

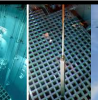
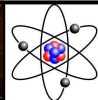
Modèle physico-chimique et quantification des imbrulés générés par l'incendie en milieux clos sous-oxygénés

**Auteurs : MM. Julien TISSOT , Arnaud LE BORGNE (anciens étudiants de l'Université
Henri Poincaré),**

François ARNOULD , Philippe AINE (AREVA) et

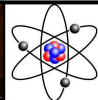
Penh LAMUTH (CEA / DPSN / SSC, penh.lamuth@cea.fr)

1



Cadre

- Projet d'Intérêt Commun AREVA / CEA
- Suite des travaux de stage effectué à DPSN/SSC en 2008
 - a) Modélisation des:
 - * imbrulés et leurs entraînements,
 - * températures, vitesses dans le conduit d'extraction
 - b) Analyse du risque d'explosion d'imbrulés dans
 - * le compartiment en feu, et
 - * le conduit d'extraction au niveau de la dilution



Plan

1. Problématique et principe adopté
2. Formation des imbrulés
3. Température et vitesse des gaz dans le circuit d'extraction

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

1. Problématique et principe adopté

1.1 Risque de ré-inflammation des fumées

1.1.1 Différents facteurs mis en jeu

1.1.2 Problème dans sa globalité

1.2 Modélisation d'un incendie en milieu confiné

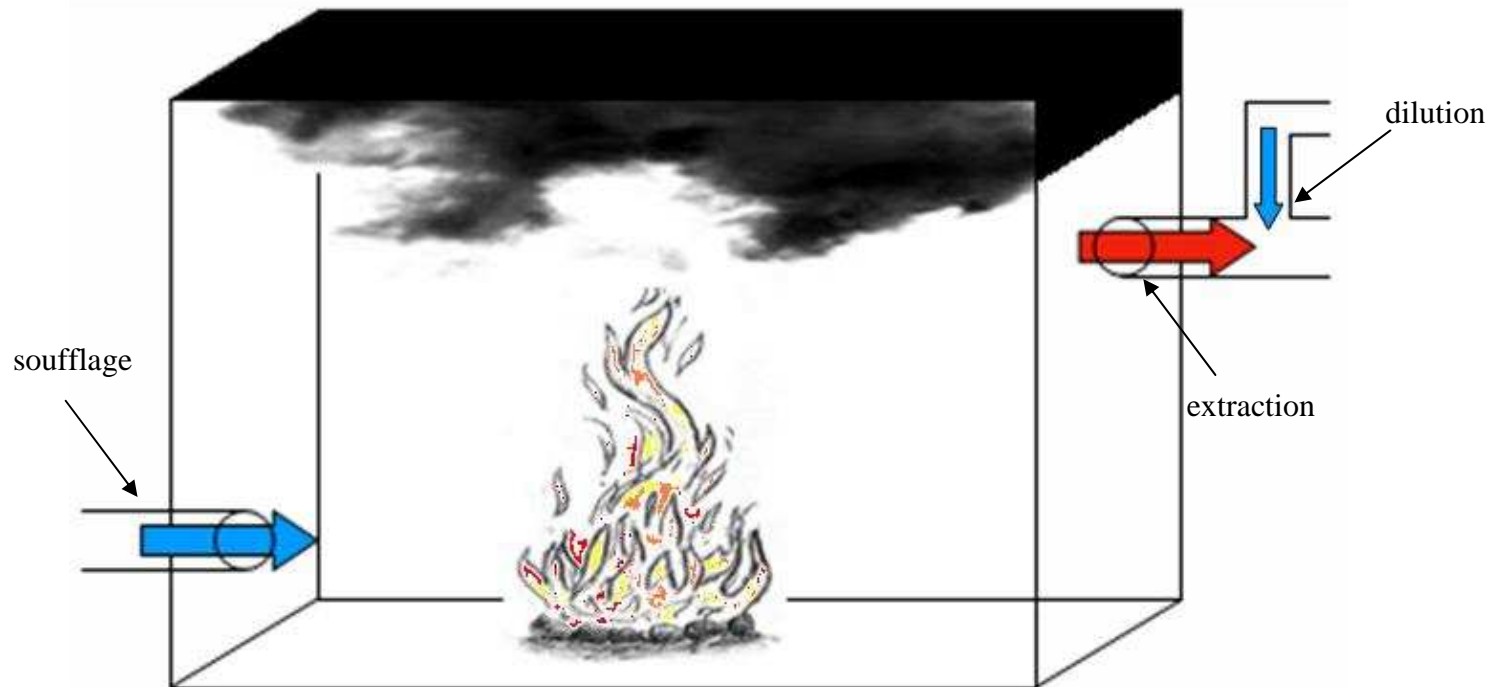
1.2.1 Simulation numérique

1.2.2 Organigramme du programme

1.3 Validation du modèle

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

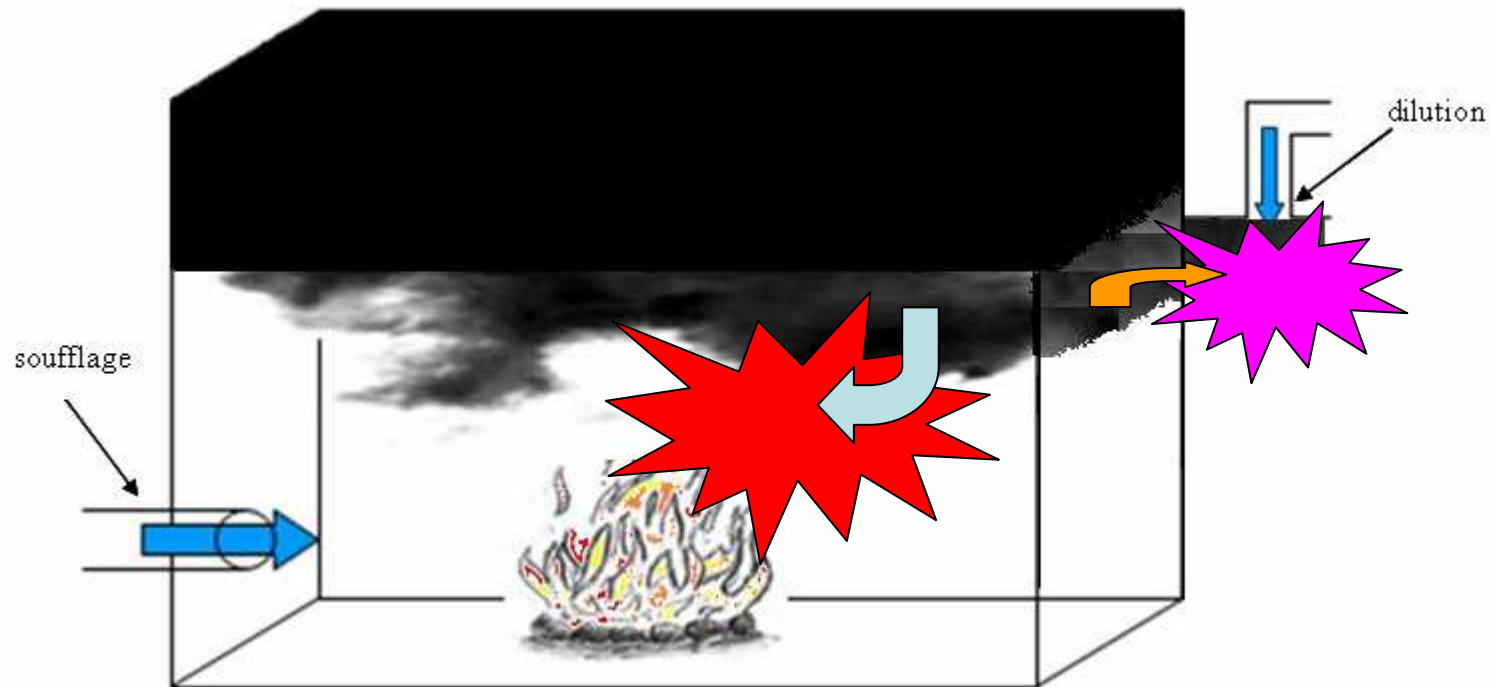
1.1 Risque de ré-inflammation des fumées



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

1.1 Etude du risque de ré-inflammation des fumées

Situation inacceptable dans les installations nucléaires



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

1.1.1 Différents facteurs mis en jeu

- Cinétique de Combustion
- Caractéristiques de la ventilation
- Quantité de gaz imbrulés
- Température et pression des gaz dans l'enceinte et dans le conduit d'extraction

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

1.1.2 Problème dans sa globalité

- **Objectif** : Modélisation d'un incendie en milieu confiné

- **Difficultés**

- Complexité du problème
- Interdépendance des différents facteurs
- Modèles physiques insuffisants : combustion en situation de sous-oxygénation et composition des gaz formés

***N.B.** Des constats expérimentaux visuels existent mais pas assez de formule*

- **Hypothèses simplificatrices**

- Gaz parfaits et Phénomènes engendrés indépendants de (x, y, z)

1. **Problématique**
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

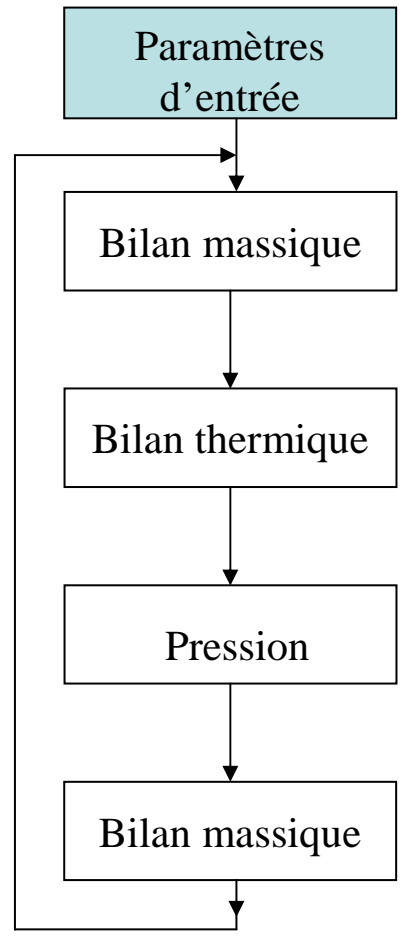
1.2 Modélisation d'un incendie en milieu confiné

1.2.1 Simulation numérique

Données	Calculs
<ul style="list-style-type: none"> • Caractéristiques de l'enceinte • Ventilation : débit d'air entrant • Pression et température initiales • Caractéristiques du combustible • Limite Inférieure en Oxygène (LOI) • Perte de masse du combustible (ou puissance) • LII et LIE(T_o, P_o) 	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne dans l'enceinte • Pression dans l'enceinte • Titres, Concentrations des gaz • Débits volumique et massique sortant • Capacité calorifique du gaz • Température et vitesse dans le conduit d'extraction • LII et LSI(T, P)

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

1.2.2 Organigramme du programme

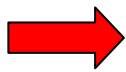
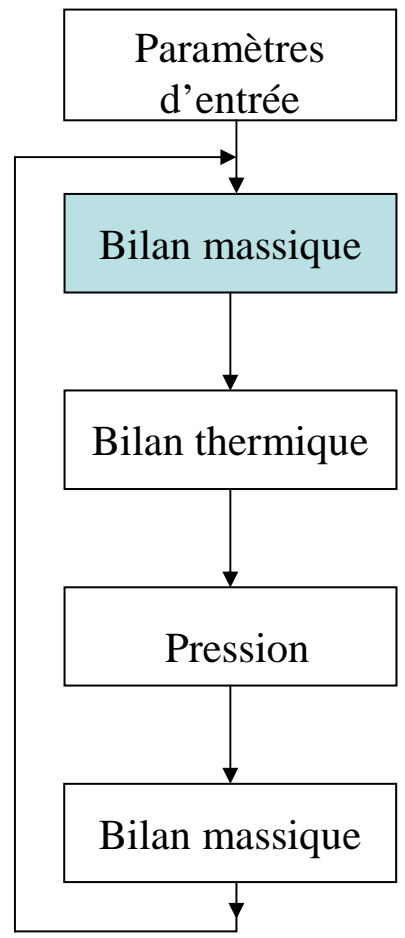


Caractéristiques :

- Enceinte (géométrie, nature des parois)
- Ventilation de soufflage
- Pression et température initiales
- Composition chimique du combustible
- LOI (concentration minimale de O₂)
- Puissance du feu

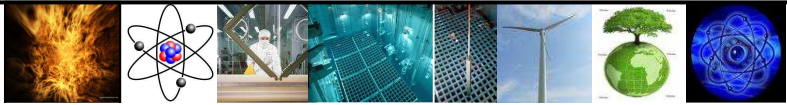
1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

1.2.2 Organigramme du programme



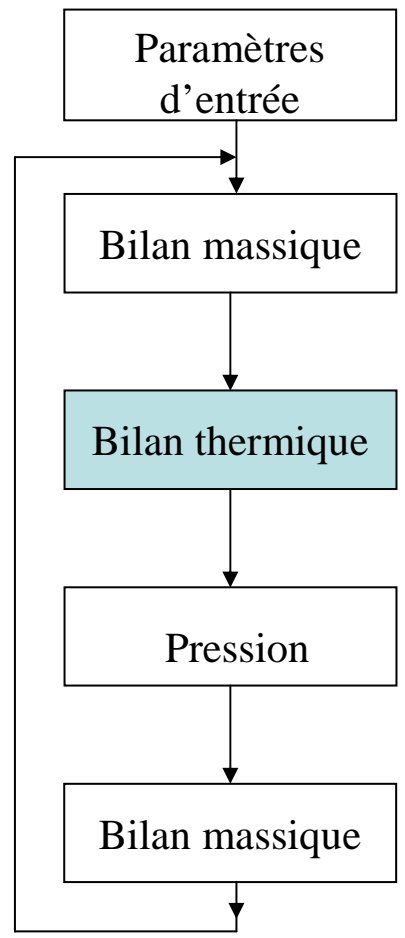
Réaction chimique + soufflage :
Composition : fumées et gaz dans enceintes

- ⇒ concentrations
- ⇒ titres
- ⇒ masse des gaz



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

1.2.2 Organigramme du programme

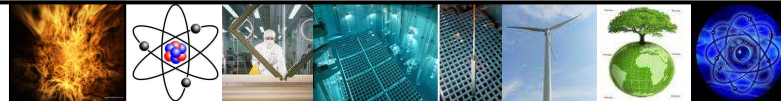


Puissance :

Transfert de chaleur :

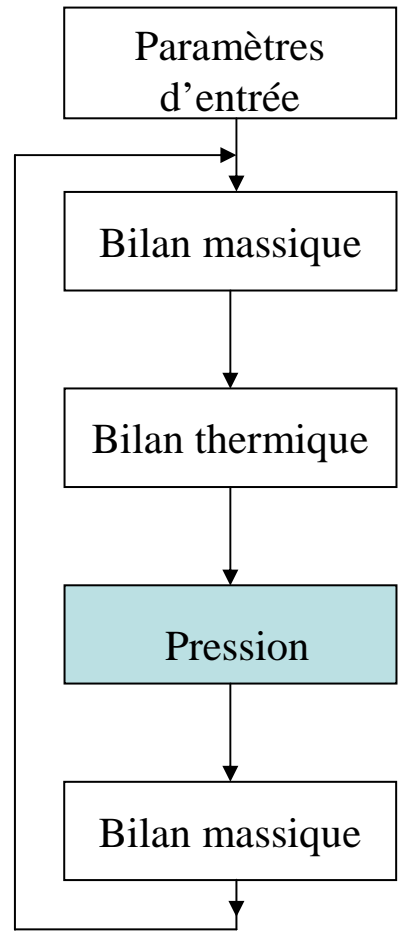
- parois (murs, plafond, plancher)
- ventilation

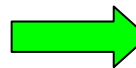
⇒ **Température intérieure
du compartiment**



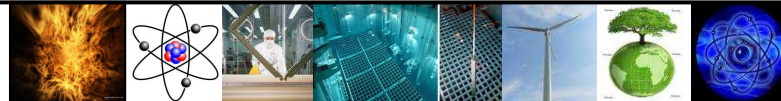
1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

1.2.2 Organigramme du programme



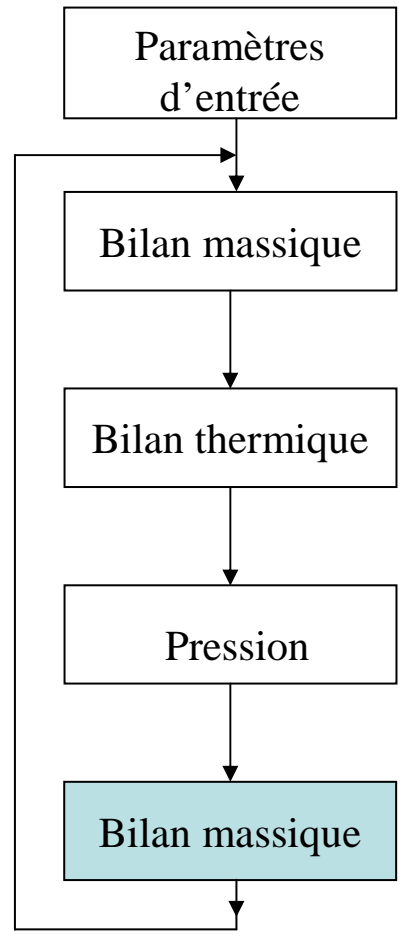
$T \nearrow$  $P \nearrow$

⇒ Débit ventilation sortant
+ Température dans le conduit
d'extraction



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

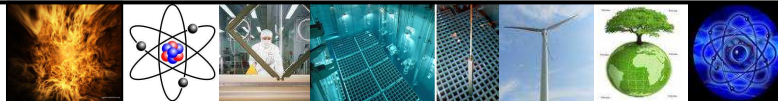
1.2.2 Organigramme du programme



Débit ventilation sortant:

⇒ concentrations, titres,

masse des gaz, LIE , LII



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

1.3 Validation du modèle:

Comparaison Essais / Calculs

Utilisation des résultats d'essais brut réalisés au CNRS / LCD (Poitiers) dans le cadre de la thèse de Mlle Julie LASSUS, doctorante d'AREVA / CEA.

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

2. Formation des imbrulés

2.1 Présentation de la combustion

2.1.1 La combustion

2.1.2 Les imbrulés

2.2 Modélisation de la combustion

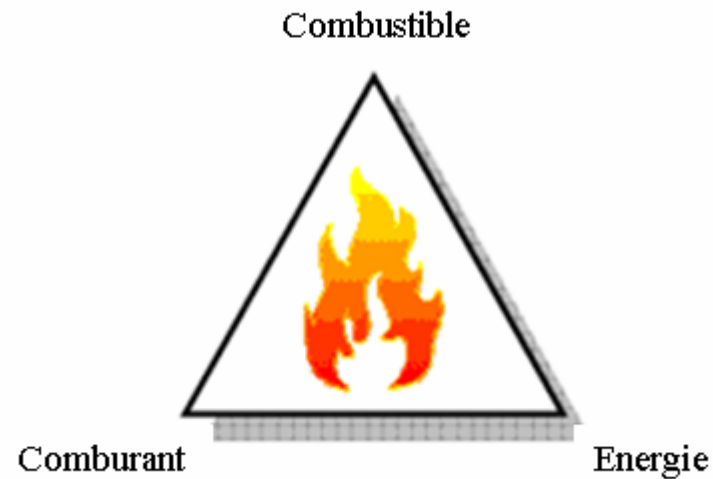
2.3 Comparaison simulations / essais

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

2.1 Présentation de la combustion

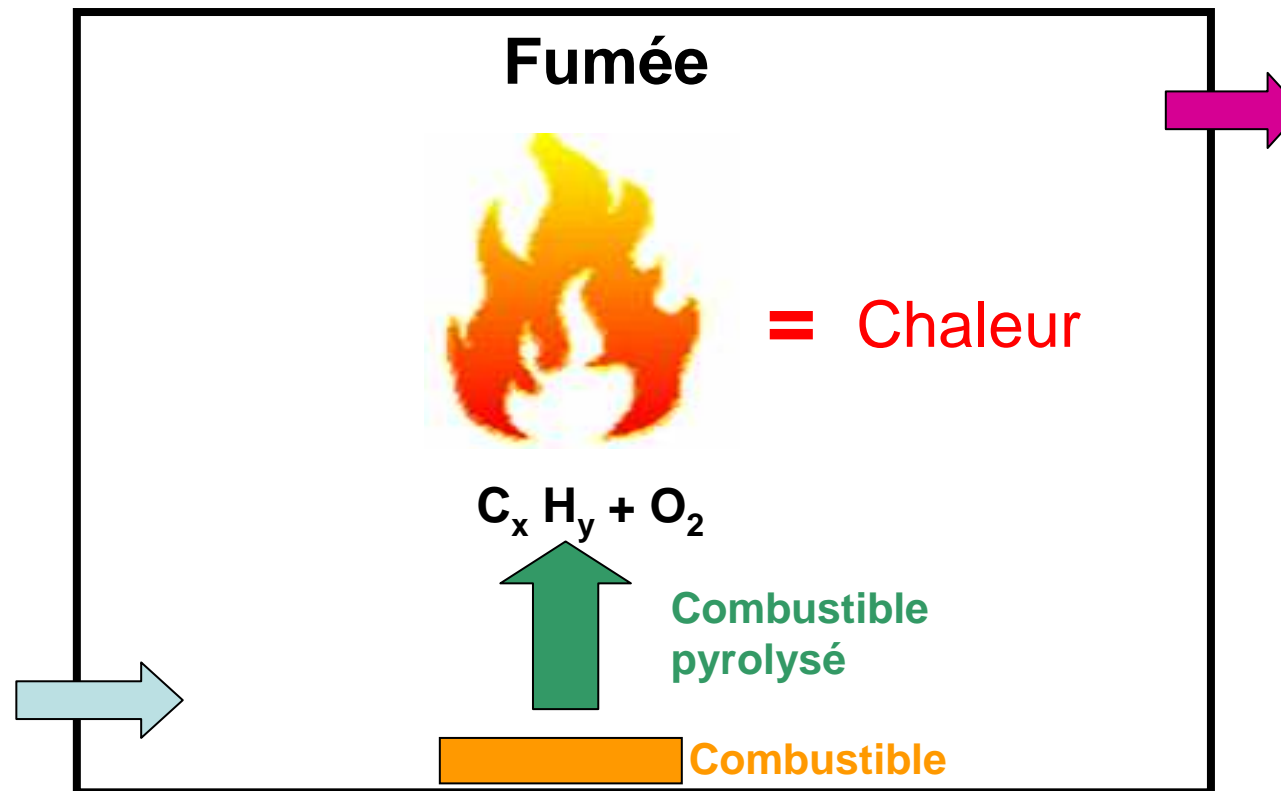
2.1.1 La combustion

- Réaction exothermique
- Trois éléments nécessaires
- Triangle du feu



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

2.1.1 La combustion



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

2.1.2 Les imbrulés

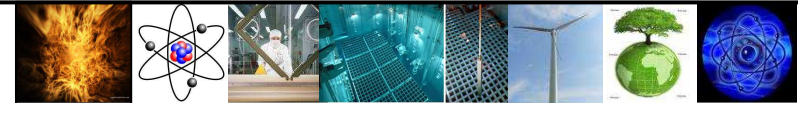
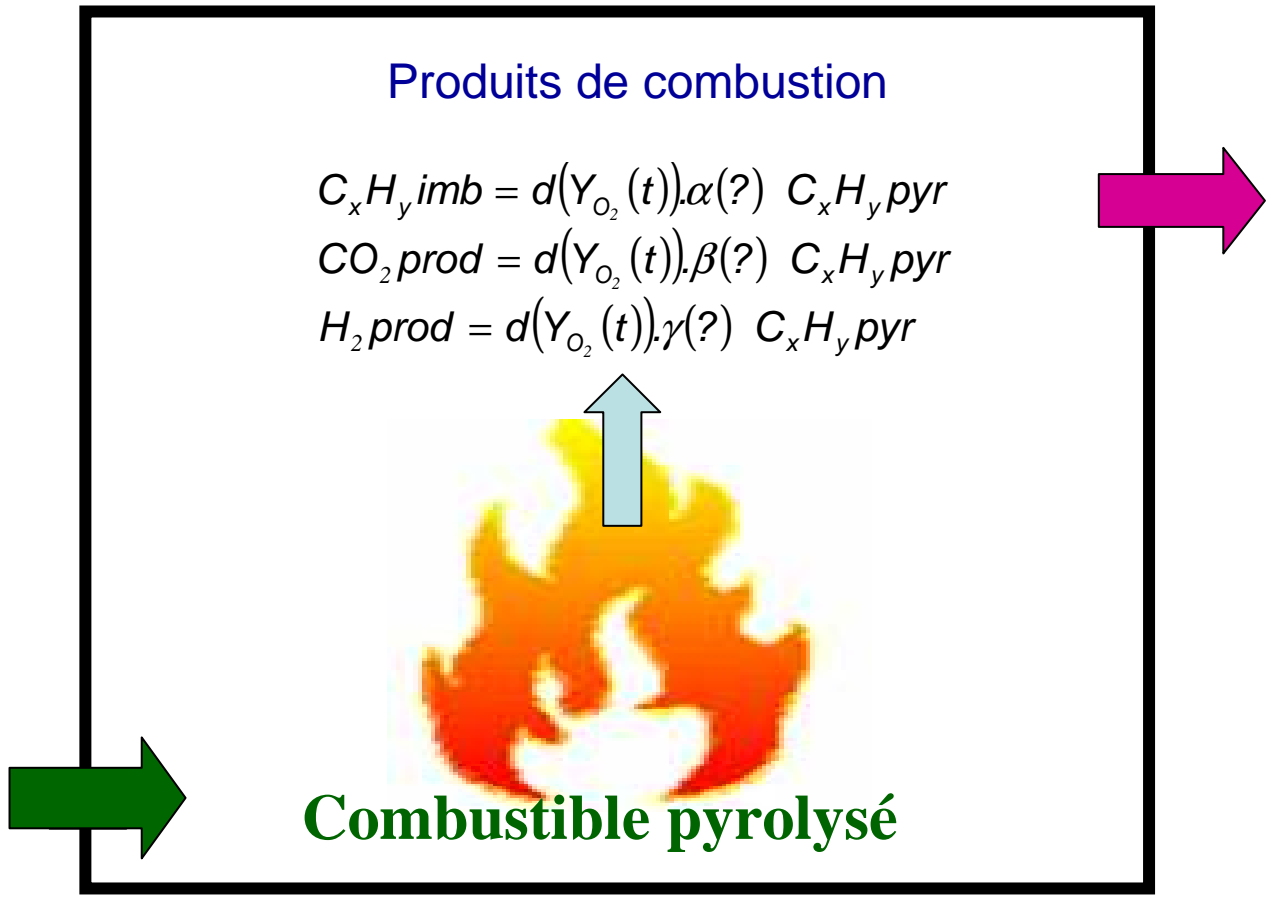
- i) Comburant suffisant => Feu contrôlé par le combustible
=> Peu de formation d'imbrulés
- ii) Comburant insuffisant => Feu contrôlé par la ventilation
=> Beaucoup de formation d'imbrulés
- iii) Consommation de combustible sur un intervalle de temps dt :

$$dM = C_x H_y \text{ cons} = \frac{\frac{dQ}{dt} \times dt}{\Delta H_c (C_x H_y)}$$

- iv) Consommation de l'oxygène :

$$\frac{dY_{O_2}(t)}{dt} = \frac{\dot{m}_{air}}{\rho(T)V} \cdot [Y_{O_2,\infty} - Y_{O_2}(t)] - \frac{\dot{Q}}{\rho(T)V\Delta H_{R,O_2}}$$

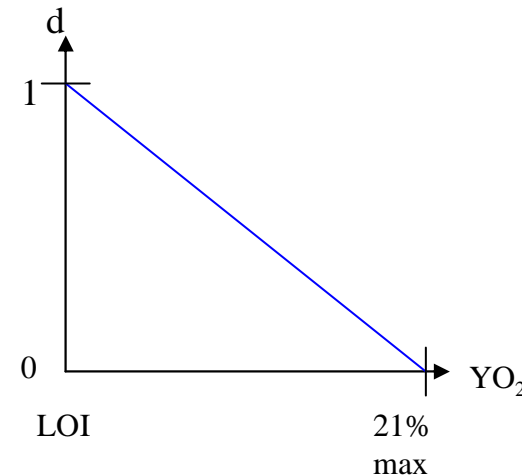
1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

Défaut en O₂ : (éq (1))

$$d(t) = \frac{Y_{O_2 \text{ crit}} - Y_{O_2}(t)}{Y_{O_2 \text{ crit}} - LOI}$$



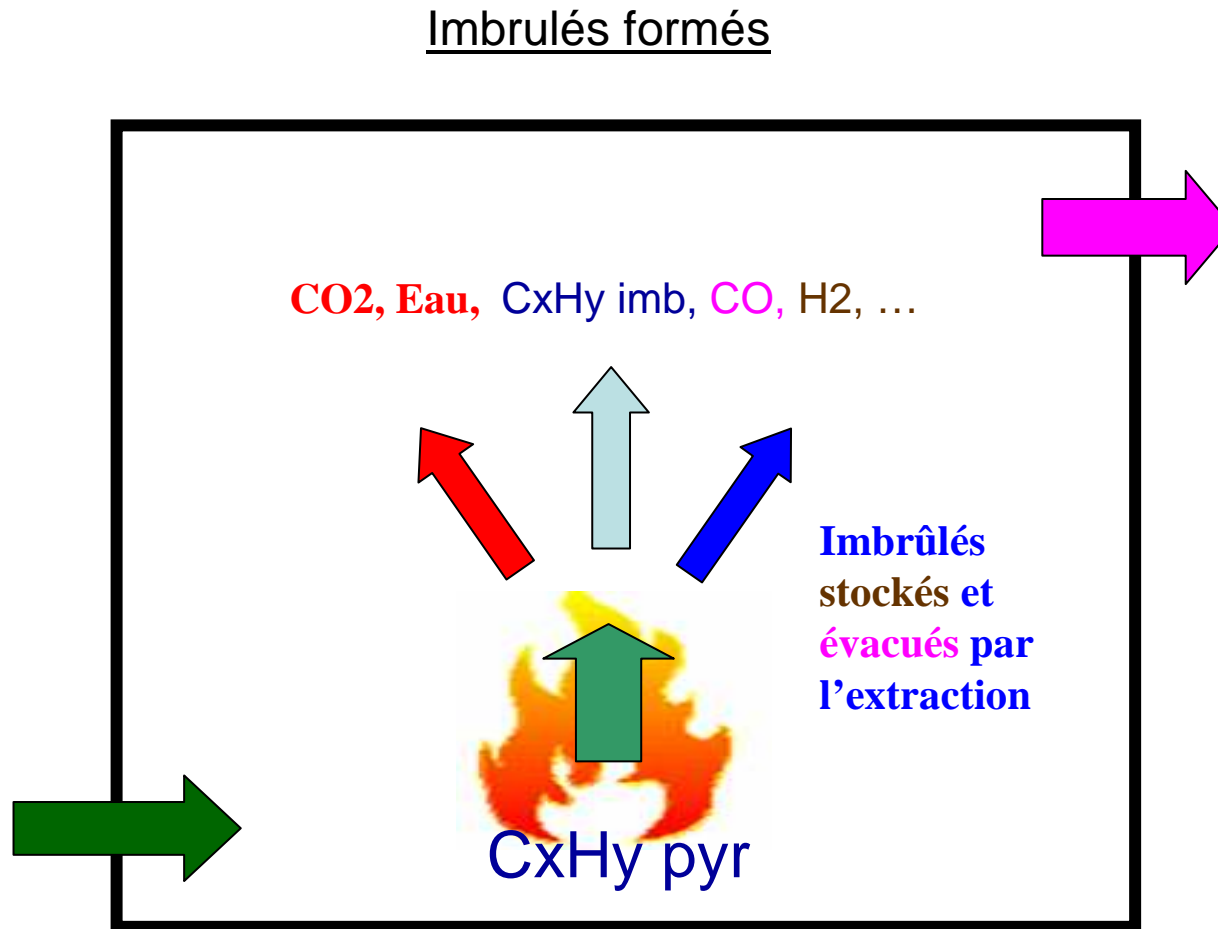
Production d'imbrulés et de nouvelles espèces chimiques :

$$C_xH_y \text{ imb} : \alpha(?) = \frac{l}{a}$$

$$CO_{\text{prod}} : \beta(?) = \frac{x}{b}$$

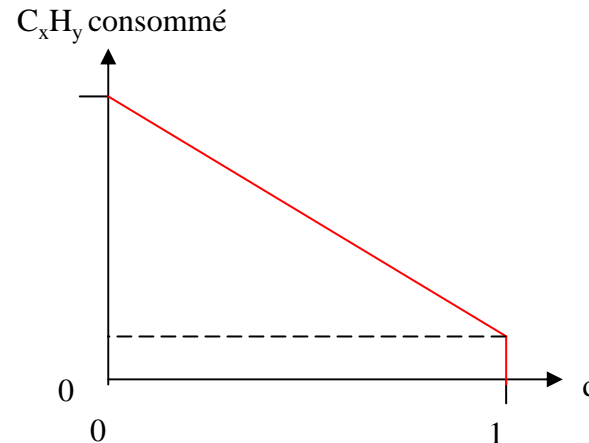
$$H_2_{\text{prod}} : \gamma(?) = \frac{y}{2c}$$

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

2.2 Modélisation de la combustion



En première approche, on suppose qu'il existe 3 constantes **a**, **b** et **c** telles que (éq. (2)) :

$$C_x H_y imb = \frac{d}{a} C_x H_y pyr$$

Le combustible consommé s'écrit donc : (éq. (3)):

$$C_x H_y cons = \left(1 - \frac{d}{a}\right) C_x H_y pyr$$

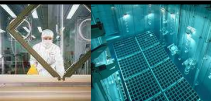
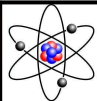
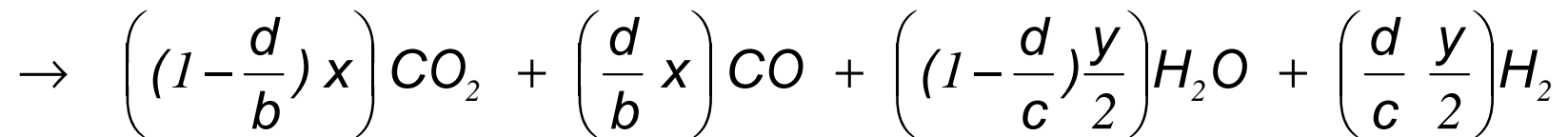
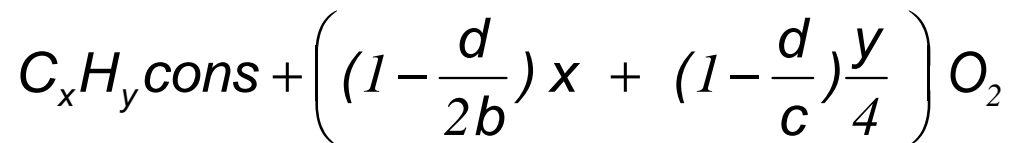
1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

$$CO_{prod} = \frac{d}{b} \cdot x \cdot C_x H_y cons \quad (\text{éq. (4)})$$

$$CO_2_{prod} = \left(1 - \frac{d}{b} \right) \cdot x \cdot C_x H_y cons \quad (\text{éq. (5)})$$

$$H_2_{prod} = \frac{d}{c} \cdot \frac{y}{2} \cdot C_x H_y cons \quad (\text{éq. (6)})$$

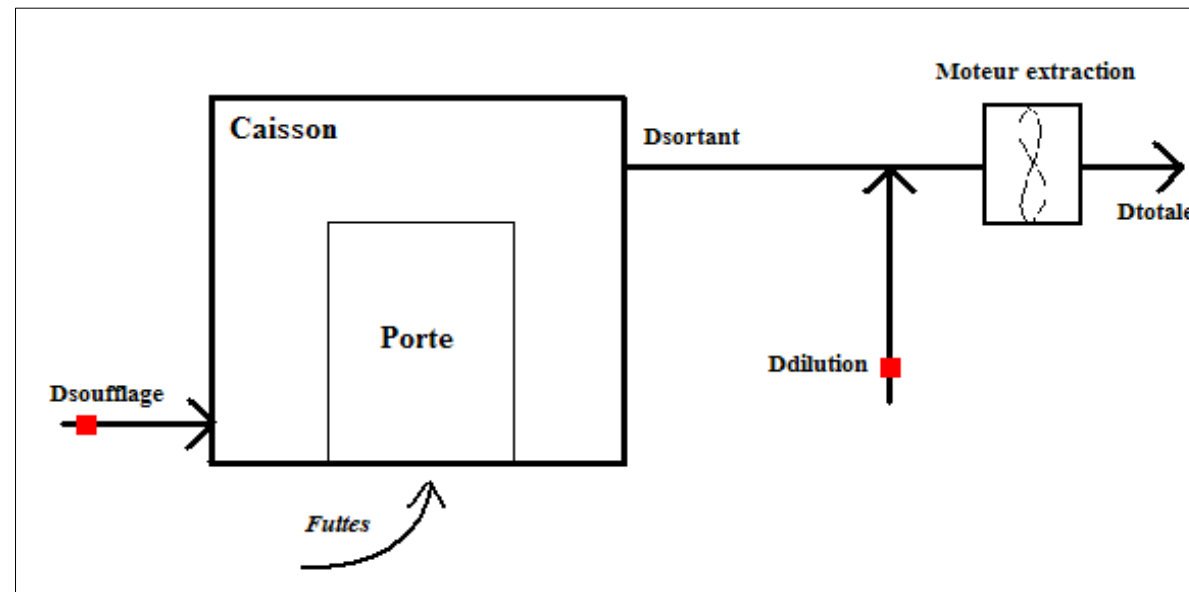
On en déduit l'équation de réaction (éq. (7)) :



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

2.3 Comparaison simulations / essais

Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les essais (CNRS / LCD)

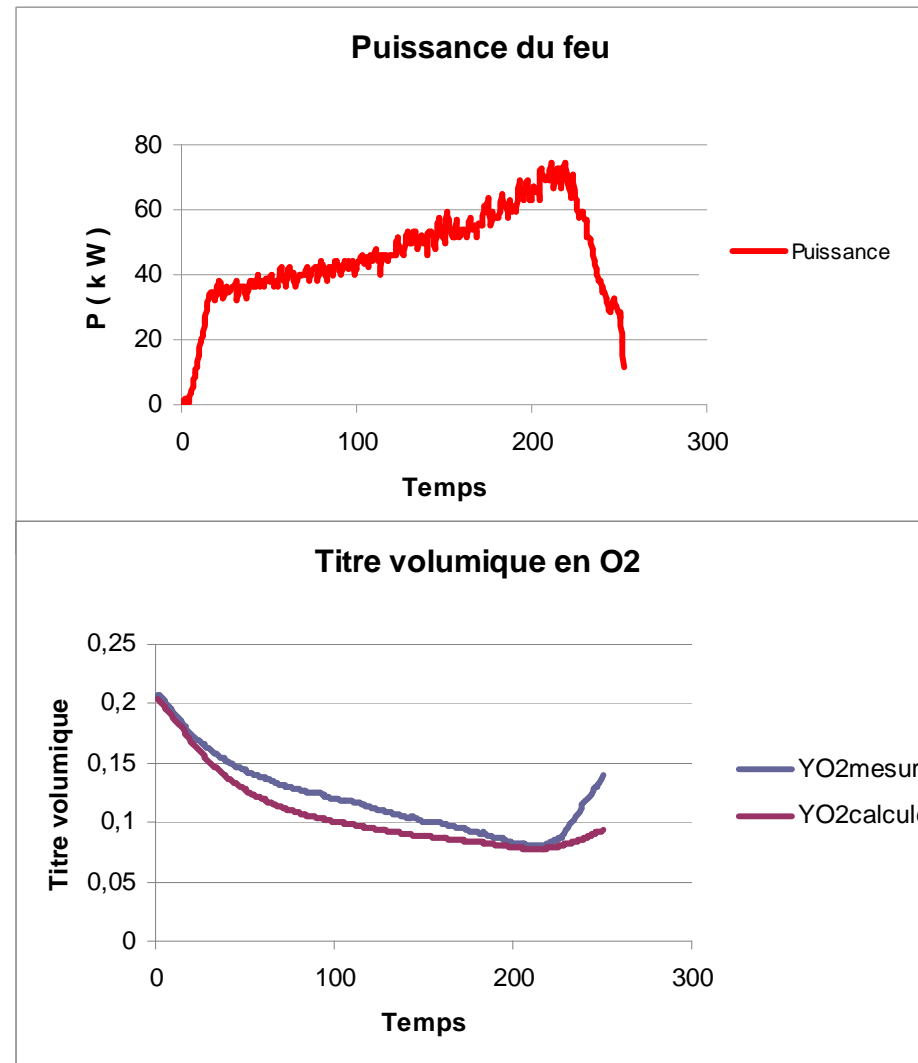


1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

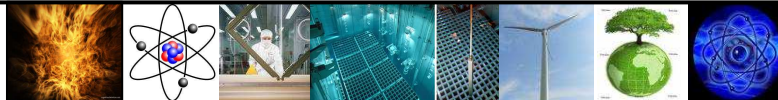
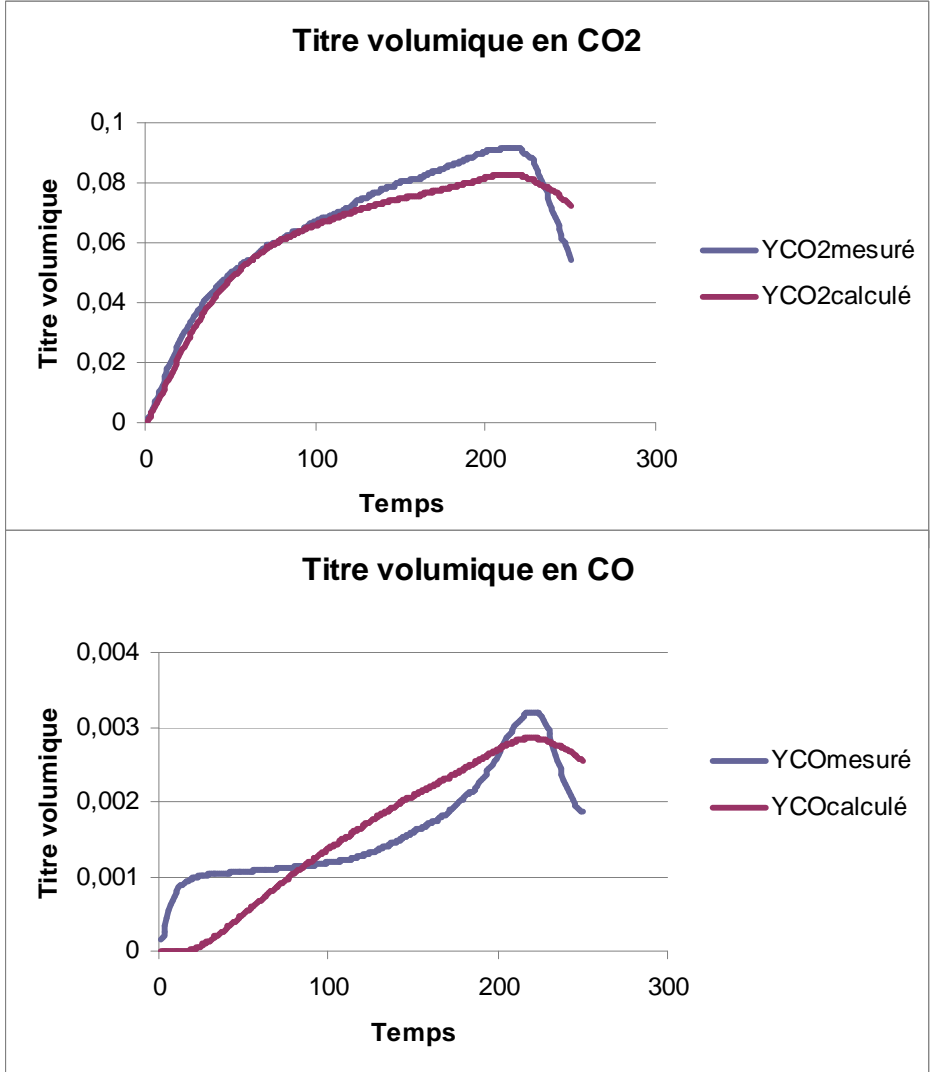
Essai Dodécane D14 :

- Parois : béton siporex
- Renouvellement horaire : $R_h = 5$
- Volume = 8 m^3
- Coefficients : $a = 1.5$ $b = 25$ $c = 2$

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

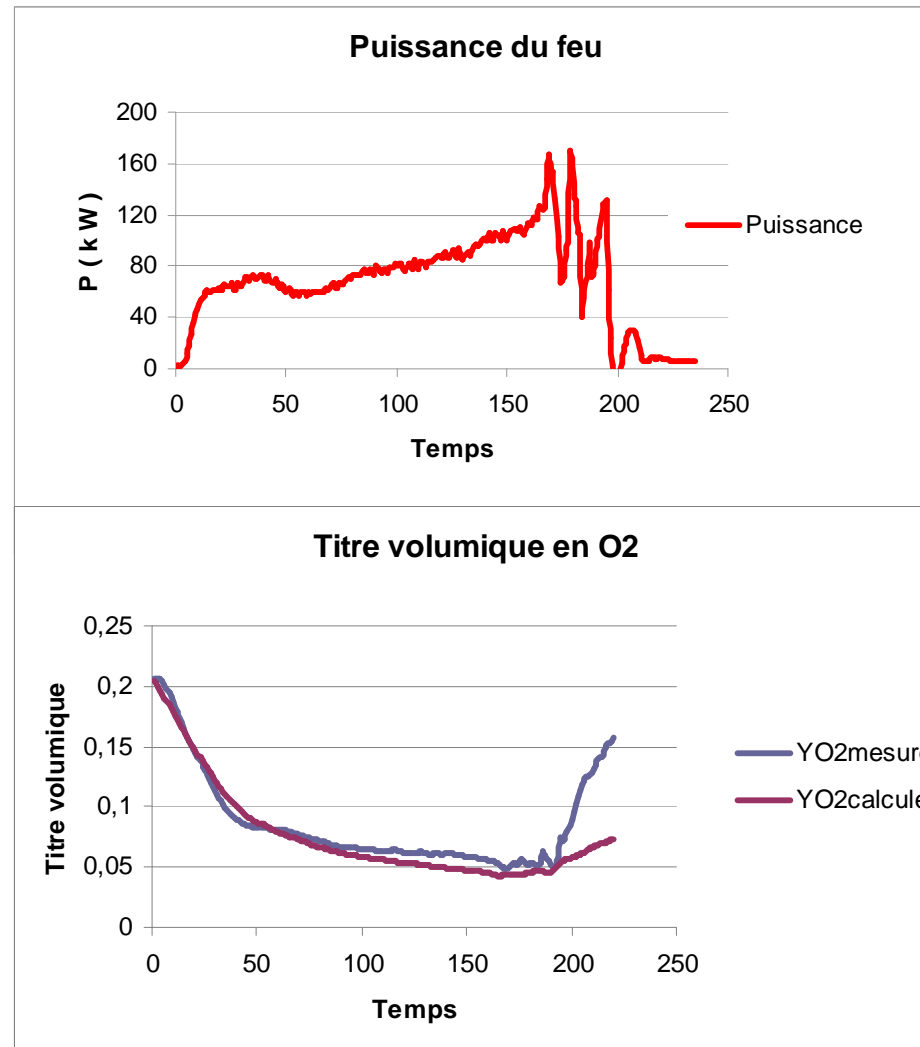


1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

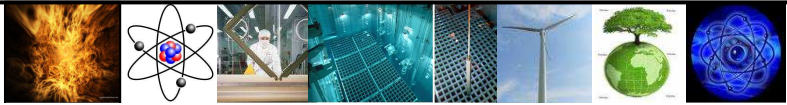
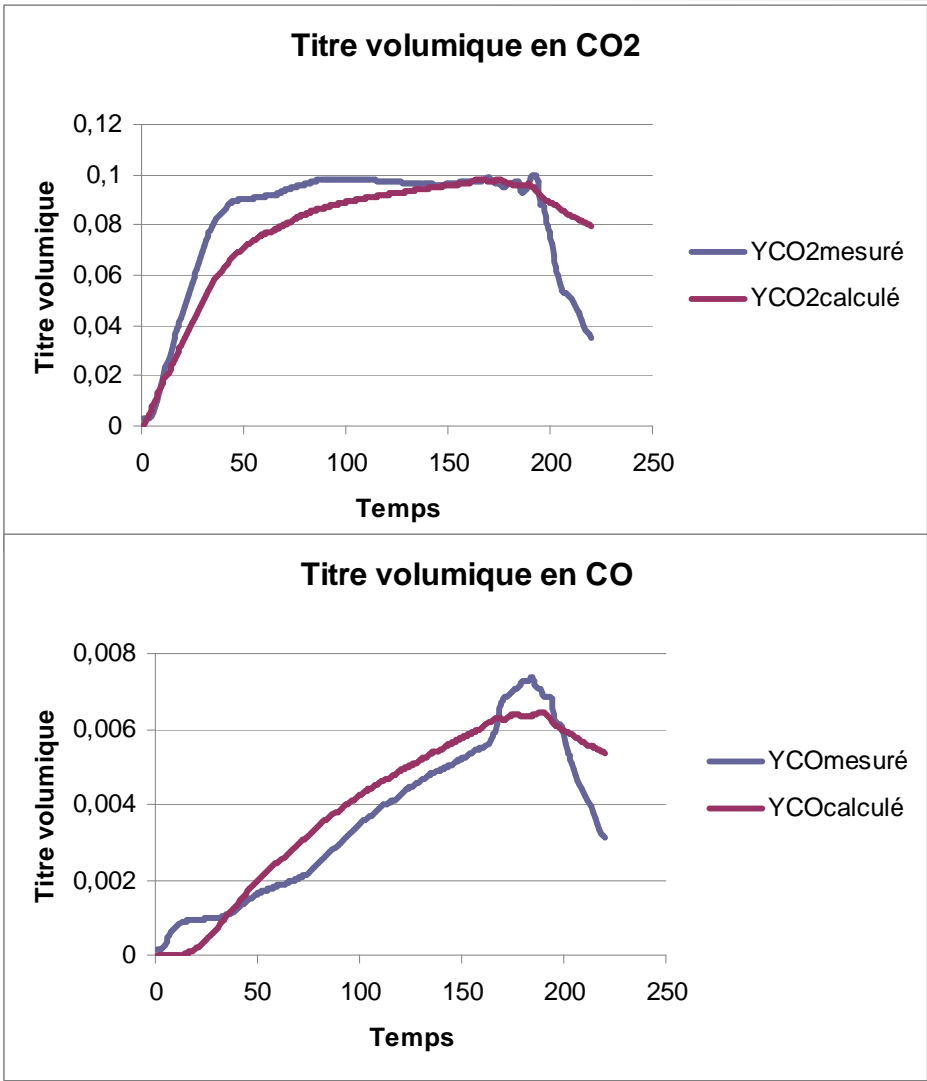
Essai Heptane D17 :

- Parois : béton siporex
- Renouvellement horaire : $R_h = 3$
- Volume = 8 m^3
- Coefficients : $a = 1.3$ $b = 14$ $c = 2$

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

Tableau récapitulatif des données principales

	Rh	a	b	c
Dodécane	3	1.3	25	2
	5	1.5		
Heptane	3	1.3	14	
	5	1.5		

Premières observations

- Résultats encourageants
- Faible dépendance entre Rh et coefficient « a » (combustible imbrulé)
- Indépendance entre la nature du combustible et coefficient « b »
- Forte dépendance entre la nature du combustible et coefficient « b » (formation de CO)

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. **Température des gaz d'extraction**

3. Risque d'explosion des gaz au niveau de l'extraction

3.1 Position du problème

3.2 Modélisation

3.2.1 Bilan thermique

3.2.2 Paramètres d'entrées

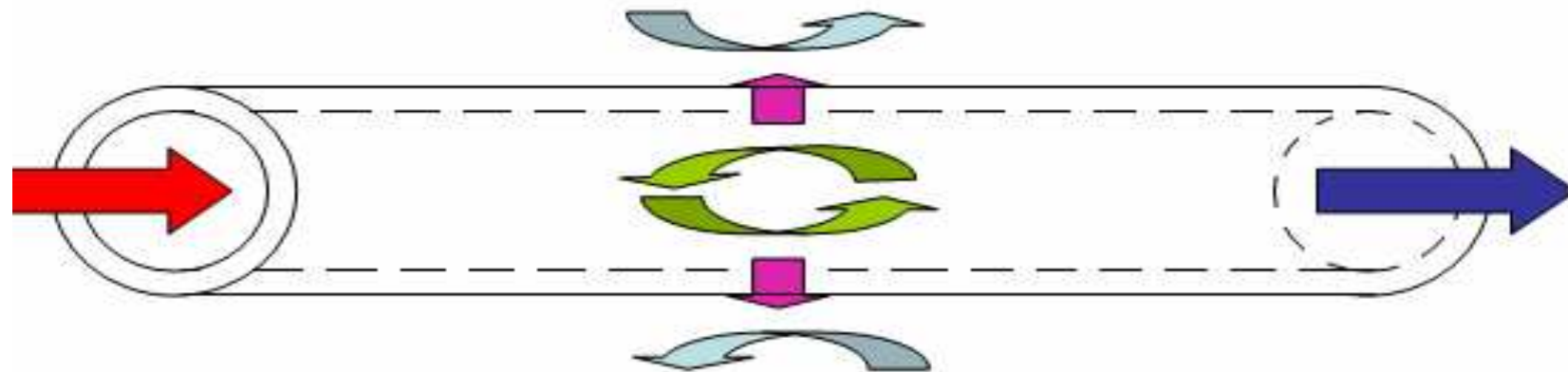
3.3 Comparaison simulations / essais

3.4 Application au logiciel CDI

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

3.1 Position du problème

Déterminer la **température** et la **vitesse** du gaz dans le **conduit d'extraction** afin d'évaluer le risque de **ré-inflammation** des imbrulés extraits **au niveau de la dilution**



Convection externe

Q_{ext}



Convection interne

Q_{int}



Conduction dans la paroi

Q_{cond}

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

3.2 Modélisation

3.2.1 Echange thermique

- Echange convectif interne

$$Q_i = h_i \times 2\pi R_i dx \times (T_{pi}(x) - T_i(x))$$

- Echange conductif :

$$Q_c = \frac{2\pi dx \times \lambda_m}{\ln \frac{R_e}{R_i}} \times (T_{pi}(x) - T_{pe}(x))$$

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

- Echange convectif externe:

$$Q_e = h_e \times 2\pi R_e dx \times (T_{pe}(x) - T_e)$$

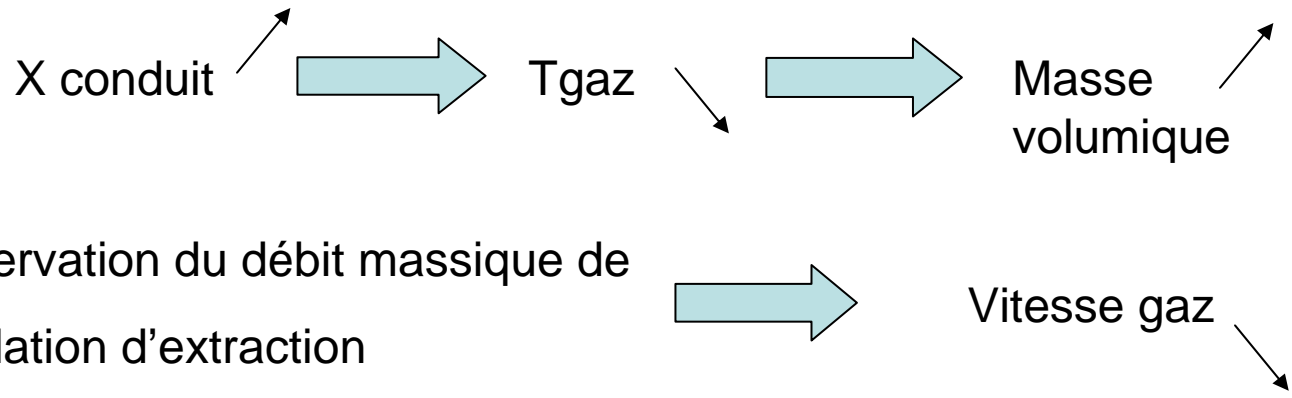
- Echange global:

$$Q_f = \dot{m} \times c_{p_f} \times (T_i(x) - T_i(x + dx))$$

- Bilan thermique

$$Q_f = Q_c = Q_i = Q_e$$

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction



Observations

Décroissance de la vitesse dans le sens de l'écoulement → limitation du transport des particules

Conséquence pour la sûreté

Système de ventilation d'extraction peu sollicité en température, pression et colmatage des filtres limité



1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

3.2.2 Paramètres d'entrées

- Température et vitesse des gaz à la sortie du local
- Température extérieure supposée constante
- Coefficient d'échange par convection extérieure calculé
- Coefficient d'échange par convection intérieure forfaitaire
- Caractéristiques thermomécaniques du conduit , longueur, rayons interne/externe

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

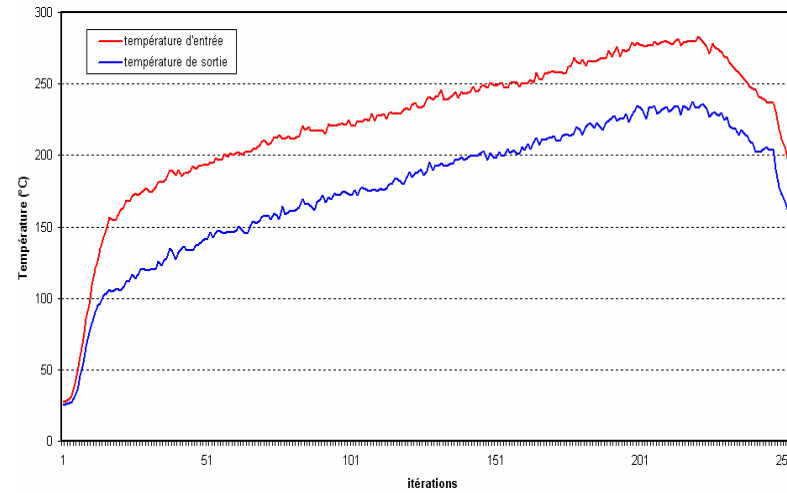
3.3 Comparaison simulations / essais

Essai Dodécane D14 :

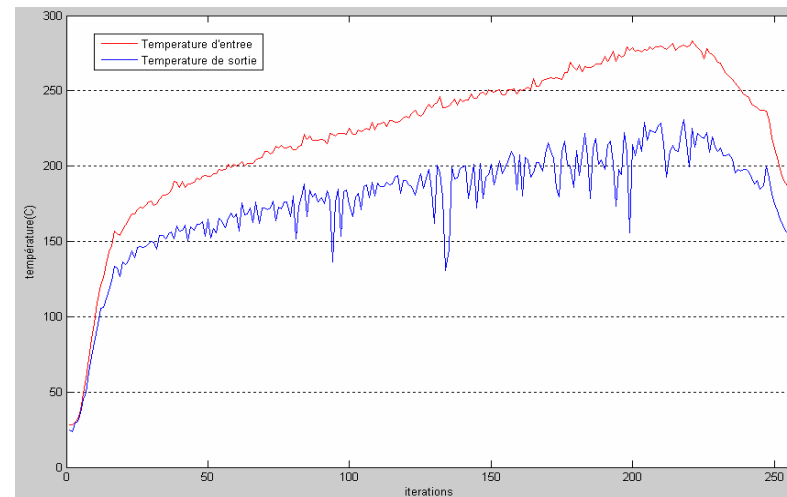
- Parois : béton siporex
- Renouvellement horaire : $R_h = 5$
- Volume = 2.8 m^3
- Température et vitesse expérimentales à l'entrée de l'extraction

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

Essai expérimental:



Simulation:



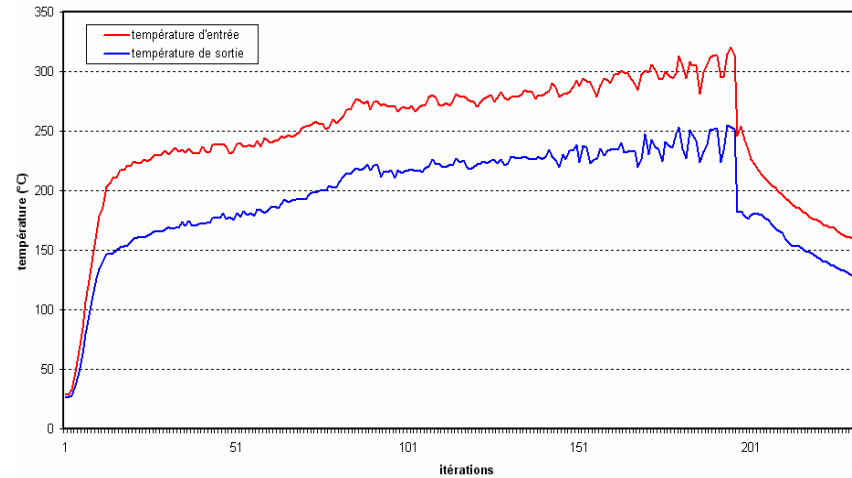
1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

Essai Heptane D17 :

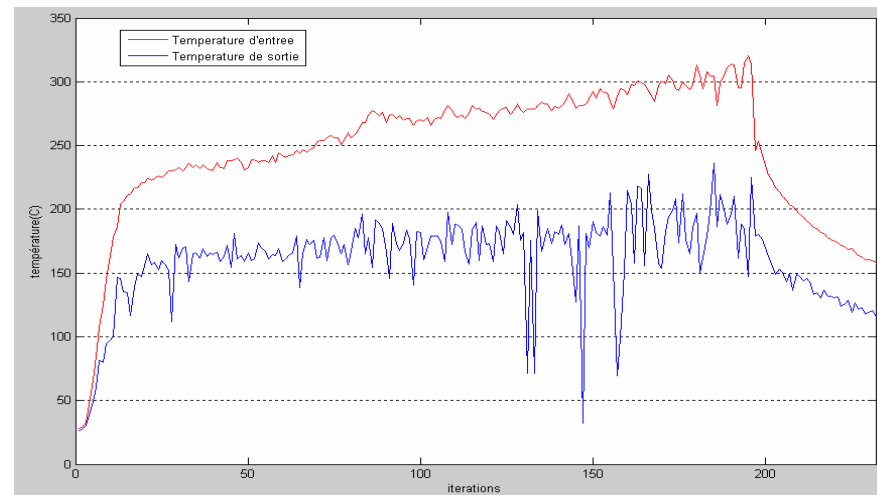
- Parois : béton siporex
- Renouvellement horaire : $Rh = 3$
- Volume = 8 m^3
- Température et vitesse expérimentales à l'entrée de l'extraction

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

Essai expérimental:



Simulation:

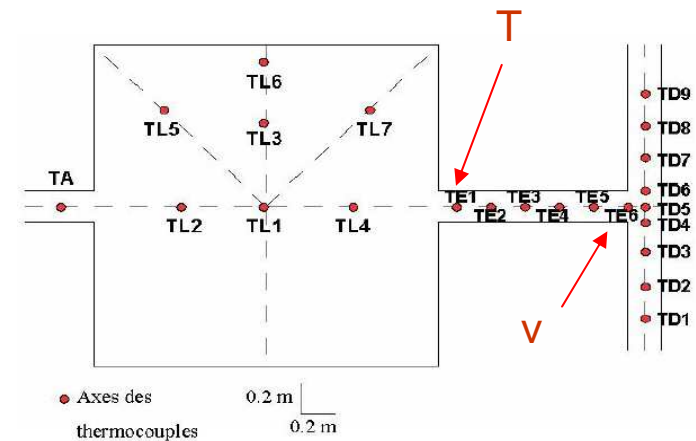
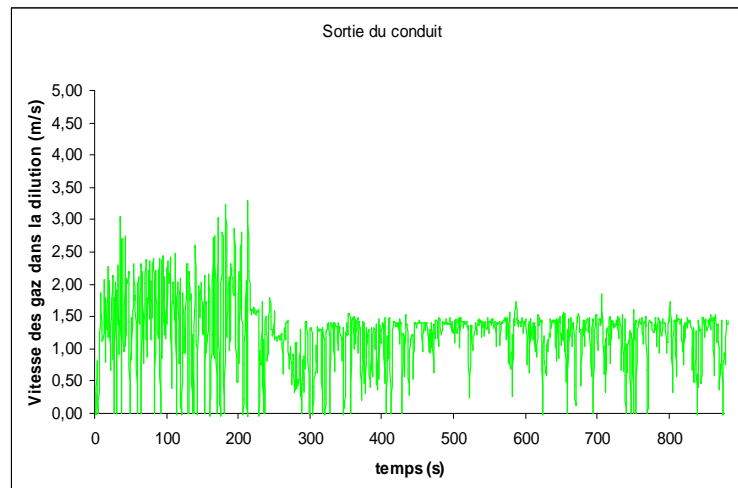


1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

Observation : Température légèrement sous-estimée

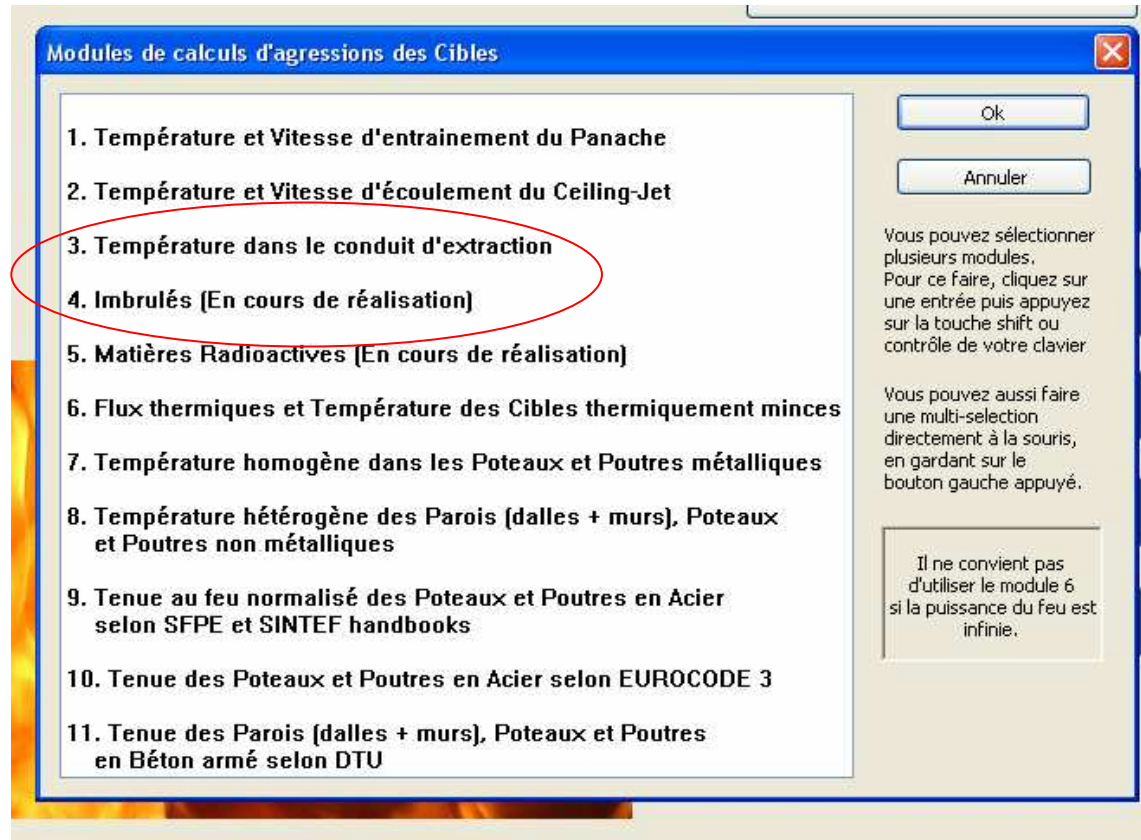
Interprétation :

- Utilisation des résultats bruts avec présence de Turbulence
- Vitesse utilisée dans simulation est celle au niveau de la dilution et non à la sortie du conduit



- 1. Problématique
- 2. Formation des imbrulés
- 3. Température des gaz d'extraction

3.4 Introduction des modèles dans le logiciel CDI



Modules de calculs d'agressions des Cibles

1. Température et Vitesse d'entrainement du Panache
2. Température et Vitesse d'écoulement du Ceiling-Jet
3. Température dans le conduit d'extraction
4. Imbrulés (En cours de réalisation)
5. Matières Radioactives (En cours de réalisation)
6. Flux thermiques et Température des Cibles thermiquement minces
7. Température homogène dans les Poteaux et Poutres métalliques
8. Température hétérogène des Parois (dalles + murs), Poteaux et Poutres non métalliques
9. Tenue au feu normalisé des Poteaux et Poutres en Acier selon SFPE et SINTEF handbooks
10. Tenue des Poteaux et Poutres en Acier selon EUROCODE 3
11. Tenue des Parois (dalles + murs), Poteaux et Poutres en Béton armé selon DTU

Ok

Annuler

Vous pouvez sélectionner plusieurs modules. Pour ce faire, cliquez sur une entrée puis appuyez sur la touche shift ou contrôlez de votre clavier.

Vous pouvez aussi faire une multi-sélection directement à la souris, en gardant sur le bouton gauche appuyé.

Il ne convient pas d'utiliser le module 6 si la puissance du feu est infinie.

1. Problématique
2. Formation des imbrulés
3. Température des gaz d'extraction

Température dans le conduit d'extraction

Emplacement de la sortie du local (conduit d'extraction)

Moyenne Zone chaude Impact Panache/Plafond
 Panache Ceiling-Jet Côte de la cible : 2. m
 Fichier Extérieur : D:\Documents and Settings\al219524\Bureau\Release\Exemple Parcourir

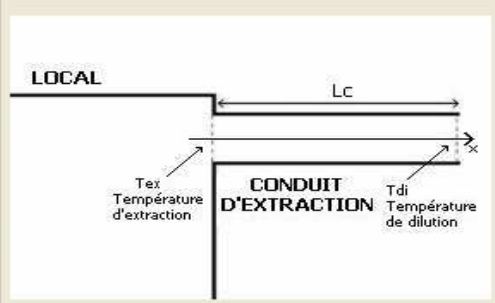
Caractéristiques du conduit

Conductivité thermique (K) : 1.51e-002 kW/m/K
 Masse Volumique (RHO) : 7833. kg/m³
 Chaleur spécifique (Cp) : 0.46 kJ/kg/K
 Base de données Métal

Longueur du conduit (jusqu'au point de dilution) : 10. m
 Epaisseur du conduit : 1. mm
 Coefficient d'échange thermique intérieur par convection : 2.5e-002 kW.m⁻².K⁻¹
 Coefficient d'échange thermique extérieur par convection :
 Valeur constante au long du conduit : 1.e-002 kW.m⁻².K⁻¹
 Valeur calculée par CDI au long du conduit.

Abscisse des points dans le conduit (pour le tracé des courbes) :
Exemple : 4/ ou 5/6/9/

Annuler Calcul



Conclusion (1/2)

I. Points forts

Le premier modèle proposé permet :

- 1 – une première approche (consommation de l'oxygène, **Composition chimique**, **Température des gaz**, ...) du **risque de ré-inflammation** dans le local et conduit de ventilation jusqu'à dilution
- 2 – une **compréhension des phénomènes physiques** durant un feu pour **le pilotage de la ventilation** et l'évaluation des **risques de colmatage des filtres**

Conclusion (2/2)

II. Point à compléter : risque d'explosion dans le compartiment

Il reste à améliorer un modèle de puissance du feu et de température moyenne associée en phase d'extinction, permettant de modéliser la dépression dans le compartiment avec prise compte des pertes de charge.

Ce phénomène, induisant une entrée d'air, peut provoquer une « explosion » dans le compartiment.

III. Point à améliorer : risque d'explosion dans le conduit d'extraction

Le modèle proposé nécessite des approfondissements, par prise en compte des phénomènes non-linéaires notamment, et tests complémentaires sur d'autres :

- 1 – combustibles : huiles, TBP-TPH, Polymères ...
- 2 – types de locaux : dimensions, nature des parois ...
- 3 – configurations : ventilation naturelle, ventilation mixte ...