ Construction d'un nuage de points puis d'un maillage en 3D
  - Création de la texture
- ▶ Exploitation du maillage exporté



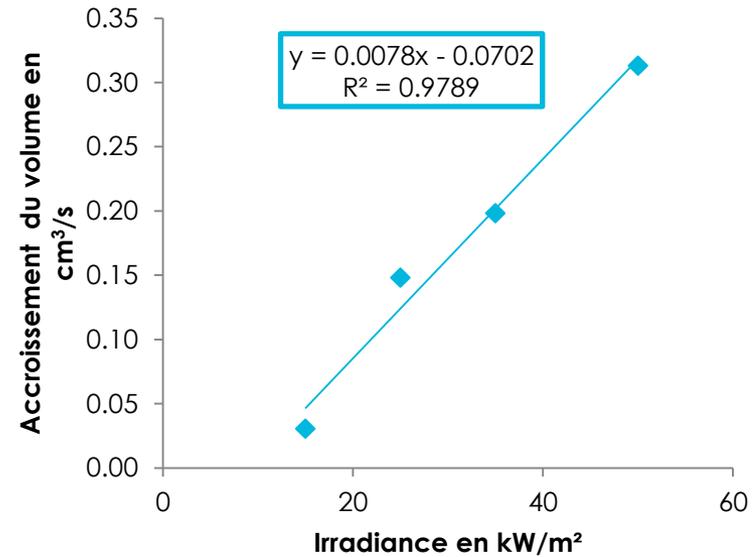
$$V_{char} = 6,9 \text{ cm}^3$$

### Série d'essais à plusieurs irradiances du câble D (PVC)

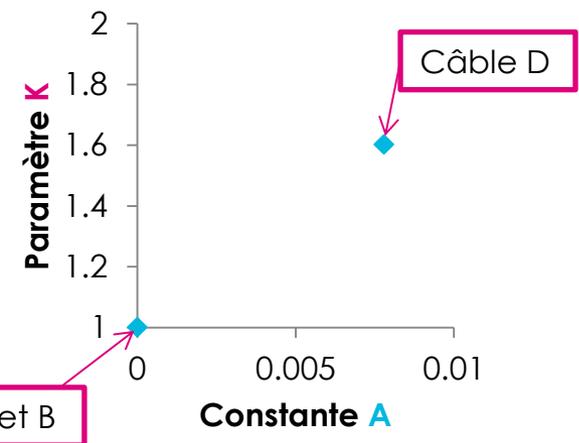


## Effet du Char

- ▶ Accroissement du volume du Char
  - Coefficients directeurs des régressions linéaires
  - Comportement linéaire avec l'irradiance
- ▶ Constante **A**
  - Pente de l'accroissement du volume
  - Caractéristique du câble et de l'effet du Char



- ▶ Proposer un paramètre correctif **K** dans la relation
  - $$\frac{1}{\sqrt{t_{ign}}} = \left[ \frac{\varepsilon}{K \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \rho \cdot C_p \cdot k \cdot (T_{ign} - T_0)} \right] \cdot q_0'' - \left[ \frac{h_c \cdot (T_{ign} - T_0) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{ign}^4}{K \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \rho \cdot C_p \cdot k \cdot (T_{ign} - T_0)} \right]$$
  - La constante **A** peut-elle servir à déterminer le paramètre **K**?



- ▶ Accord entre les temps d'ignition expérimentaux et du modèle pour des câbles non halogénés et de diamètre externe inférieure ou égale à 20 mm avec un modèle simple
- ▶ Éléments montrant le charbonnement des câbles PVC comme l'origine de l'écart entre le modèle utilisé et l'expérience
- ▶ Correction possible à partir de l'étude du volume du Char
- ▶ Mise en place d'un protocole novateur pour caractériser le Char intumescent
  - Mesure longue et à plusieurs étapes du volume formé
- ▶ D'autres câbles PVC sont à étudier pour comprendre l'évolution de la constante  $A$  et son lien avec le paramètre correctif  $K$  proposé
- ▶ Étude à venir de l'inflammation et de la propagation à échelle intermédiaire sur le dispositif CISCCO à l'IRSN



Merci pour votre attention

