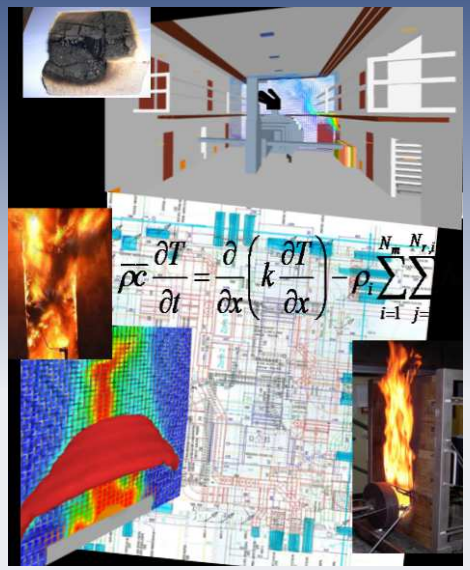


Caractérisation et modélisation multi-échelle du comportement au feu d'un composite pour son utilisation en construction navale.

Damien MARQUIS

Laboratoire National de métrologie et d'Essais

Président - Dr TROUVE A. - Associate Professor, FPE - University of Maryland (USA)
Rapporteur - Pr TORERO J. - Professeur BRE/RAE, University of Edinburgh (UK)
Rapporteur - Pr PORTERIE B. - Professeur, IUSTI - Université de Provence
Examinateur - Pr DELAUNAY D. - Directeur de Recherche, LTN - Polytech Nantes
Examinateur - Pr LOPEZ-CUESTA J.M. - Directeur du CMGD, Ecole des Mines d'Alès
Examinateur - Dr PAVAGEAU M. - HDR, Maître Assistant, GEPEA - Ecole des Mines de Nantes
Examinateur - Dr AUDOUIN L. - Directeur du LEF, IRSN - Cadarache
Examinateur - Dr CHIVAS-JOLY C. - Expert, LNE - Trappes
Invité - M. GUILLAUME E. - Expert, Coodinateur R&D, LNE - Trappes
Invité - Dr ROGAUME T. - Maître de conférence, Institut P' - Université de Poitiers

Contexte réglementaire

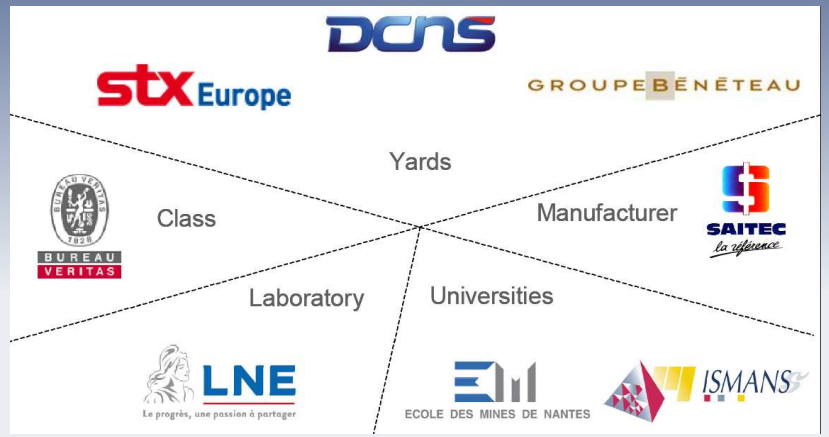
Réglementation maritime : Convention SOLAS (Safety Of Life At Sea) de l'organisation maritime international (OMI)

- Jusqu'en 1994 : obligation d'utiliser des matériaux incombustibles pour les cloisonnements des navires.
- 2002 : Nouvel amendement Convention SOLAS **Alternative design and arrangements**.

Possibilité d'utiliser des matériaux combustibles pour des cloisonnements de navires à condition que la mise en oeuvre réponde aux objectifs de sécurité incendie et aux exigences fonctionnelles.

Projet EMC2 MP08

EMC2 MP08 : Projet collaboratif français
Tenue au feu des composite.



Objectifs du projet : Développer une **démarche innovante** quant à l'utilisation des **matériaux composites** dans des domaines nouveaux.

a/ Civil application

b/ Naval application

Objectifs du travail de thèse dans MP08

Montrer que les outils existants permettent :

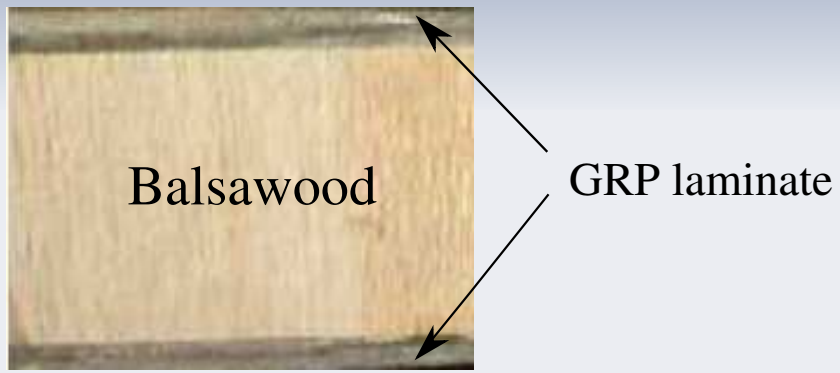
- d'étudier un **design** en **matériau léger** d'un point de vue de la **sécurité incendie**.
- d'établir le **niveau de performance** et de **sécurité** de ce design vis-à-vis d'un incendie.

Et avec quel niveau de confiance ?

$\rightsquigarrow$ Quantifier la contribution d'une structure combustible sur le développement de l'incendie à grande échelle.

Comprendre, **caractériser**, et **reproduire** l'ensemble des phénomènes physiques à l'origine du **développement d'un incendie** d'une structure d'un navire en **matériau composite**.

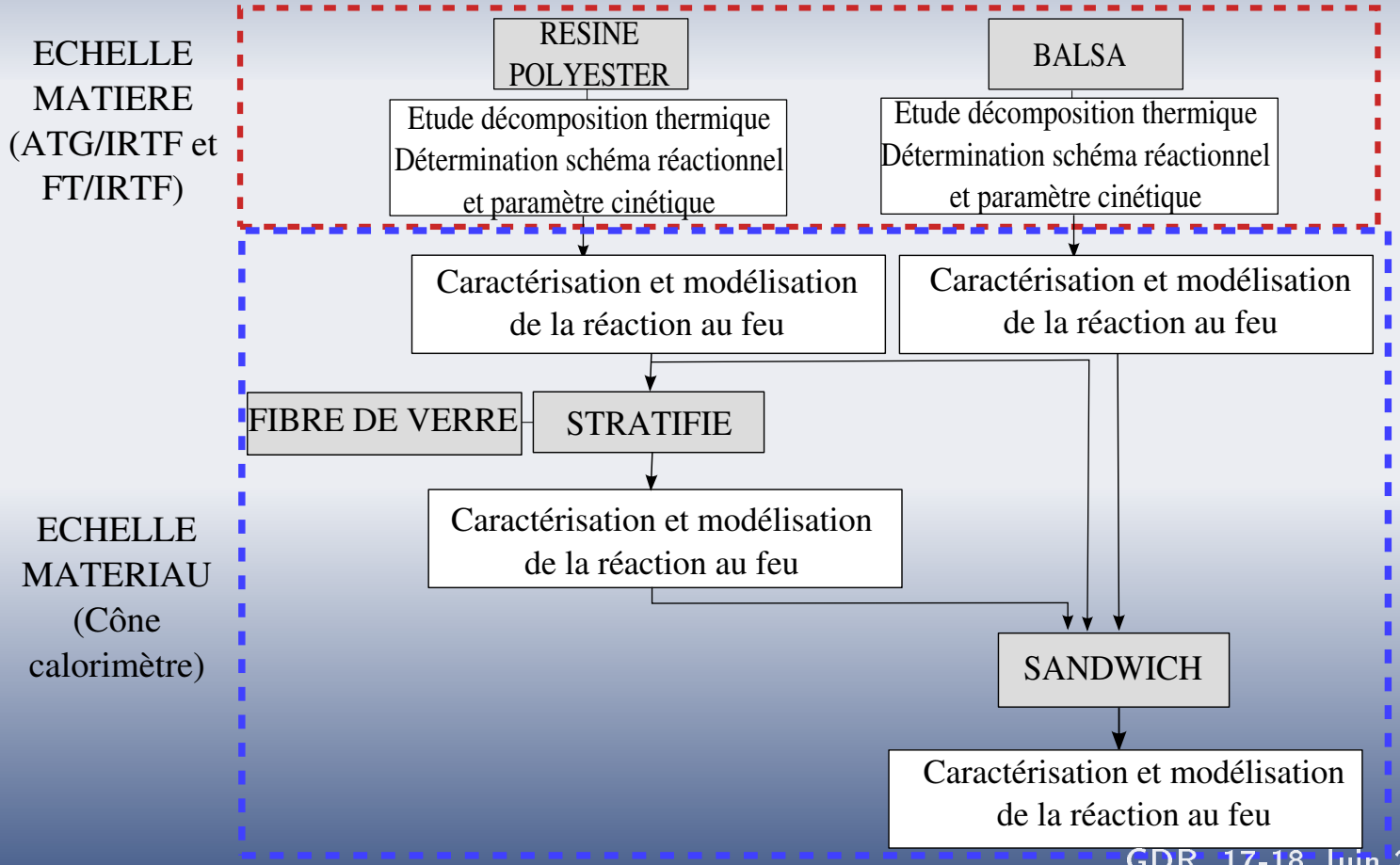
Produit étudié



Epaisseur des peaux : 4 mm
Epaisseur de l'âme : 40 mm
Taux de fibre : 70 %

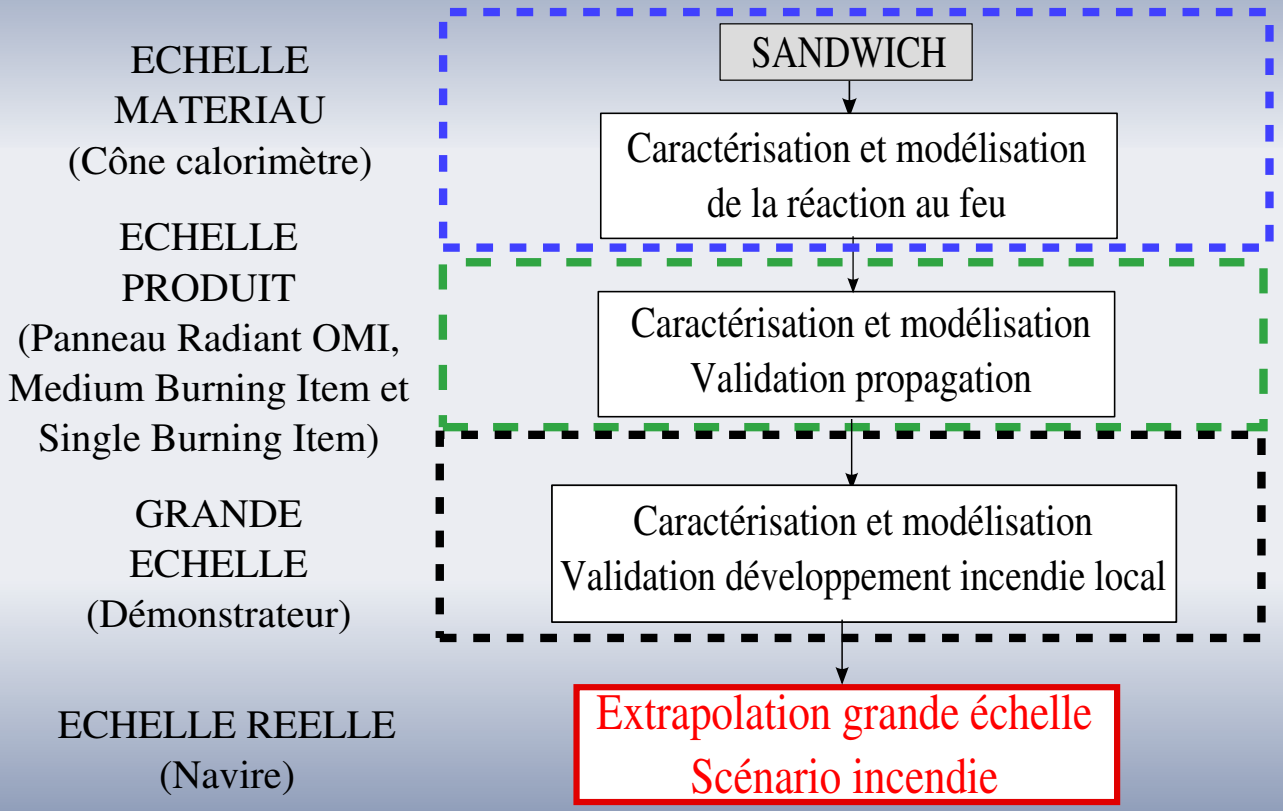
Méthodologie multi-échelle

Caractérisation et modélisation des propriétés physico-chimiques des matériaux.



Méthodologie multi-échelle

Validation de la propagation et du développement incendie.



Et le terme source ?

Modélisation du terme source (FDS)

Pyrolyse imposée
- Courbe de débit masse à une échelle;
- Propriétés thermiques;
- Propriétés d'ignition.

Pyrolyse calculée
- Mécanisme réactionnel;
- Paramètres cinétiques;
- Propriétés thermiques et d'ignition.

Approche la mieux adaptée

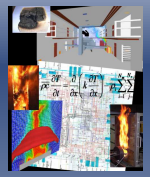
Solution adoptée

Résultats et analyse

- Echelle Matière
- Echelle Matériau
- Echelle Produit
- Echelle Système

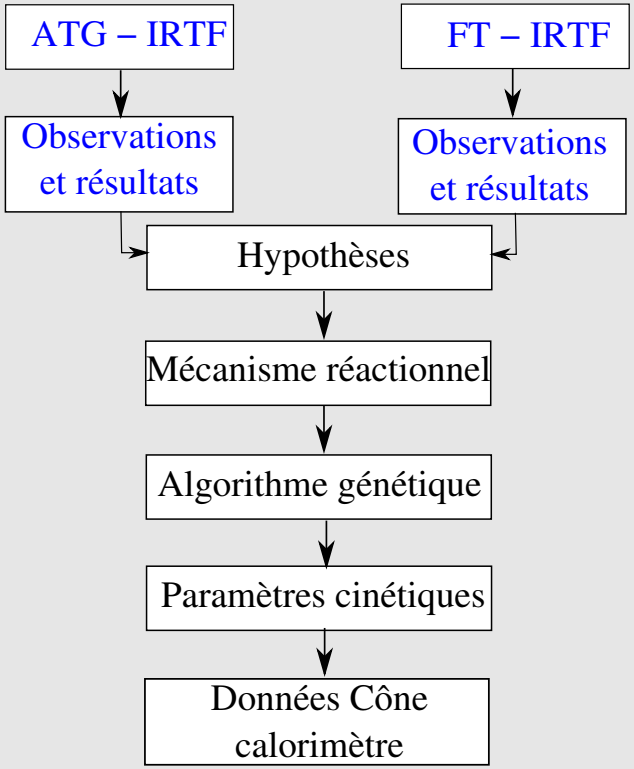
Résultats et analyse

- Echelle Matière



Analyse à l'échelle matière

Détermination du mécanisme réactionnel de décomposition de la résine polyester et du balsa.

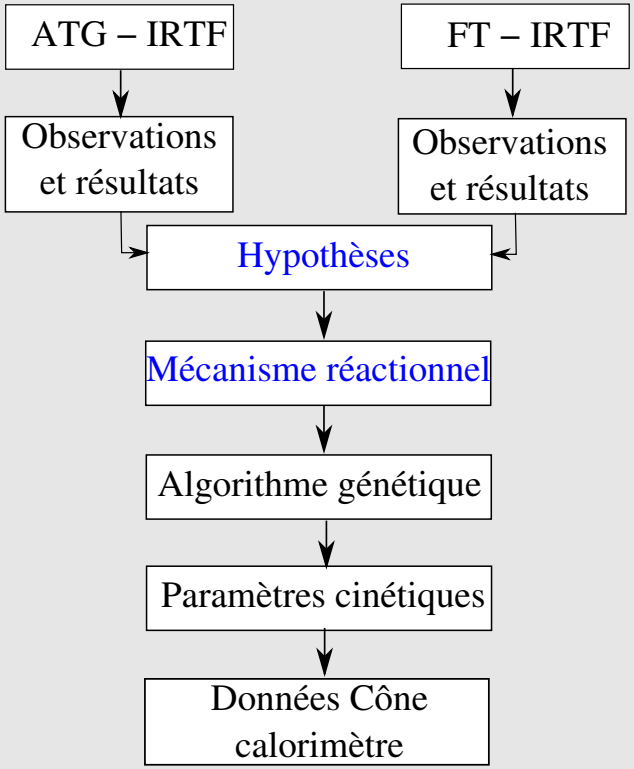


Echantillon : quelques grammes.

Conditions dynamiques :
20 et 700 $^{\circ}C$ avec un β de 10, 20 et 50 $K.min^{-1}$ sous différents gaz vecteurs (oxydant ou inerte).

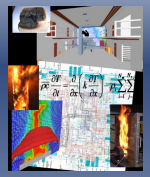
Analyse à l'échelle matière

Détermination du mécanisme réactionnel de décomposition de la résine polyester et du balsa.



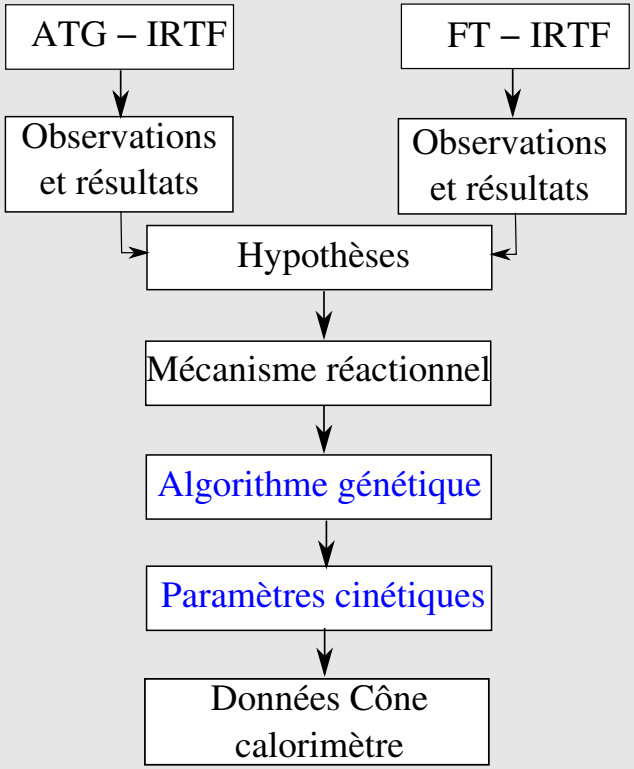
Hypothèses :

- Echantillon thermiquement fin ;
- T_g et Y_g homogènes ;
- Diffusion gazeuse négligée ;
- Phase solide - phase gazeuse en équilibre thermodynamique ;
- ...



Analyse à l'échelle matière

Détermination du mécanisme réactionnel de décomposition de la résine polyester et du balsa.



Taux de réaction :

$$\dot{\omega}_i = A_i e^{E_i/RT} \left(\frac{m_i(t)}{m_0} \right)^{n_i} Y_{O_2}^{\zeta}$$

Taux de perte de masse normalisé :

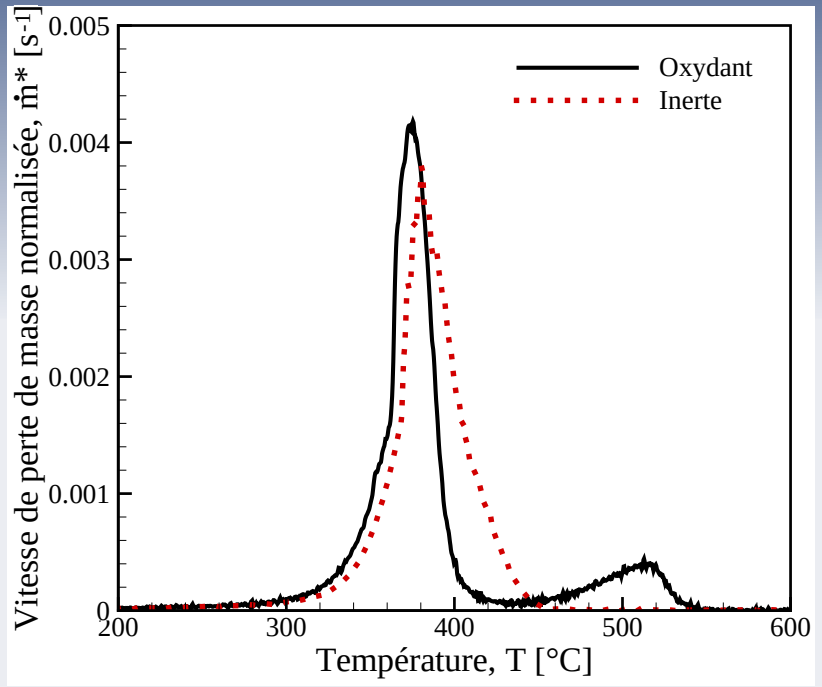
$$\dot{m}^*(t) = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i^*(t) = \sum_{i=1}^{N} \left(\upsilon_i - 1 \right) \dot{\omega}_i(t)$$

Paramètres Inconnus : E_i, A_i, n_i, υ_i

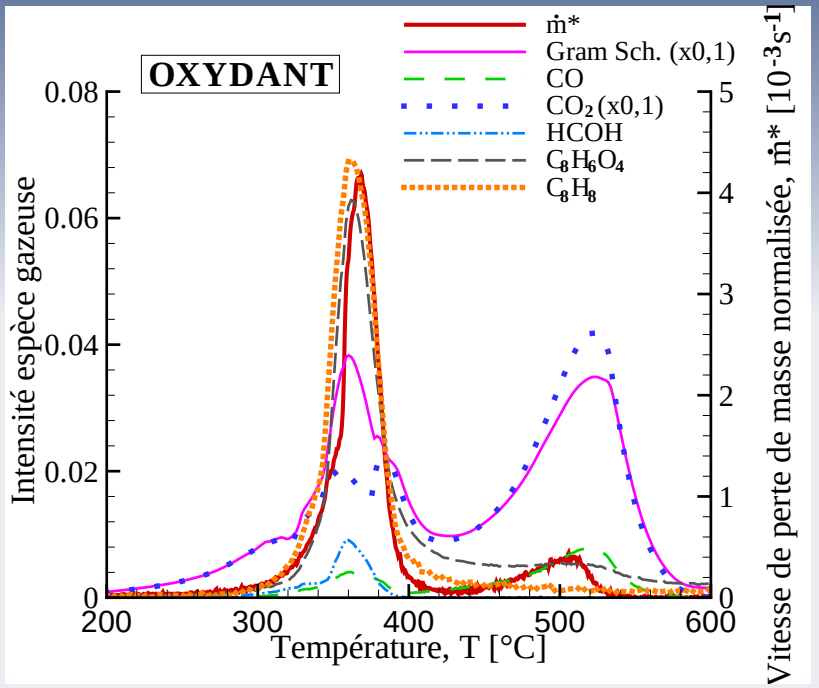
Grandeur connue : $\dot{m}_{exp}^*(t)$

Echelle matière : ATG-IRTF et FT-IRTF

Résine : schéma réactionnel

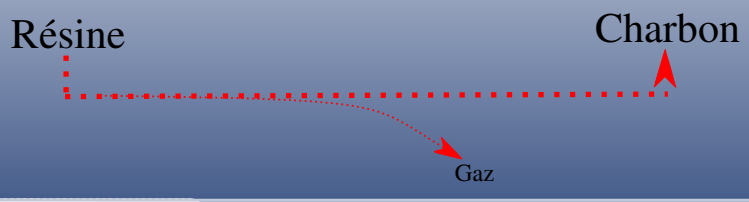


a/ ATG-IRTF, influence de Y_{O_2} sur $\dot{m}^*$, $\beta = 10K.min^{-1}$.



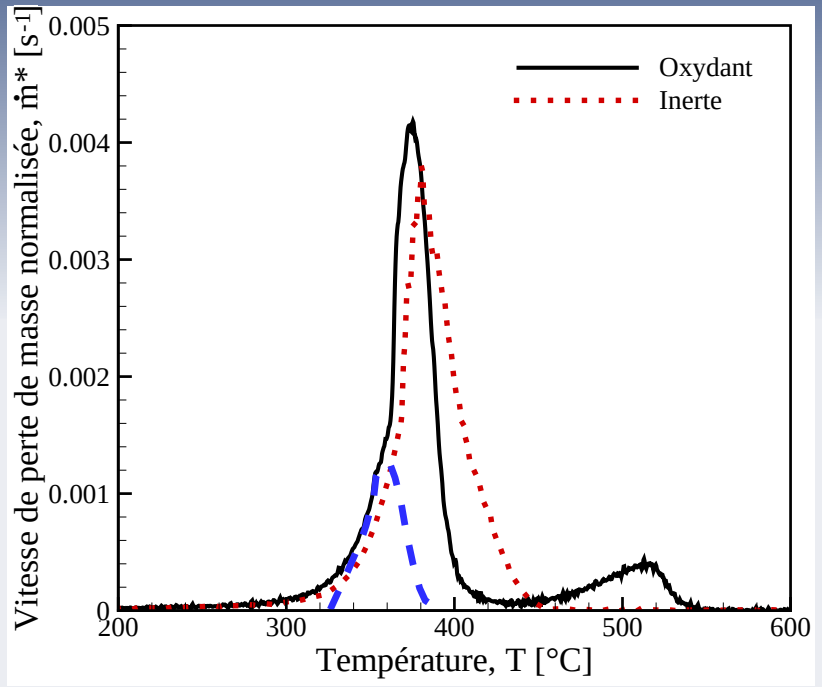
b/ ATG-IRTF, Emission gazeuse. $\beta = 10K.min^{-1}$

Oxydation
Pyrolyse

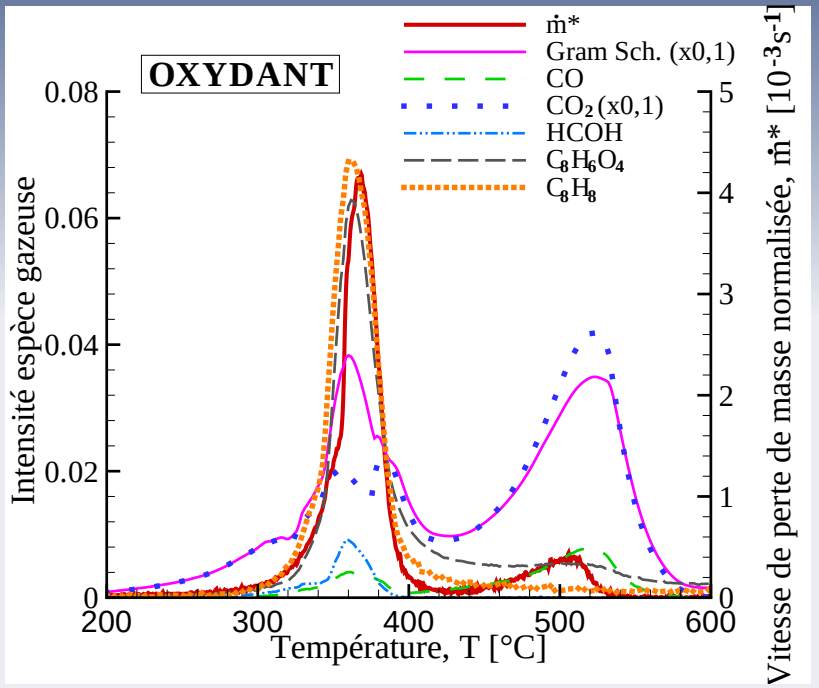


Echelle matière : ATG-IRTF et FT-IRTF

Résine : schéma réactionnel

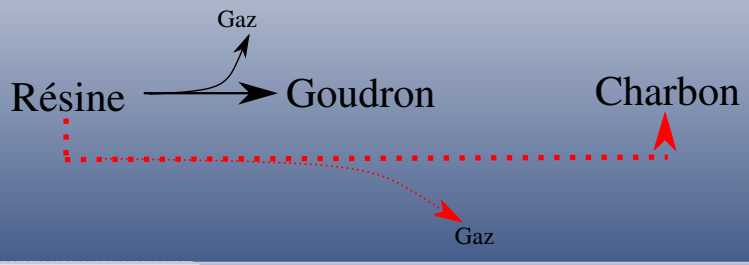


a/ ATG-IRTF, influence de Y_{O_2} sur $\dot{m}^*$, $\beta = 10K.min^{-1}$.



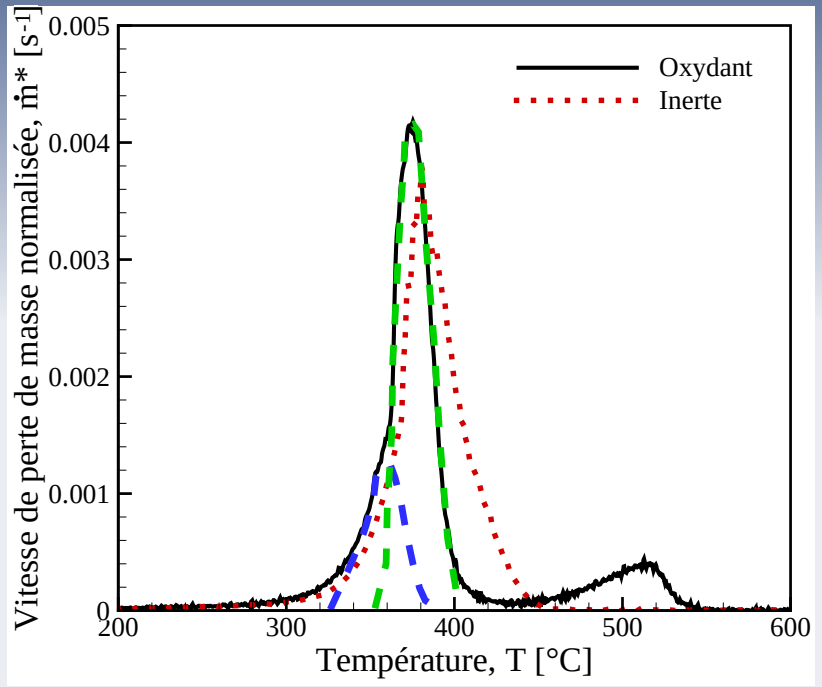
b/ ATG-IRTF, Emission gazeuse. $\beta = 10K.min^{-1}$

Oxydation
Pyrolyse

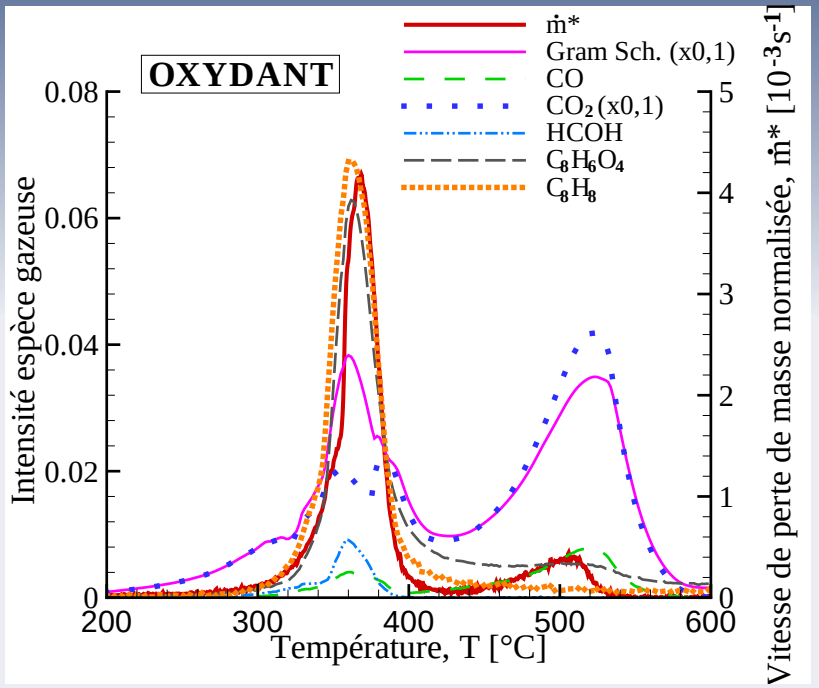


Echelle matière : ATG-IRTF et FT-IRTF

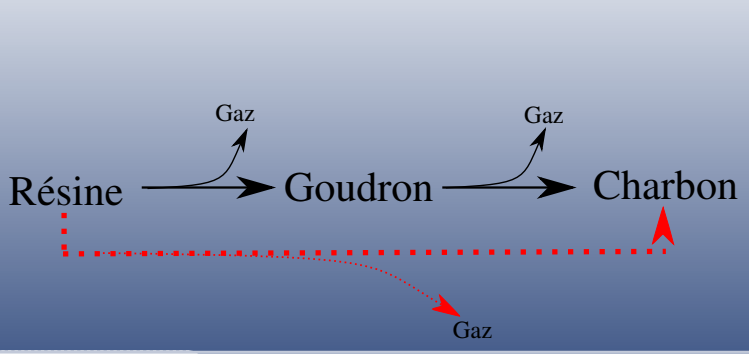
Résine : schéma réactionnel



a/ ATG-IRTF, influence de Y_{O_2} sur $\dot{m}^*$, $\beta = 10K.min^{-1}$.

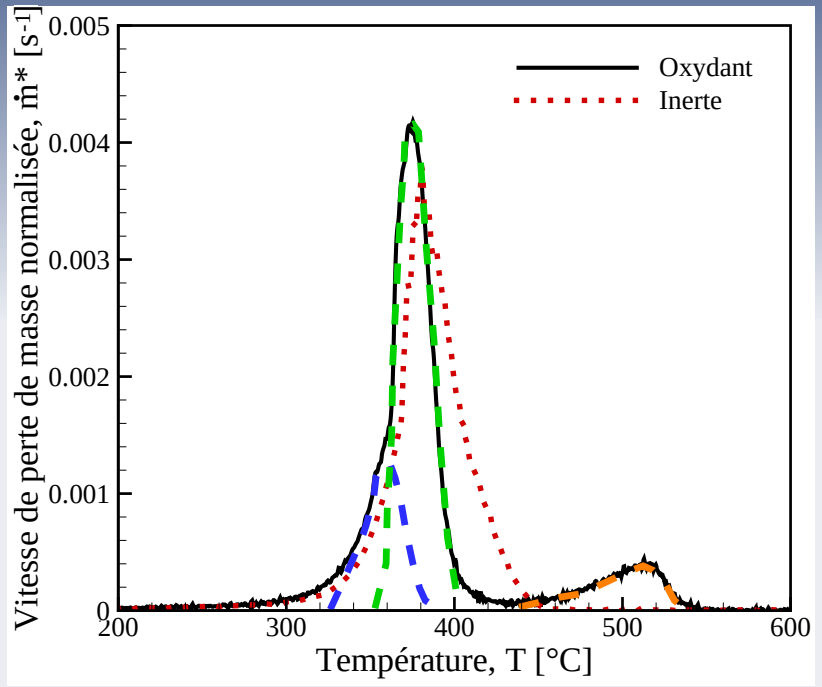


b/ ATG-IRTF, Emission gazeuse. $\beta = 10K.min^{-1}$

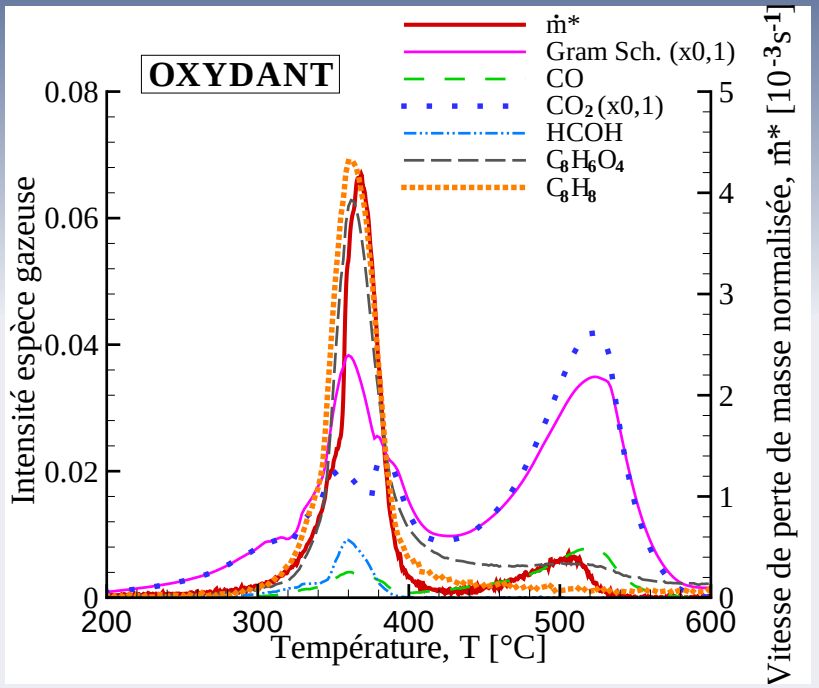


Echelle matière : ATG-IRTF et FT-IRTF

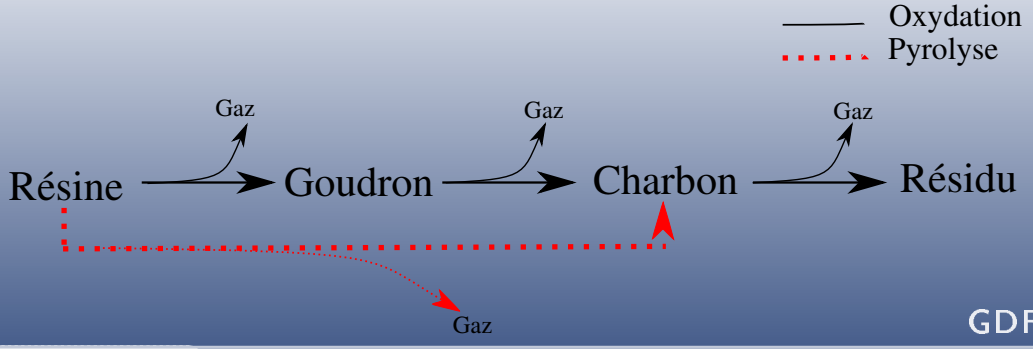
Résine : schéma réactionnel



a/ ATG-IRTF, influence de Y_{O_2} sur $\dot{m}^*$, $\beta = 10K.min^{-1}$.

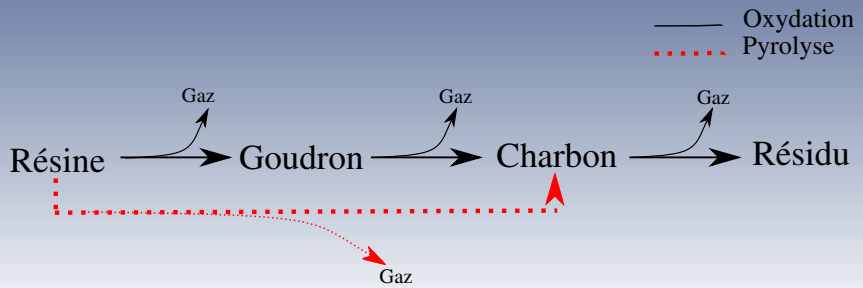


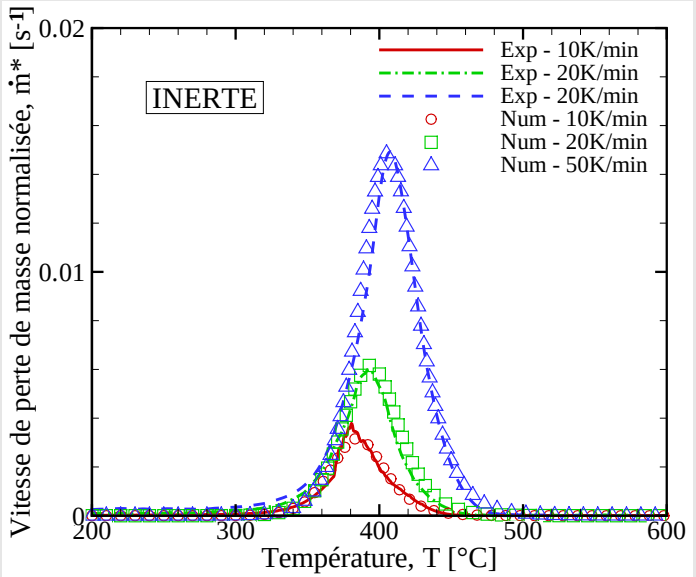
b/ ATG-IRTF, Emission gazeuse. $\beta = 10K.min^{-1}$



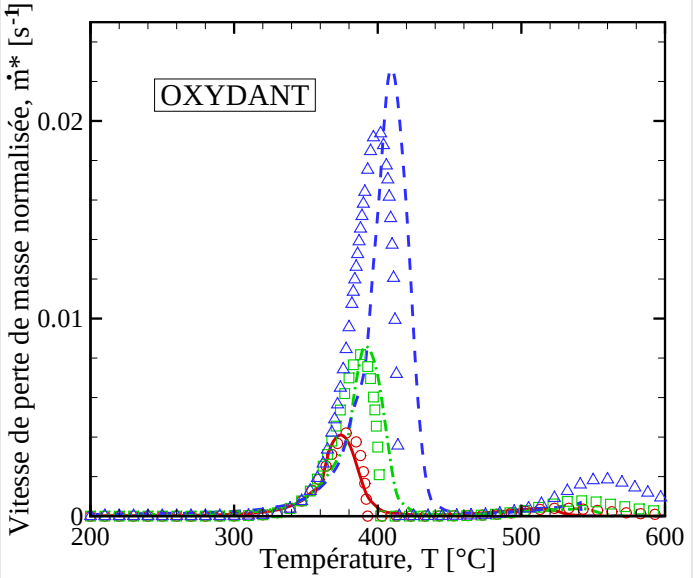
Echelle matière : ATG-IRTF et FT-IRTF

Résine : comparaison expérience-calcul





a/ Atmosphère inerte.
(β = 10, 20 et 50 $K.min^{-1}$).



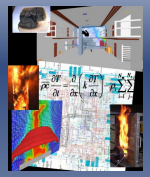
b/ Atmosphère oxydante.
(β = 10, 20 et 50 $K.min^{-1}$).

Résultats et analyse

- Echelle Matière
- Echelle Matériau
- Echelle Produit
- Echelle Système

Résultats et analyse

- Echelle Matériau



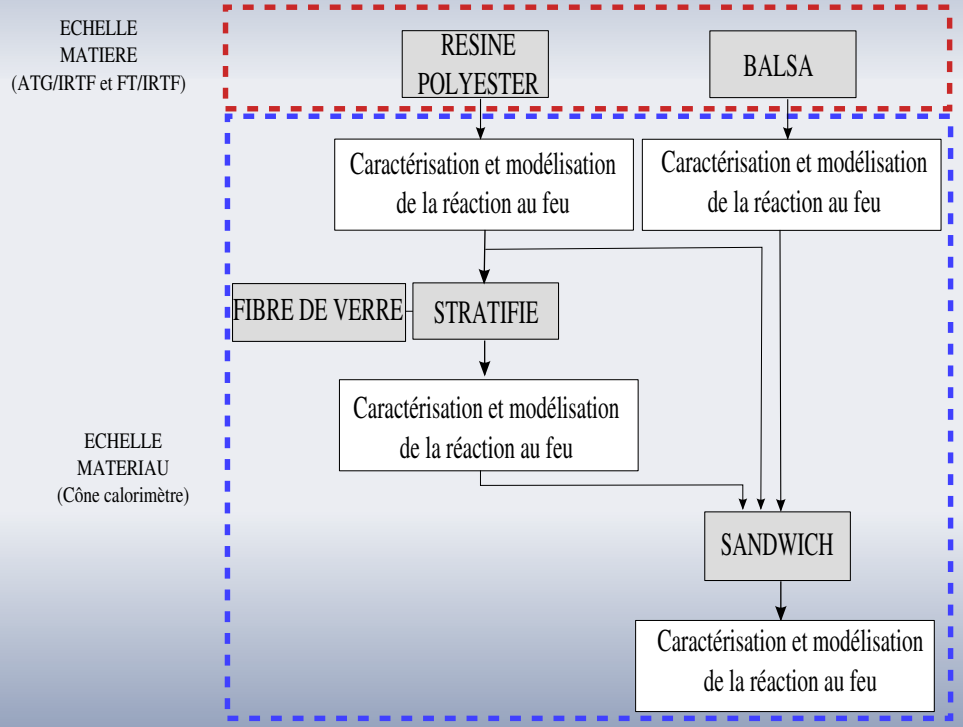
Cône Calorimètre

- **Norme** : ISO 5660-1
- **Source** : cône tronqué radiant ;
- **Densité de flux** : 5-100 $kW.m^{-2}$;
- **Dimensions échantillons** : 100×100 mm, ep_{max}. :50 mm ;
- **Objectifs** :
  - Etudier le comportement au feu du matériau ;
  - Quantifier les paramètres énergétiques ;
  - Estimer les propriétés d'ignition.

Validation réalisée par comparaison expérience/simulation des bilans globaux d'énergie, de masse et d'espèces pour le sandwich.

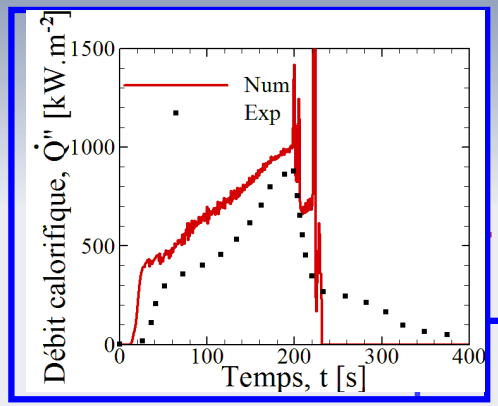
Echelle matériau : Cône Calorimètre

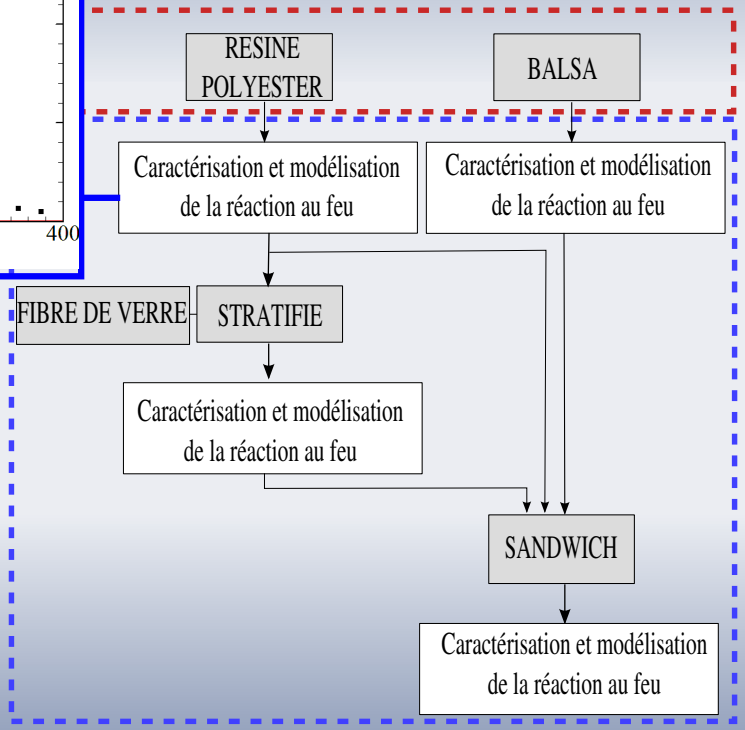
Résultats intermédiaires



Echelle matériau : Cône Calorimètre

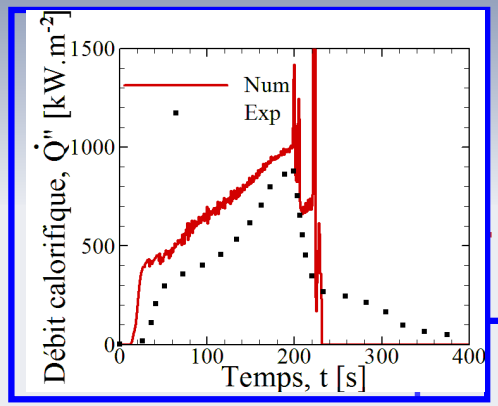
Résultats intermédiaires

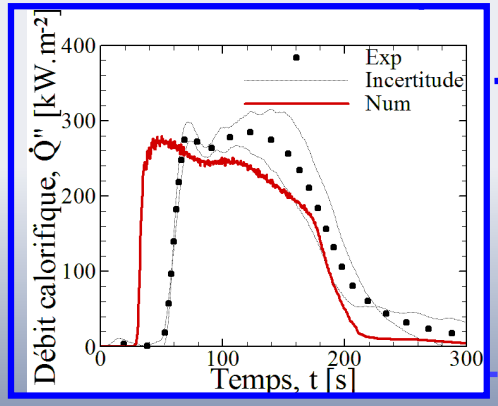


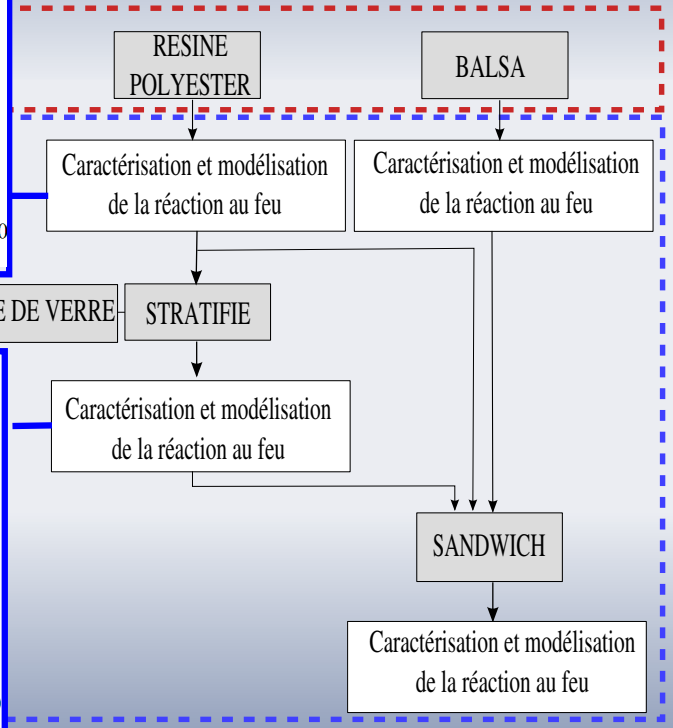


Echelle matériau : Cône Calorimètre

Résultats intermédiaires

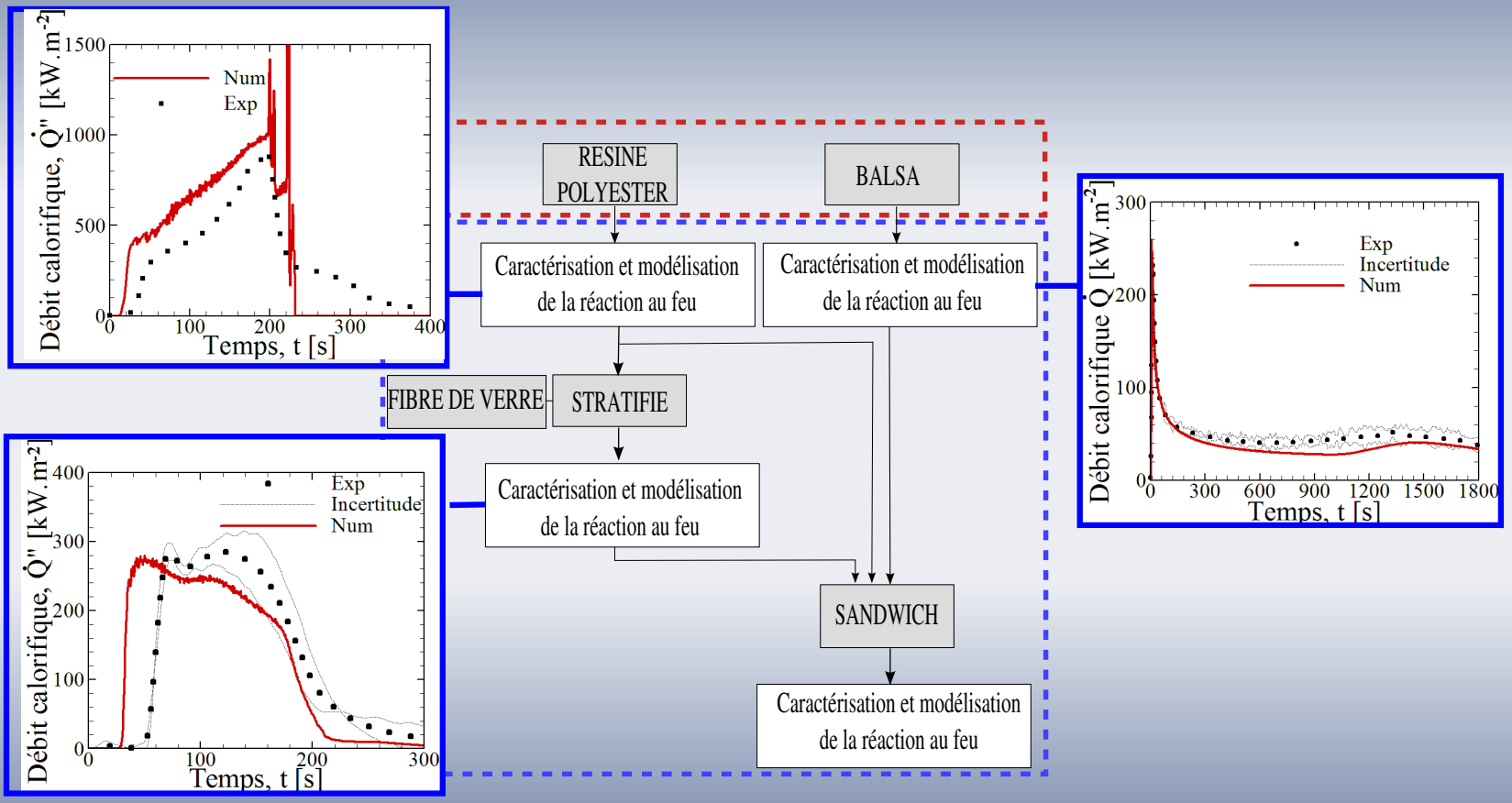


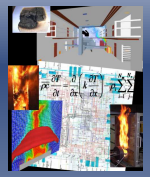




Echelle matériau : Cône Calorimètre

Résultats intermédiaires



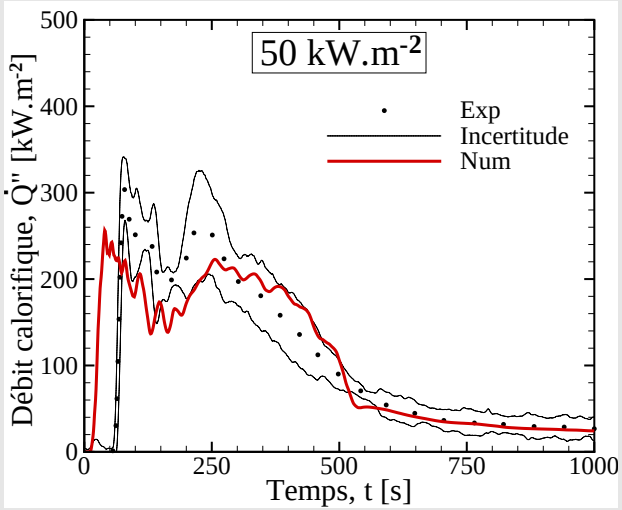


Echelle matériau : Cône Calorimètre

Results of the sandwich composite

Simulation

Approche numérique envisagée



b/ Comparaison exp-num

Ecarts sur résultats sont les traductions des limitations de FDS.

1. Transfert de chaleur 1D dans les solides ;
2. Réaction d'oxydation impossible (Modèle à fraction de mélange) ;
3. Porosité, diffusion moléculaire, déformation non traitées ;
4. Matériaux homogènes et isotropes ;
5. Propriétés thermiques équivalentes ;
6. Réaction globale..

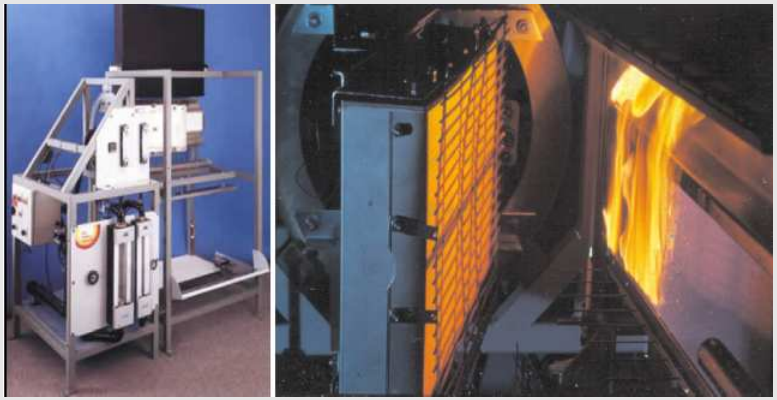
Résultats et analyse

- Echelle Matière
- Echelle Matériau
- Echelle Produit
- Echelle Système

Résultats et analyse

- Echelle Produit

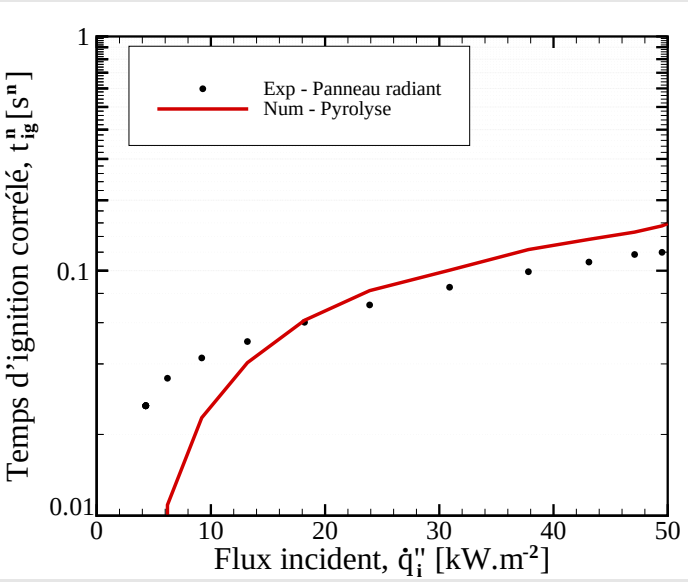
Banc d'essai du Panneau Radiant OMI



- **Norme** : NF ISO 5658 : 2(2007)
- **Source** : Panneau radiant ;
- **Dimension échantillon** : 800 × 155 mm ; ep_{max} : 40 mm
- Gradient de densité de flux entre 50 et 2,5 $kW.m^{-2}$;
- **Objectif** : Etudier la propagation latérale ;

Etudier localement la propagation latérale et la capacité du code à simuler ce phénomène.

Prédiction de la propagation latérale



Le matériau possède un fort pouvoir propagateur.

Eclairement $> 15 kW.m^{-2}$:
La propagation dépend principalement de l'éclairement incident du **panneau radiant**.

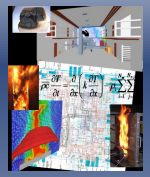
Eclairement $< 15 kW.m^{-2}$:
La propagation contre courant dépend de la **diffusion thermique** au sein du sandwich.

Difficulté du code à prédire la propagation contre-courant en particulier pour les faibles irradiances.

Banc d'essai du Single Burning Item

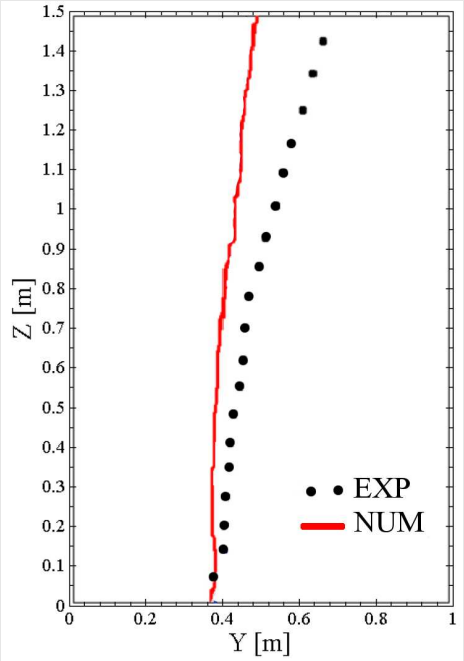
- **Norme** : NF EN 13823 (2002) ;
- **Echantillons** : 2 ailes verticales en forme de dièdre. (1500 × 500 et 1500 × 1000)
- **Source** : flamme de diffusion ;
- **Puissance** : $(30,7 \pm 2)\ kW$;
- **Objectifs** : Etudier le dégagement énergétique et la propagation ;

- Etudier la contribution d'un coin sur le développement du foyer et la capacité du code à reproduire ce phénomène ;
- Valider localement la propagation.

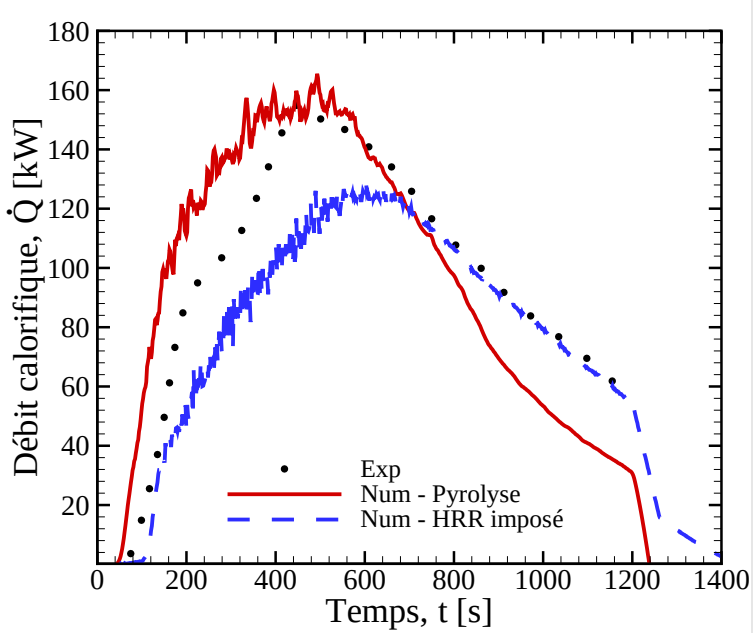


–Panneau Radiant OMI

Prédiction de la propagation

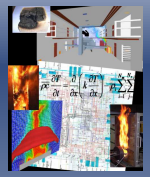


a/ Comparaison Exp-Num de la propagation sur la grande aile du sandwich au SBI.



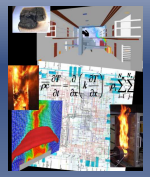
b/ Comparaison Exp-Num du dégagement énergétique du sandwich au SBI.

- Extension laterale importante en forme de $\mathcal{V}$.
- Difficultés pour prédire la propagation (Equation de la chaleur, échanges pariétaux).



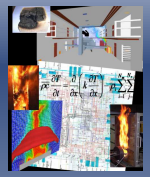
Résultats et analyse

- Echelle Matière
- Echelle Matériau
- Echelle Produit
- Echelle Système



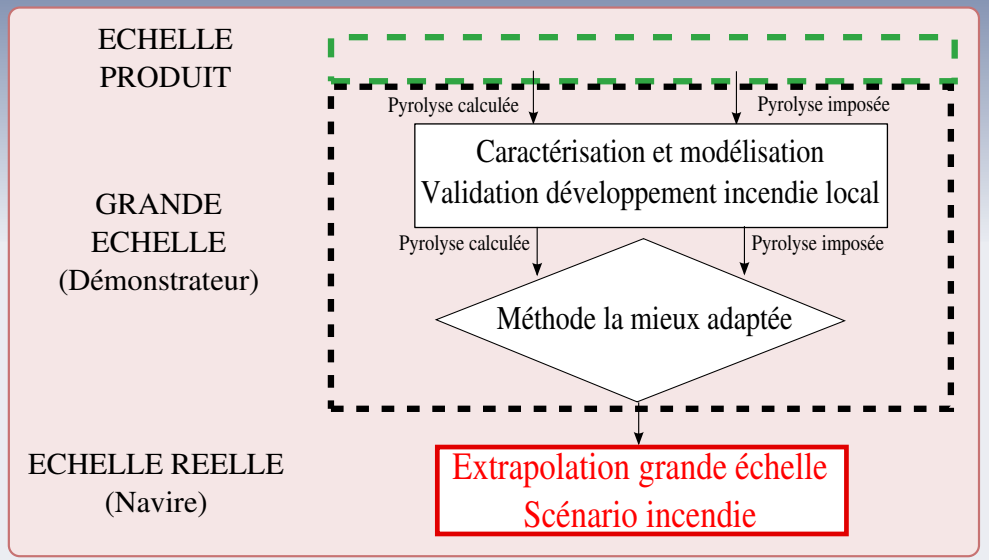
Résultats et analyse

- Echelle Système

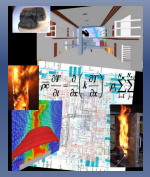


Large scale - Demonstrator

Banc d'essai du démonstrateur

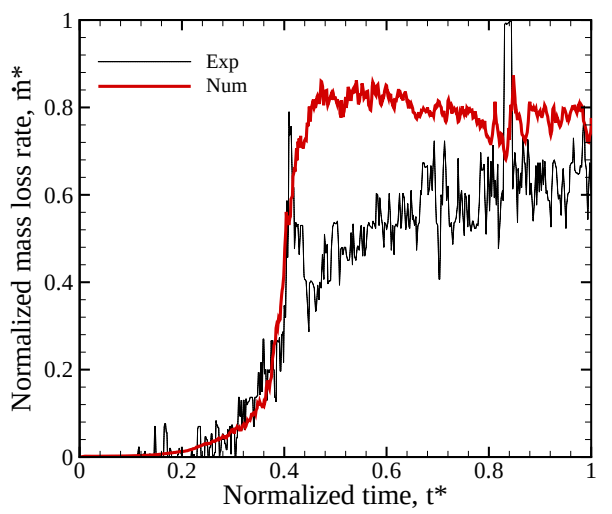


- **Local** $\sim$ 10 m^2 ;
- **Source** : Bac d'acétone
- Local équipé de thermocouples et d'un système de pesée ;
- **Objectif** : Essai réalisé pour valider le modèle de pyrolyse ;

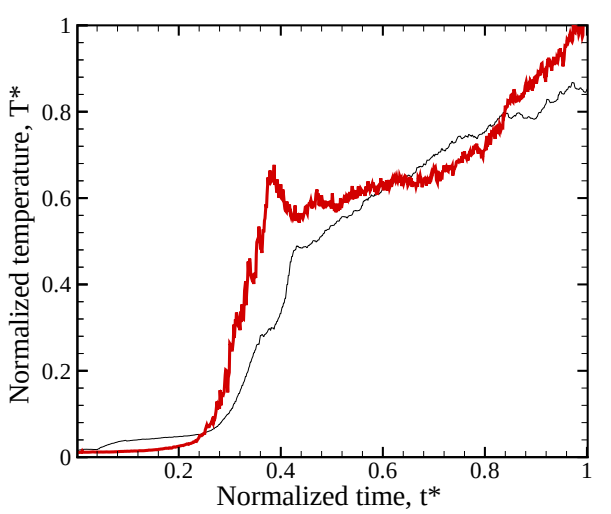


Large scale - Demonstrator

Prédiction du développement du foyer



a/ Prédiction de la vitesse de perte de masse normalisée.



b/ Prédiction de la température normalisée au niveau du plafond.

$t^* < 0,4$: Bonne prédiction de l'approche par pyrolyse calculée.

$t^* \geqslant 0,4$: Surestimation de $\dot{m}^*$ par pyrolyse calculée.

- Dépendance de la combustion (fraction de mélange) et du mécanisme de dégradation de la phase solide à Y_{O_2} dans le local.
- L'hypothèse que toutes les réactions sont des réactions de thermolyse.

Conclusions générales

- Un modéle global de pyrolyse a été développé pour un sandwich composite à partir d'analyses à l'échelle matière de ses constituants.
- Le comportement au feu de ce sandwich a été caractérisé expérimentalement et simulé numériquement à plusieurs échelles.
- Numériquement, deux approches ont été confrontées pour simuler le terme source : pyrolyse imposée et pyrolyse calculée.
- Les résultats montrent qu'il est préférable d'utiliser une approche par pyrolyse calculée.
- On a montré que celle-ci permettait de simuler, sinon parfaitement au moins de manière sécuritaire, le développement d'un incendie dans un local en composite. Cette démarche a donc été jugée satisfaisante et suffisante pour une étude ISI à l'échelle d'un navire.
- L'approche "pyrolyse calculée" exige toutefois des étapes intermédiaires de validation à échelles et complexité croissantes.

Conclusions générales

- L'étude est basée sur l'emploi du code FDS.
- Le travail qui a été réalisé a permis d'en mesurer quelques limitations.
- Pour ce qui nous concerne, les plus pénalisantes sont clairement :
  - L'utilisation d'une équation de la chaleur 1D : propagation latérale sous-estimée.
  - L'utilisation d'un modèle de combustion à fraction de mélange : oxydation de la phase solide impossible.
  - L'utilisation d'un modèle à réaction globale : non adapté pour les sandwichs composites

Perspectives

- Etudier d'avantage l'interaction entre la phase solide et la phase gazeuse ;
- Comprendre l'influence de l'oxygène sur la dégradation afin d'être à même de simuler des feux sous-ventilés ;
- Etudier les phénomènes d'extinctions de la flamme.
- Modéliser les intéractions entre systèmes de protections actives - phase solide - phase gazeuse.

Le progrès, une passion à partager

Damien MARQUIS

Laboratoire National de métrologie et d'Essais
Pôle Energie, Environnement & Combustion
Département comportement au feu et sécurité incendie
29 Avenue Roger Hennequin - 78197 Trappes Cedex

Mail : damien.marquis@lne.fr
Phone : +33 (0)1 30 69 32 46