



Méthodologie de validation d'une simulation incendie avec calcul de pyrolyse : approche combinée expérience-simulation à échelles croissantes



Damien Marquis

Directeurs de thèse:

Eric GUILLAUME

Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE)

CEMATE division comportement au feu

Michel PAVAGEAU

Ecole des Mines de Nantes

UMR CNRS 6144 (GEPEA)

Simulations numériques :

- Représenter la réalité à l'aide de simulation, avec un degré de raffinement adapté au besoin (besoin différent suivant l'échelle).
- Étudier (avec confiance) de nombreuses configurations en s'affranchissant d'essais à l'échelle réelle.

Cas d'application :

- Simuler un incendie à grande échelle où les parois sont combustibles. (navire, train, bâtiment...).
- **Ex: Projet EMC2 MP08 *Tenue et comportement au feu des composites***

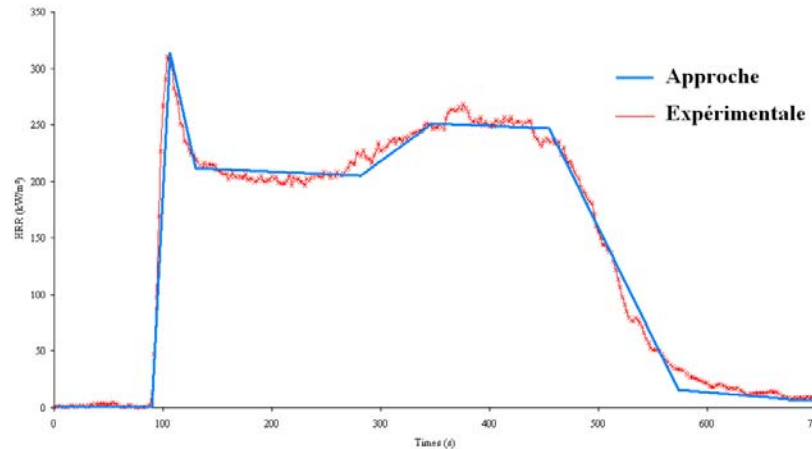


Beaucoup de scénarios

Deux approches :

- **HRR imposé** : Combustion suivant une courbe de taux de dégagement de chaleur (HRR).
- **Modèle de pyrolyse** : Combustion suivant un modèle de décomposition.

Utiliser les courbes du taux de dégagement de chaleur (HRR) obtenues au cône calorimètre.



Intérêt :

- Approche simple
- Utilisable si méconnaissance des produits présents

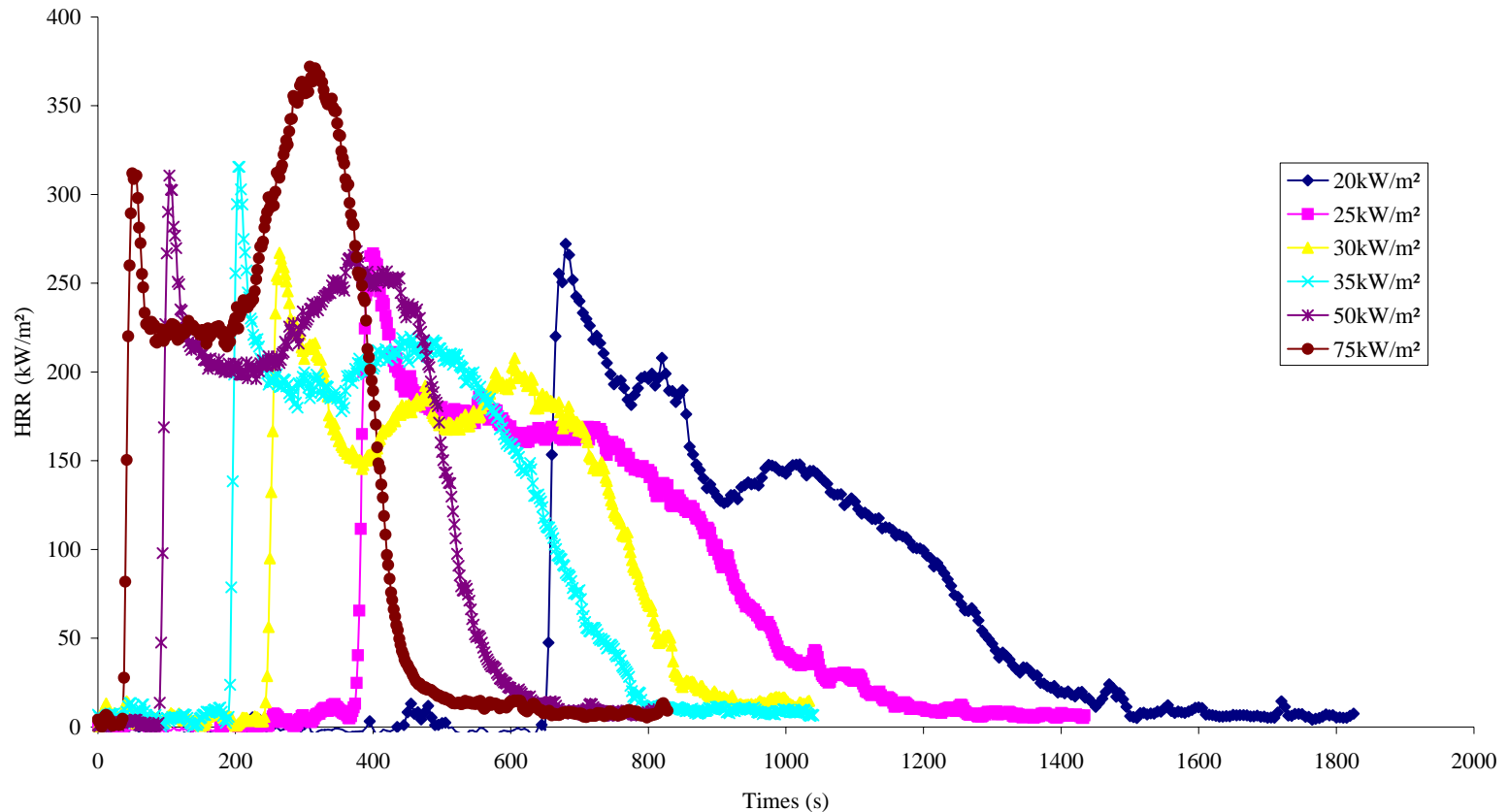
Inconvénients :

- Ne permet pas de prédire ou de reproduire fidèlement le dégagement de chaleur ainsi que la vitesse de combustion (car ne tient pas compte du niveau d'irradiance, de la concentration d'oxygène, de la vitesse de propagation, de la position de la source...)
- Risque de manque de représentativité (représente le comportement dans un scénario donné).
- Validité limitée à un essai donné

Le flux varie au cours du temps



Évolution du HRR



Question : Quelle valeur de flux utiliser pour une simulation en fonction du stade de développement ?

Alternative : Simuler la combustion par calcul de pyrolyse

➡ Définit les réactions de décomposition thermique du matériau

Détermine la quantité de **combustible** disponible pour la combustion, lors de la décomposition thermique d'un matériau (produit fini) dans des **conditions variées**

Contraintes du modèle :

- Utilisable quand les **matériaux sont connus**, caractérisés et simples;
- Utilisation d'un **modèle de décomposition thermique**;
- Beaucoup de **paramètres à caractériser** : utilisation d'un **algorithme génétique**;
- Approche **complexe et coûteuse** (temps de calcul plus long que par HRR imposé);
- L'effet des paramètres « produit » difficile à appréhender : joints, montage, fixations...

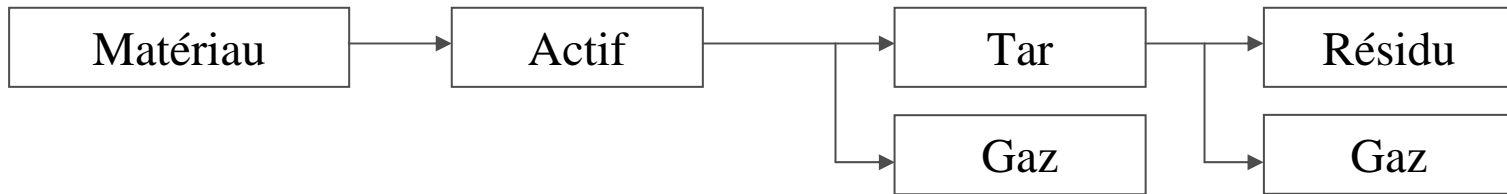
➡ Validation échelle par échelle

Apports de cette méthode :

- Propriétés fondamentales du produit étudié, indépendantes de la mise en œuvre et du scénario
- Reproduction plus fidèle ou possibilité de prévision
- Étudier l'influence de certains paramètres sur la vitesse de combustion
- Peut éviter des essais grandeurs

- Regarder la **décomposition** du matériau
- Définir un **modèle de décomposition** et le nombre de réactions à partir d'analyses thermogravimétriques.

Exemple



- Déterminer les **propriétés physico-chimiques intrinsèques au matériau** de façon expérimentale ou à partir de la littérature.

Propriétés

- Enthalpie de vaporisation, de réaction et de combustion
- Masse volumique des produits et sous produits
- Température d'ignition ou flux critique
- Composition exacte : analyse élémentaire
- Taux de combustion
- Fraction massique des réactifs
- Production d'espèces gazeuse
- Production de suies
- Part radiative dans le débit calorifique
- Conductivité thermique
- Capacité thermique
- Emissivité de la surface
- Déterminer les **paramètres de la réaction type Arrhenius** (A, E)
- **Vérifier et valider le modèle**

Qu'est ce que cette échelle nous apporte? A quoi sert la validation à cette échelle?

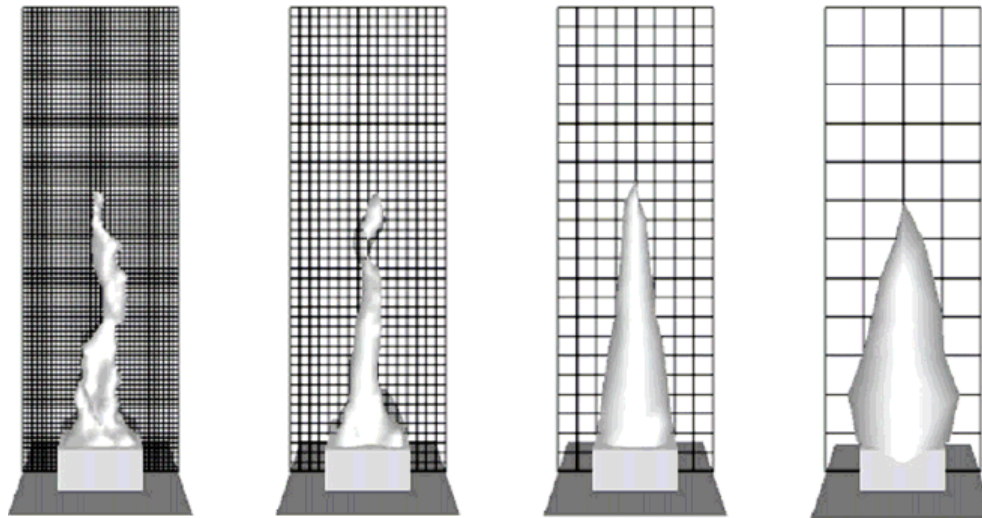


Étude de sensibilité : Influence des paramètres.

Influence du maillage

Equation du second ordre spatio-temporelle : Doubler le maillage engendre une **division par 4 de l'erreur de discrétisation**. La durée de simulation est multipliée par 16.

➔ **Compromis entre précision du modèle due au maillage et puissance de calcul.**



McGrattan, K., Floyd, J., Forney, G. et Baum, H. R. (2003). *Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model*. Fire Safety Science - 7th International Symposium. 827-838.

Validation de modèles est la **capacité d'estimer la différence entre les prévisions d'un modèle et les mesures expérimentales.**

La comparaison peut être qualitative et s'attache à des données fixes.

Une méthode plus précise consiste à retenir des points de comparaison locaux et globaux et de réaliser une analyse fonctionnelle.

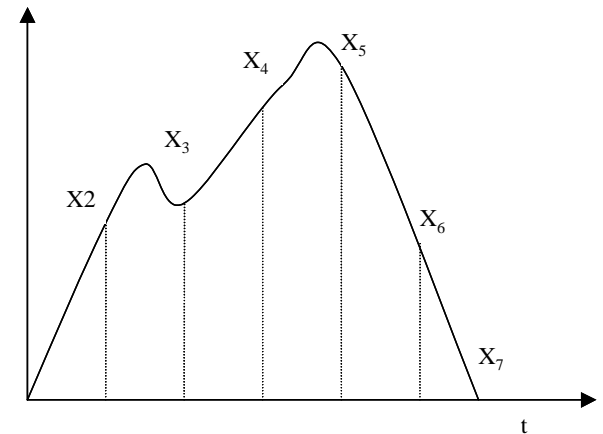
Principe de l'analyse fonctionnelle d'Hilbert (1900)

- Principe décrit dans la Norme ISO 16730 «*Fire Safety engineering- Assessment, verification and validation of calculation methods* »

Méthode basée sur les vecteurs associés aux courbes

- Définition d'un vecteur par courbe,
- Discrétisation temporelle à n dimensions

$$\vec{x}(t) = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-2}, x_{n-1}, x_n)$$



Définition des espaces géométriques

Norme du vecteur :

$$\|\vec{x}\| = \sqrt{\langle \vec{x}, \vec{x} \rangle}$$

Produit scalaire discret :

$$\langle \vec{x}, \vec{y} \rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

$$\langle \vec{x}, \vec{y} \rangle = \frac{\sum_{i=1,s}^n (x_i - x_{i-s})(y_i - y_{i-s})}{t_i - t_{i-s}}$$

$$\langle \vec{x}, \vec{y} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i + \frac{1}{n-s} \frac{\sum_{i=1,s}^n (x_i - x_{i-s})(y_i - y_{i-s})}{t_i - t_{i-s}}$$

Forme **Euclidienne**

Forme **Sécante** (courbure)

Si $s = 1$: forme d'Hellinger

Forme **Hybride** (discrétisée)

s : puissance du filtre

Deux vecteurs à comparer :

- Expérimentation $x(t)$
- Résultats du modèle $y(t)$

Deux quantités comparées :

- **Écart relatif**

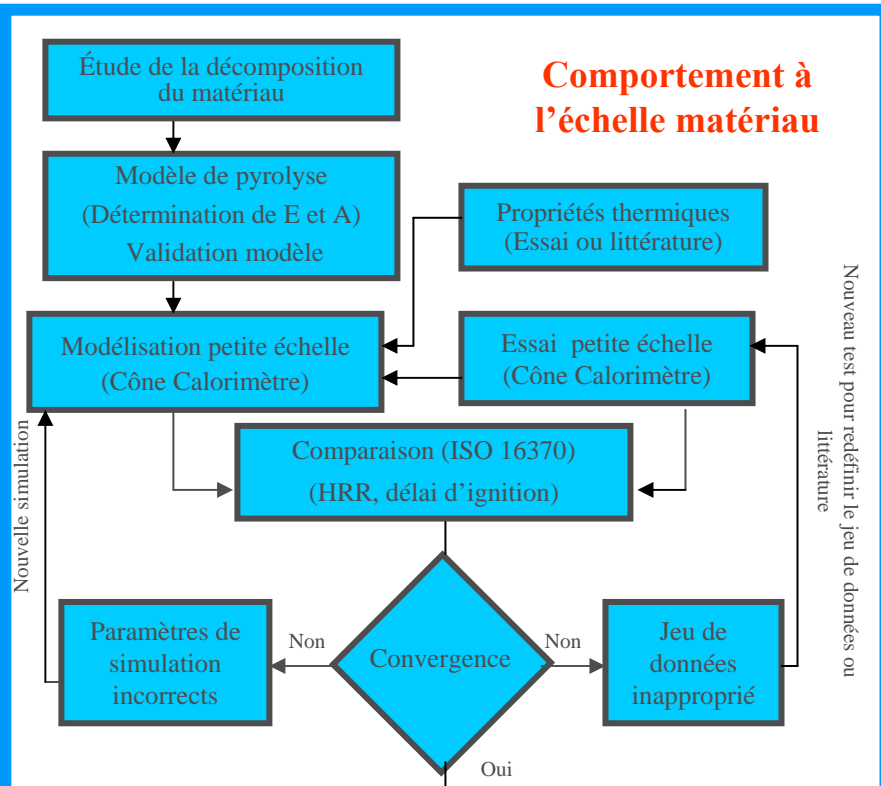
Si l'écart relatif est faible, les valeurs sont bien reproduites.

- **Cosinus de l'angle entre les vecteurs**

Si $\cos(x,y)=1$, les vecteurs sont colinéaires, donc les courbes ont la même forme.

$$rel. diff. = \frac{\|\vec{x}\| - \|\vec{y}\|}{\|\vec{x}\|}$$

$$\cos(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{\langle \vec{x}, \vec{y} \rangle}{\|\vec{x}\| \|\vec{y}\|}$$

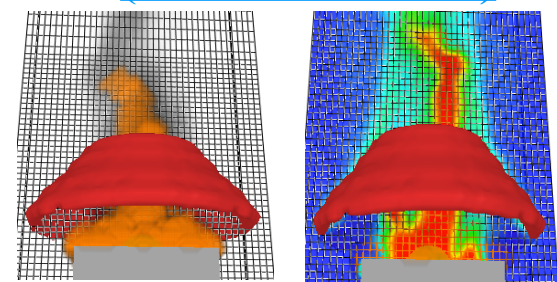


- Comment le matériau se décompose,
- Quantifie les propriétés d'ignition (température, enthalpie, ...) = données d'entrée
- Temps d'inflammation à différents flux
- Courbe de HRR à différents flux
- Modèle de décomposition et le jeu de donnée

Données d'entrée MBI
(Modèle de décomposition et propriétés d'ignition et thermique :
Température d'inflammation, enthalpie de réaction, de combustion...)



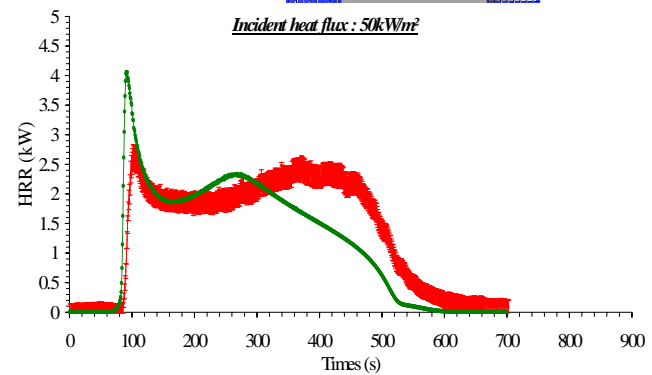
Cône calorimètre (Norme ISO 5660)



FDS 5
(96000 Mailles)

Exemple :

HRR d'une résine vinylester au cône calorimètre pour un flux incident de 50kW.m⁻²



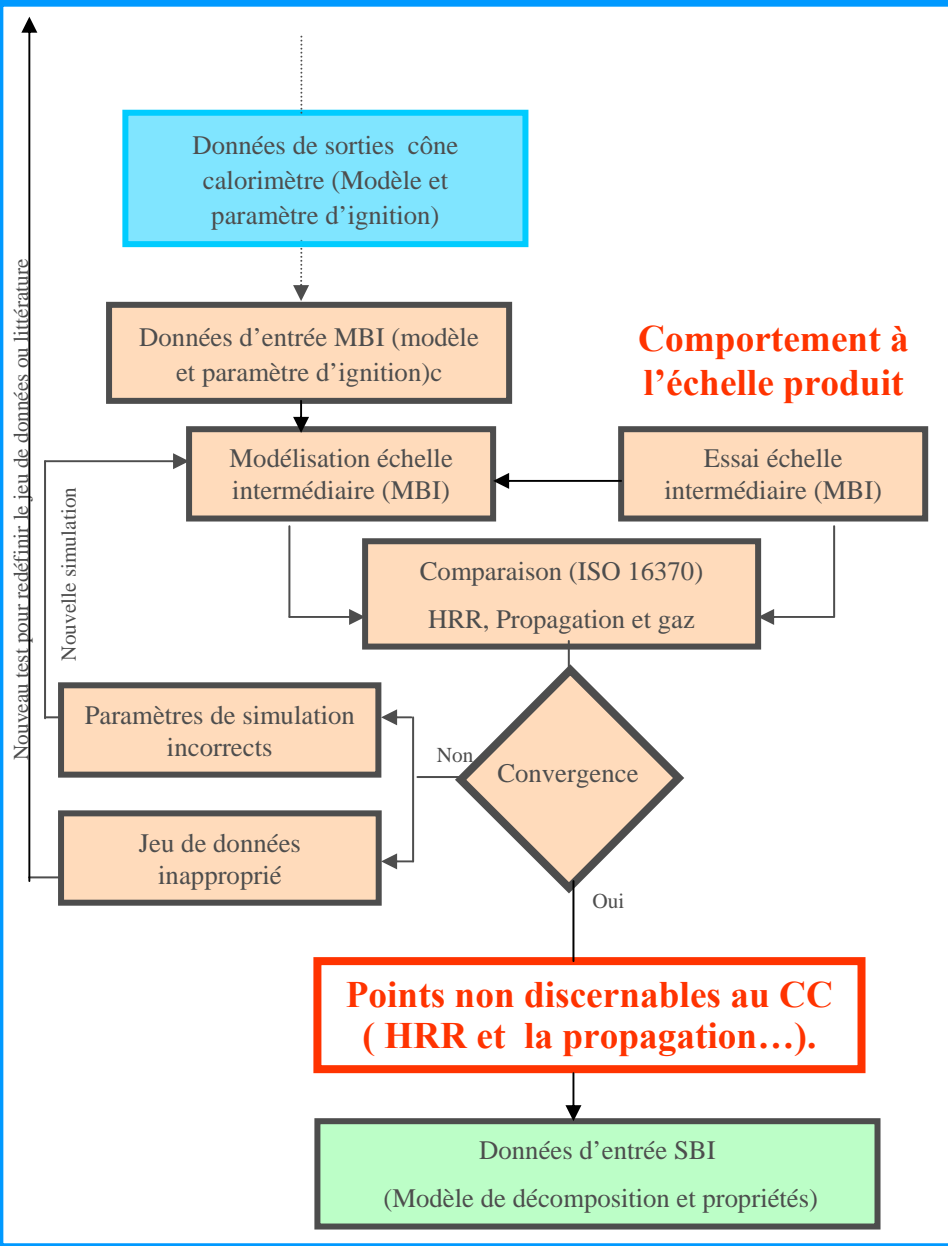
Comparaison

Norme	X	Y	σ [%]	Cos θ
Euclidienne	15.621	15.243	2.4	0.924
hybride	1.577	1.592	0.9	0.885

Euclidienne : Reproduction correcte

Hybride : (lissage et courbure) résultats bien corrélés

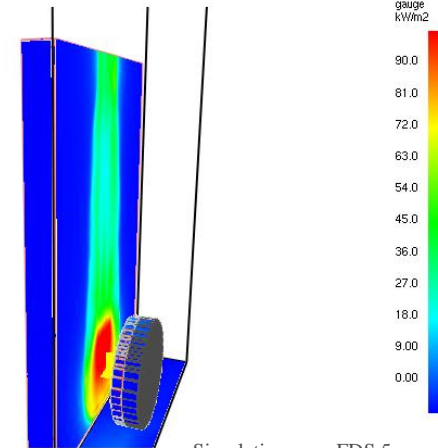
Validation satisfaisante devant incertitude expérimentale



Medium Burning Item MBI

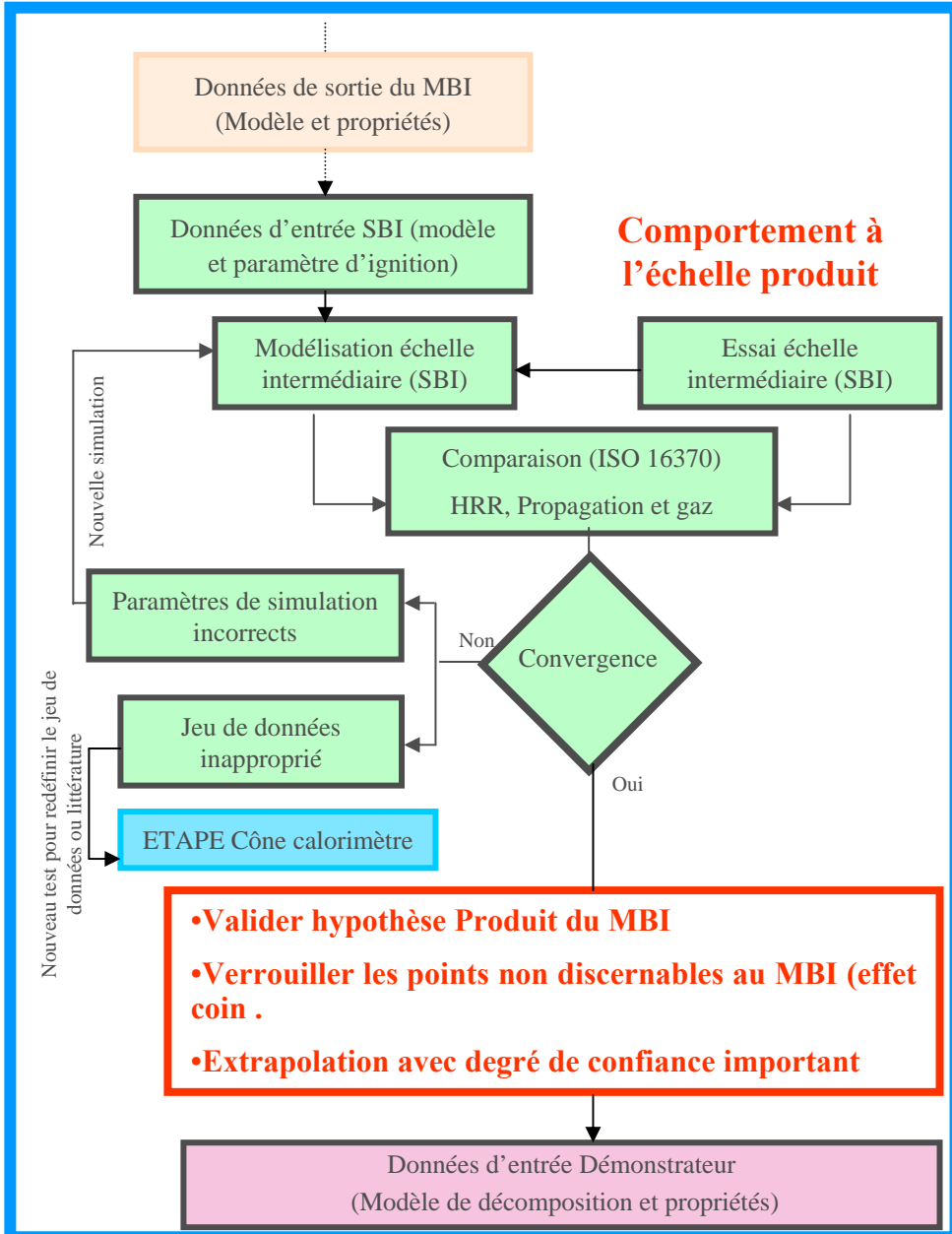
(Norme ISO 21367-2)

- Intègre le comportement « produit » et propagation flamme
- Permet de discerner des phénomènes non discernables au CC.



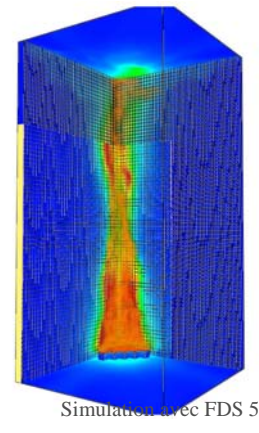
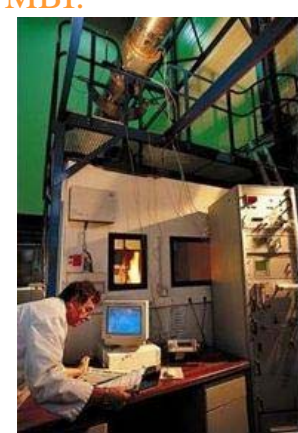
Simulation avec FDS 5

- Verrouiller les points qui ne peuvent être discerner au CC
- Valider le modèle de décomposition et le jeu de données issue du cône calorimètre à différents flux thermique (propriétés d'ignition : température d'inflammation, délai d'ignition, Enthalpie de combustion,)
- Reproduire les paramètres importants (HRR, gaz émis et propagation des flammes...)



Single Burning item (SBI) (Norme EN 13823)

- Flamme de propane de 30 kW.
- Teste les effets joints et assemblages.
- Intègre le comportement « produit » à une échelle proche de la réalité (comportement « produit » et propagation flamme).
- Permet de discerner des phénomènes non discernables au MBI.

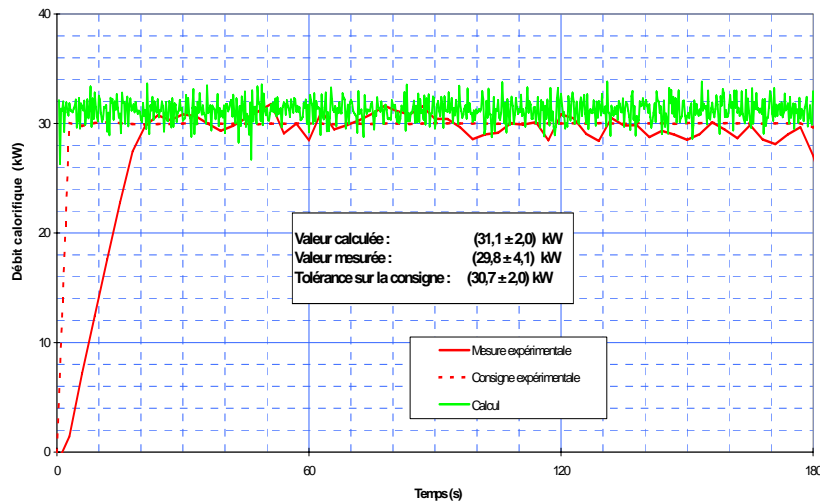


- Verrouiller les points qui ne peuvent être discernés au MBI (ex : influence de panneaux différents)
- Reproduire l'effet « coin »
- Valider les hypothèses « produit » du MBI (Propriétés d'ignition : température d'inflammation, délai d'ignition, Enthalpie de combustion, HRR, ...)
- Reproduire les paramètres importants (HRR, gaz émis et propagation des flammes...)

Validation Globale

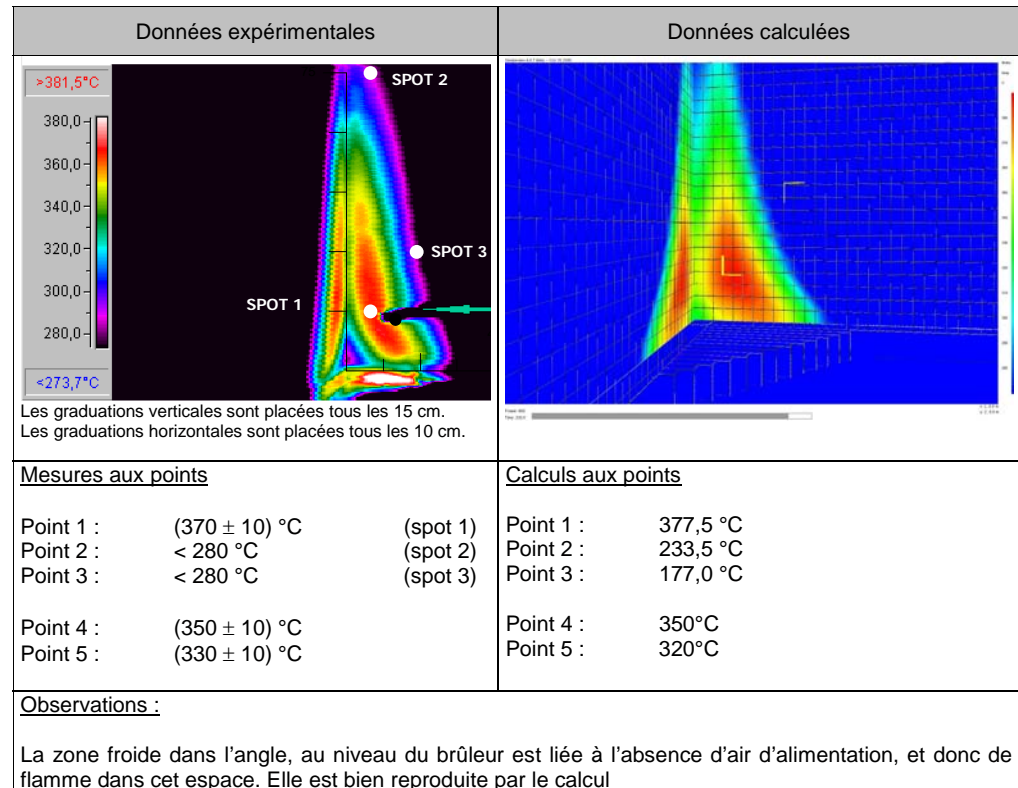
Le brûleur doit reproduire une attaque de $(30,7 \pm 2,0)$ kW.

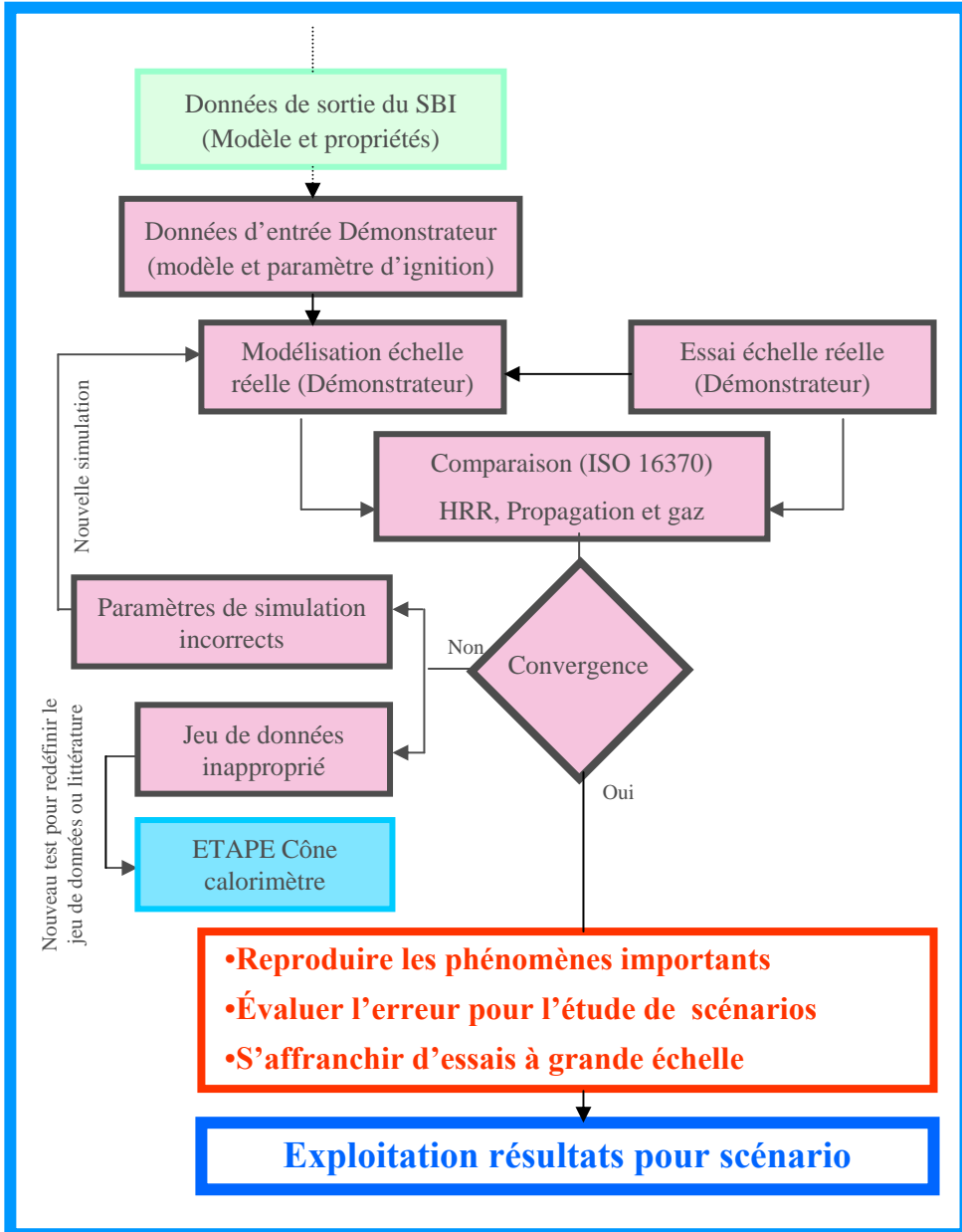
Débit calorifique total : comparaison essai / simulation



Validation locale

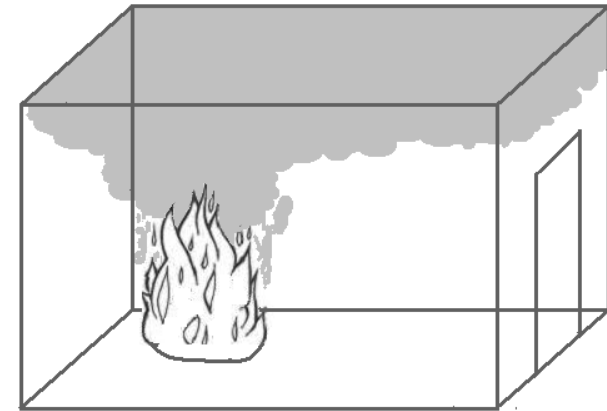
Simulation avec FDS





Démonstrateur

- L'influence de la concentration des gaz sur l'extinction, du mobilier, de l'architecture;
- Propagation ...
- Comportement du produit à échelle réelle.



➡ **Calage final du modèle de décomposition et du jeu de données** issue du SBI (Propriétés d'ignition : température d'inflammation, délai d'ignition, Enthalpie de combustion, ...)

- Reproduire expérience HRR gaz émis et propagation des flammes
- Évaluer l'erreur et extrapoler avec degré de confiance.
- Exploitation résultat pour scénario

- Approche pouvant être utilisée dans le cadre de projets d'Ingénierie en Sécurité Incendie.
- Définir les paramètres d'entrées et les paramètres de sortie recherchés.
- Valider le modèle et le jeu de donnée à différentes échelles.
- Évaluer l'erreur obtenue par la simulation à grande échelle.
- Méthodologie qui conduit à pouvoir utiliser la simulation **numérique pour l'étude un grand nombre de scénarios** (étude paramétrique) **sans avoir recours à l'expérience.**

A terme pourra t'on éviter les essais à grandes échelles?

Damien Marquis

Laboratoire National de Métrologie et d'Essais - LNE

CEMATE 672, Division Comportement au feu

Tel : 01 30 69 32 46

Fax : 01 30 69 12 34

damien.marquis@lne.fr

