

Les Feux Confinés Les codes à zones



Dr Christine LALLEMAND



DGA Techniques navales

Groupe Prévention et Lutte contre les Sinistres



La modélisation d'un incendie en milieu confiné

Les modèles à zones - Plan

- 1) Les Modèles et Logiciels - Généralités
- 2) Les Modèles de feux en milieu confiné
- 3) Les Modèles de zones
 - Hypothèses de base
 - Bilans masse et énergie simplifiés
 - Bilans masse, énergie et qdm - Cas général
 - Le modèle à 2 zones ŒIL - Présentation
- 4) La validation/qualification des simulations/modèles
 - Le modèle à 2 zones ŒIL - Validation
- 5) L'analyse de sensibilité - Complément à la validation des modèles
 - Le modèle à 2 zones ŒIL et le code 3D SAFIR
- 6) Application d'un modèle à zones sur un programme de Navire
- 7) La Maîtrise des Risques à bord des Navires - Les outils de simulation numérique
- 8) Conclusions et perspectives

Modèles et Logiciels - Généralités

- Un modèle est une représentation approchée d'un ensemble de phénomènes, effectuée à l'aide d'équations et de relations mathématiques basées sur des hypothèses. Par ex : considérer les gaz comme parfaits permet d'exploiter la relation $P = \rho R T$
- Les connaissances et hypothèses sont issues des sciences « dures » ou empiriques. La modélisation se situe ainsi à côté de la théorie et l'expérience et permet d'aboutir au Logiciel (codage informatique) avec lequel on effectuera les simulations numériques
- Pour réaliser un modèle, il est important :
 - de bien identifier les phénomènes qu'on souhaite représenter et simuler avec le Logiciel
 - de respecter une certaine homogénéité dans la complexité de représentation des phénomènes retenus (ne retenir que ce qui est suffisant pour l'objectif fixé).

Modèles de feu en milieu confiné

- L'application du modèle est la simulation d'aspects du feu que l'on veut considérer et que l'on sait décrire, tout au moins approximativement
- S'agissant de prévoir les grandeurs concernant la sécurité, un modèle global de feu en confiné ne prendra en compte que ce qui est utile. Il ne peut être à la fois « pointu » en combustion, en thermique, en écoulement fluide, Même s'il se doit de respecter les grands principes de ces disciplines. Les couplages mathématiques entre les équations figurent les couplages entre les phénomènes
- Les grandeurs calculées en fonction du temps sont :
 - La température de l'air, des gaz chauds (ou brûlés), celle des solides exposés (combustibles, parois, cibles)
 - La concentration d'espèces chimiques, les masses volumiques partielles
 - La hauteur sous la couche de fumée pour les modèles supposant une stratification ou pour les modèles plus fins, les champs de température et de concentrations
- Ainsi selon la « précision » du modèle, on aura pour une grandeur donnée soit la valeur moyenne dans une zone ou selon une verticale (plusieurs zones) pour les modèles de zones soit un champ de valeurs selon 2 ou 3 dimensions pour les modèles champs.

Modèles à zones - Hypothèses de base (1)

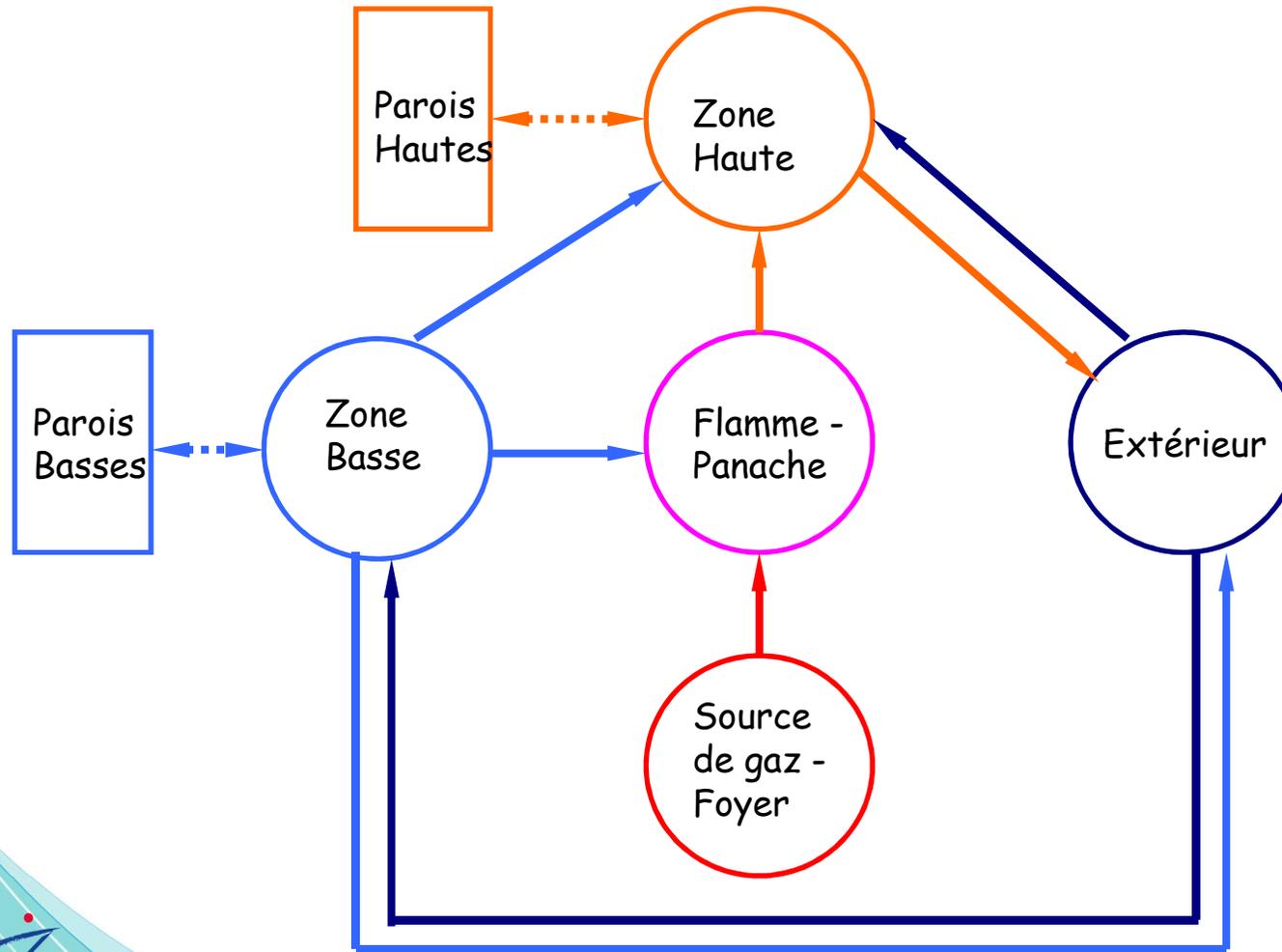
- Les modèles dits à « zones » sont très utilisés en ingénierie incendie du fait de la relative modestie des moyens informatiques nécessaires et de la connaissance disponible sur les qualités et les limites de ces modèles
- Ils reposent sur un maillage en zones :
 - Découpage d'un local en zones issu de l'observation que les gaz chauds issus d'un foyer s'accumulent sous le plafond délimité par une frontière « horizontale » sous laquelle se situe l'air frais. Hypothèse valable dans des locaux parallélépipédiques et pour des foyers suffisamment puissants situés en partie basse.
 - Une zone est donc soit un volume ou une surface où l'on admet l'uniformité des grandeurs caractéristiques du modèle
 - Pour chaque zone volumique, on suppose qu'en chaque point : température, composition des espèces gazeuses, opacité, ..., sont identiques. Les frontières du volume sont soit imposées matériellement (plafond, parois), soit définies par hypothèse (interface entre zone chaude et zone froide)
 - Les zones surfaciques sont celles des solides (parois, plafond, plancher) ou celles virtuelles permettant de délimiter les zones de gaz

Modèles de zones - Hypothèses de base (2)

- Ils reposent sur des échanges dans les zones et entre zones :
 - Des bilans (matière, espèces, énergie) sont effectués dans les zones volumiques considérées comme des volumes de contrôle :
 - Les zones de gaz (zone basse z_b , zone haute z_h , zone de flamme et panache, zones extérieures),
 - Les zones de surfaces représentent le combustible (masse et énergie), les parois (énergie)
 - Le remplissage de la zone haute se fait par apport de masse d'espèces chimiques venant des flammes et panaches thermiques, d'air venant de l'extérieur par les ouvertures (selon le rapport des pressions et la taille de l'ouverture). Le vidage de la zone haute se fait par les ouvertures.
 - La zone basse reçoit de l'air provenant de l'extérieur par les ouvertures, elle perd matière et énergie du fait d'une partie de l'air entraîné par les flammes et les panaches
 - Les zones de flamme et de panache sont donc les canaux qui permettent d'alimenter en masse et en énergie la zone haute. Ils sont modélisés eux aussi comme des volumes de contrôle dans lesquels on effectue des bilans matière et énergie.

Modèles de zones - Hypothèses de base (3)

- Diagramme des échanges entre zones dans un local en feu :

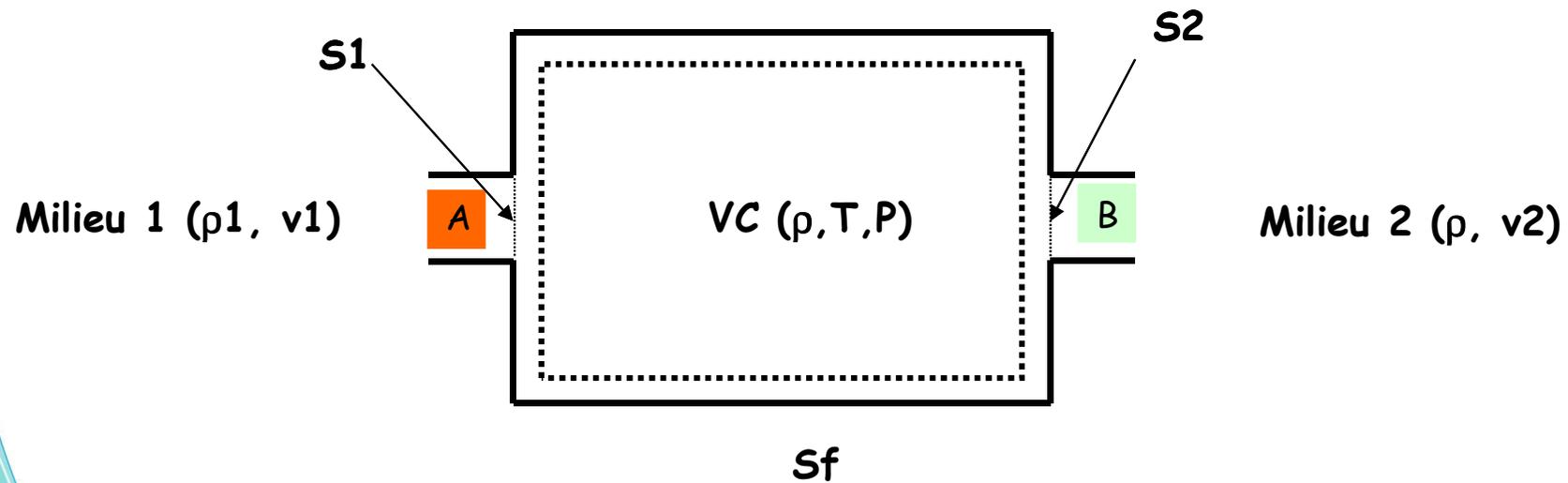


Modèles de zones - Hypothèses de base (5)

- Hypothèses de stationnarité :
 - Certaines lois empiriques utilisées sont en fait tirées d'expériences en conditions stationnaires. Par ex, les lois d'entraînement d'air dans le panache.
 - D'autres modèles considèrent même que la variation de masse et d'énergie dans le local est nulle, les équations différentielles sont alors des équations algébriques mais quid de la représentativité de ce type de modèle pour représenter des phénomènes instationnaires.
- Hypothèses sur le transport de masse par les ouvertures :
 - Il se fait entre zones conformément au découpage précédent. Le monde extérieur est une zone (ou 2 zones) à part entière, caractérisée par une température, une composition (en général de l'air).
 - En ventilation naturelle :
 - En calculant les débits gazeux aux ouvertures à partir du rapport des pressions intérieure et extérieure au local (Loi de Bernoulli ou autre)
 - En ventilation forcée :
 - En se donnant un débit volumique de soufflage ou d'extraction et/ou en modélisant le circuit de ventilation

Bilans masse et énergie simplifiés (1)

- Écriture des bilans sur une zone volumique :



Volume de Contrôle VC de gaz, de surface fixe Sf et de sections d'ouverture S1 et S2

Hyp :
 $m_{A,t}$ rentre dans V par S1 en Δt
 $m_{B,t}$ sort de V par S2 en Δt
Gaz parfaits

Bilans masse et énergie simplifiés (2)

- Bilan sur la masse :

- A t , on a : $m_{VC,t} = m_{MC,t} + m_{A,t}$ masse de contrôle à l'instant t
 $m_{B,t} = 0$ (m_B n'est pas sortie de VC)

- A $t + \Delta t$, on a : $m_{VC,t+\Delta t} = m_{MC,t+\Delta t} - m_{B,t+\Delta t}$ masse de contrôle à l'instant $t + \Delta t$
 $m_{A,t+\Delta t} = 0$ (m_A est entrée dans VC)

Or par définition de la masse de contrôle : $m_{MC,t+\Delta t} = m_{MC,t}$

soit : $m_{VC,t+\Delta t} - m_{A,t+\Delta t} + m_{B,t+\Delta t} = m_{VC,t} - m_{A,t} + m_{B,t}$

d'où : $\Delta m_{VC}/\Delta t = \Delta m_A/\Delta t - \Delta m_B/\Delta t$

soit encore en faisant tendre Δt vers 0 : $dm_{VC}/dt = m^{\circ}_1 - m^{\circ}_2$

(par convention de signe, ce qui rentre dans VC est positif, ce qui en sort est négatif)

Bilans masse et énergie simplifiés (3)

- Bilan sur l'énergie (ou bilan « enthalpique »):

- On applique le 1er principe : $\Delta U_{MC} = U_{MC,t+\Delta t} - U_{MC,t} = \Delta Q + \Delta W$
où ΔQ chaleur nette apportée dans VC et ΔW travail mécanique des gaz

- A t , on a : $U_{B,t} = 0$ et à $t + \Delta t$, on a : $U_{A,t+\Delta t} = 0$

d'où : $\Delta U_{VC}/\Delta t = \Delta U_{MC}/\Delta t + \Delta U_A/\Delta t - \Delta U_B/\Delta t$

soit encore en faisant tendre Δt vers 0 : $dU_{VC}/dt = dU_{MC}/dt + dU_A/dt - dU_B/dt$

- On a aussi $dU_{MC}/dt = Q^\circ + W^\circ$. Si on tient compte uniquement des forces de pression sur S_1 et S_2 , $W^\circ = P_1 v_1 S_1 - P v_2 S_2$ avec $m^\circ_1 = \rho_1 v_1 S_1$ et $m^\circ_2 = \rho v_2 S_2$
d'où : $W^\circ = m^\circ_1 P_1/\rho_1 - m^\circ_2 P/\rho$ et puisque $dU_A/dt = m^\circ_1 u_1$ et $dU_B/dt = m^\circ_2 u$
avec u_1 et u représentant les énergies internes massiques ($u = c_v T$)

On arrive à : $dU_{VC}/dt = Q^\circ + m^\circ_1 (u_1 + P_1/\rho_1) - m^\circ_2 (u + P/\rho)$

soit en gaz parfaits : $dU_{VC}/dt = Q^\circ + m^\circ_1 h_1 - m^\circ_2 h$

où h_1 et h représentant les enthalpies massiques qui peuvent s'exprimer en fonction de la température et du c_p des gaz $h = c_p T$

Bilans masse, énergie et qdm - Cas général (1)

1-Conservation du débit pour une espèce donnée

Variation de masse = débit entrant - débit sortant + sources internes

$$\frac{dm}{dt} = m_e^{\circ} - m_s^{\circ} + m_i^{\circ} \quad (1)$$

$$m = \rho \times V$$

$$m_e^{\circ} = \rho_e \times a_e \times u_e$$

$$m_s^{\circ} = \rho_s \times a_s \times u_s$$

$$m_i^{\circ} : \text{source}$$

Bilans masse, énergie et qdm - Cas général (2)

2-Conservation de l'énergie pour une espèce donnée

Variation d'énergie interne = débit d'énergie interne entrant - débit d'énergie interne sortant
+ débit d'énergie interne des sources + travail des forces extérieures (ouvertures)
+ travail du à la variation de volume (parois) + chaleur échangée avec l'extérieur (1er principe)

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_e \times E_e - \dot{m}_s \times E_s + \dot{m}_i \times E_i + \frac{\dot{m}_e}{\rho_e} \times P_e - \frac{\dot{m}_s}{\rho_s} \times P_s + \frac{\dot{m}_i}{\rho_i} \times P_i - P \times \frac{dV}{dt} + \dot{Q}$$

$$\dot{m}_x \times E_x + \frac{\dot{m}_x}{\rho_x} \times P_x = \dot{m}_x \times h_x \quad \text{débit enthalpique}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_e \times h_e - \dot{m}_s \times h_s + \dot{m}_i \times h_i - P \times \frac{dV}{dt} + \dot{Q} \quad (2)$$

Bilans masse, énergie et qdm - Cas général (3)

Expression générale de l'enthalpie massique (pesanteur(+ g z) négligée) exprimée en Joules/kg :

$$h(T) = q + c_p \times T + \frac{1}{2}u^2$$

*avec q : chaleur de formation ramenée à 0 K indépendante de T
et Q = -pth(t) : pertes thermiques avec l'extérieur*

Expression générale de l'énergie interne (pesanteur(+gz) négligée) exprimée en Joules :

$$E(T) = m \left(q + c_v \times T + \frac{1}{2}u^2 \right)$$

Bilans masse, énergie et qdm - Cas général (4)

Avec les expressions précédentes, (2) devient :

$$\frac{d \left[m \left(c_v \times T + \frac{1}{2} u^2 \right) \right]}{dt} = m_e^\circ \times \left(c_p \times T_e + \frac{1}{2} u_e^2 \right) - m_s^\circ \times \left(c_p \times T_s + \frac{1}{2} u_s^2 \right) \quad (2bis)$$
$$+ m_i^\circ \times \left(c_p \times T_i + \frac{1}{2} u_i^2 \right) - P \times \frac{dV}{dt} - pth(T)$$

(2bis) est une équation indépendante de q puisque l'on considère une espèce unique en entrée, en sortie et la source, donc avec la même q ; dans le cas contraire il faudrait conserver (2) avec $q = q_e, q_s$ ou q_i ; de même $c_p = c_{pe}, c_{ps}$ ou c_{pi} , les c_p pouvant dépendre de T

3-Equation d'état pour une espèce donnée

Comme équation de fermeture, on prend le plus souvent l'équation des gaz parfaits :

$$P \times V = m \times r \times T \quad (3)$$

$$P = \rho \times r \times T \quad (3bis)$$

Bilans masse, énergie et qdm - Cas général (5)

4-Equation de qdm pour une espèce donnée (si 1 D réaliste)

Variation de qdm = débit qdm entrant - débit qdm sortant + sommes des forces extérieures s'exerçant sur le fluide (au niveau des ouvertures et réaction parois sur fluide : fr)

$$\frac{d(m \times u)}{dt} = qdm_e - qdm_s + \sum F_{ext} \qquad \frac{d(m \times u)}{dt} = m_e \times u_e - m_s \times u_s + \sum F_{ext}$$

$$\sum F_{ext} = p_e \times a_e - p_s \times a_s - p \times (a_e - a_s)$$

$p \times (a_e - a_s)$ représente la réaction des parois sur le fluide contenu dans le volume soit si l'on suppose qu'il n'y a ni frottement, ni viscosité :

$$\sum F_{ext} = (p_e - p) \times a_e - (p_s - p) \times a_s$$

$$\frac{d(m \times u)}{dt} = m_e \times u_e - m_s \times u_s + (p_e - p) \times a_e - (p_s - p) \times a_s \quad (4)$$

Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (1)

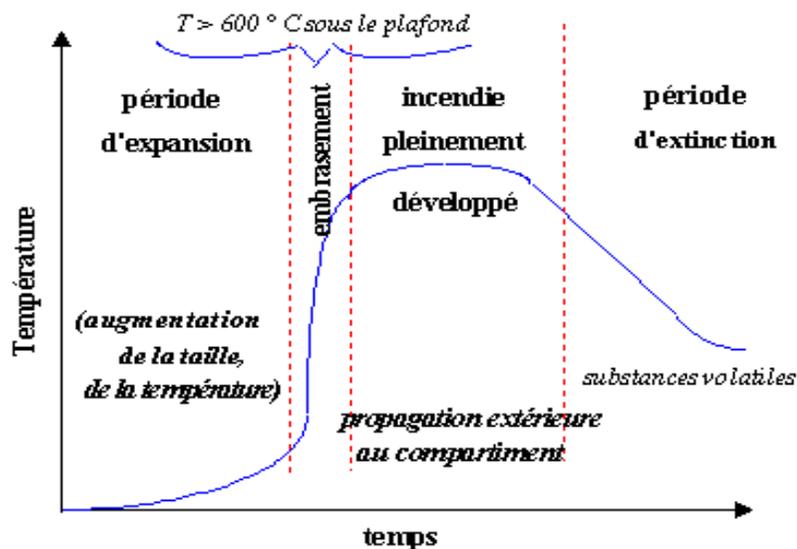
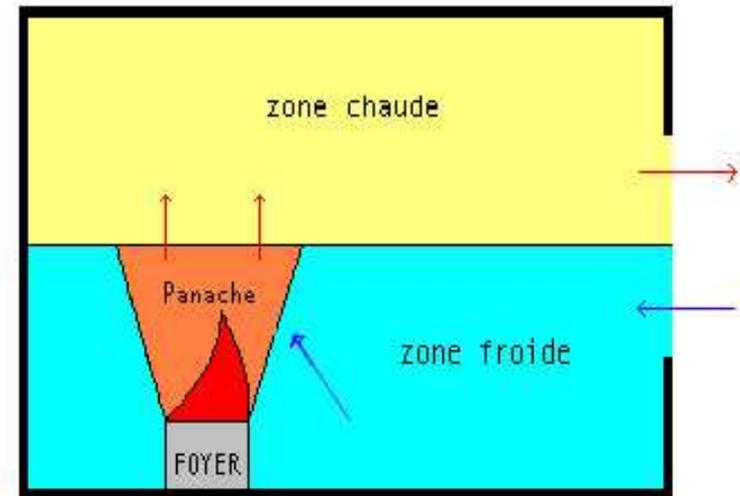


Figure 1 Evolution de l'incendie dans un compartiment



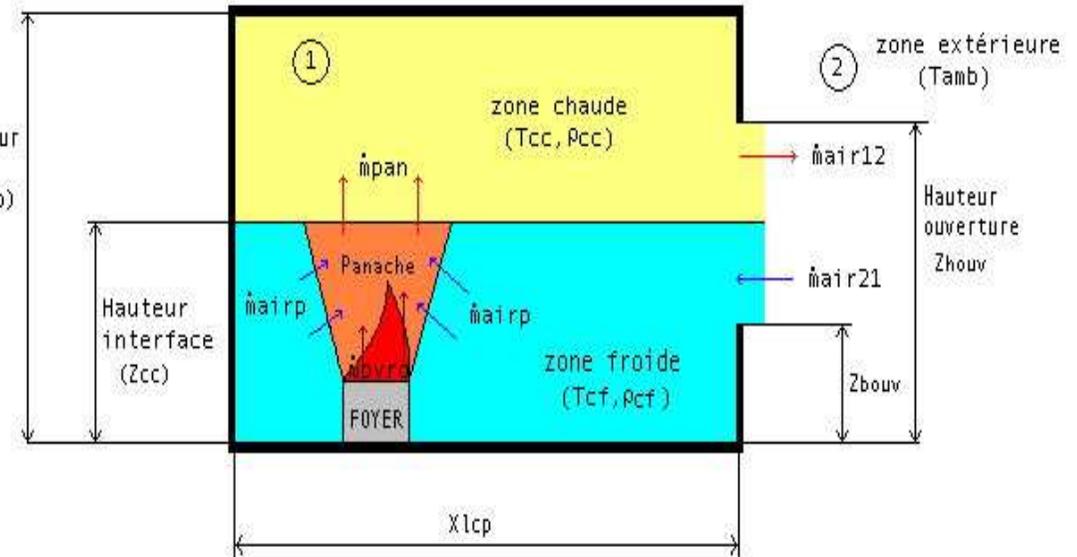
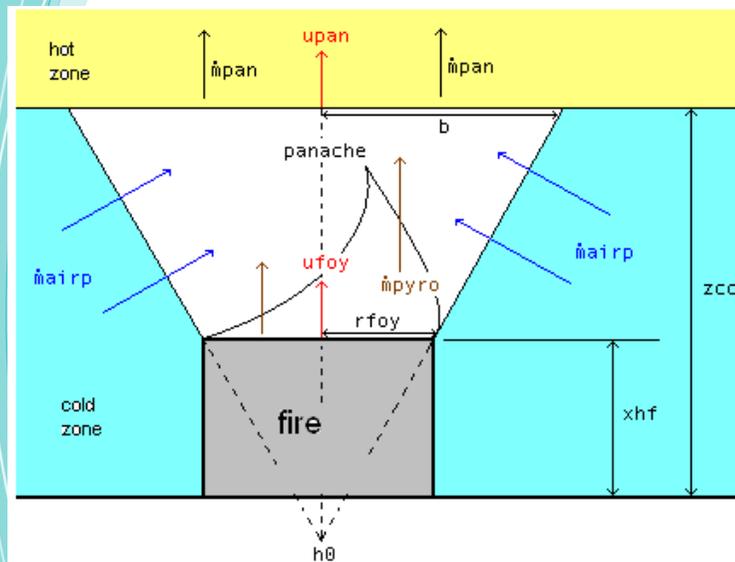
Modèle à 2 zones avec panache

Évaluation des conséquences d'un feu domestique ou industriel dans un local confiné ou semi-confiné, ventilé ou non

Évaluation des protections thermiques des parois (propagation par conduction)

Évaluation de l'efficacité de la lutte par arrosage

Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (2)

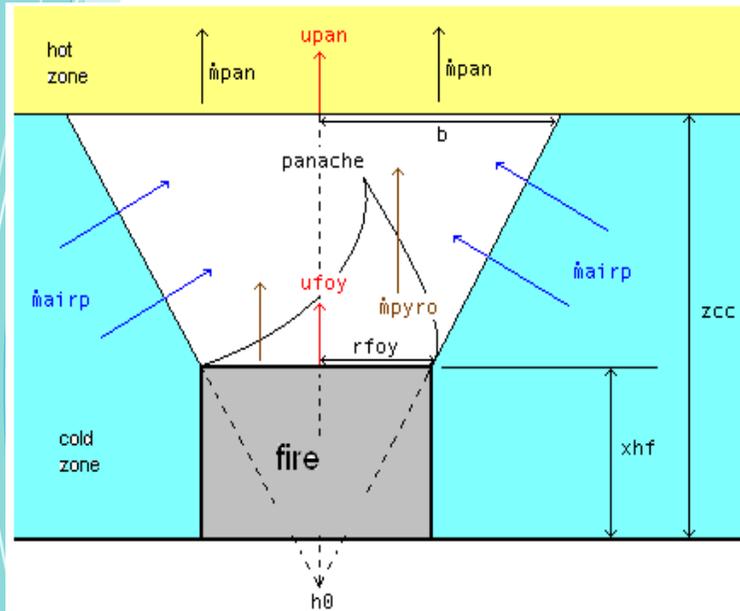


1- Réaction entre les gaz brûlés et O_2 et formation du panache (Modèle du Point Virtuel de MORTON - TAYLOR)

2- Alimentation de la zone chaude par les gaz brûlés et d'une part d' O_2 non réagi (sous plafond) par l'intermédiaire du panache

3- Échauffement de l'air ambiant restant en zone froide par convection et rayonnement du panache et de la zone chaude

Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (3)



Pour une source réelle (non ponctuelle), on introduit une source ponctuelle virtuelle (h_0 du Schéma) qui alimente un panache virtuel jusqu'à la hauteur de la source puis réel au delà. Le débit d'air entraîné réel est alors calculé par différence entre les débits entraînés depuis le point source idéal jusqu'à la hauteur z et la hauteur du foyer.

Le Modèle de Panache de Morton Taylor avec Source ponctuelle virtuelle

Evaluation du débit d'air entraîné qui additionné au débit de pyrolyse constitue le débit entrant en zone chaude. Hypothèse : source de chaleur ponctuelle à l'origine du panache thermique supposé vertical et conique.

Ecriture en régime établi des bilans :

- masse,
- énergie,
- quantité de mouvement.

La résolution de ces bilans conduit à déterminer :

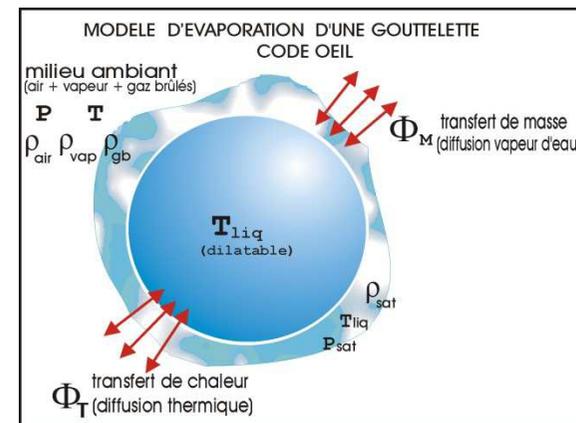
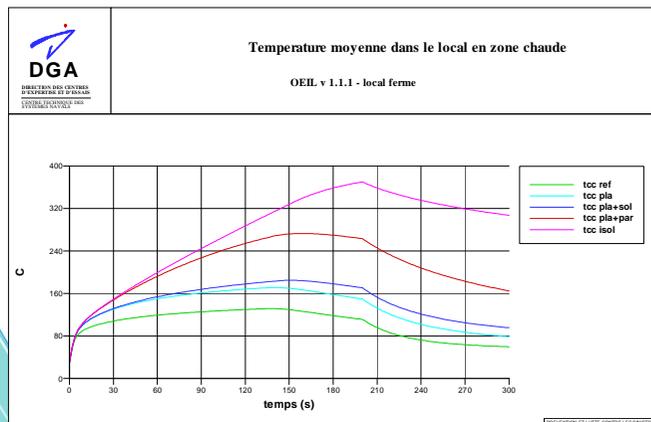
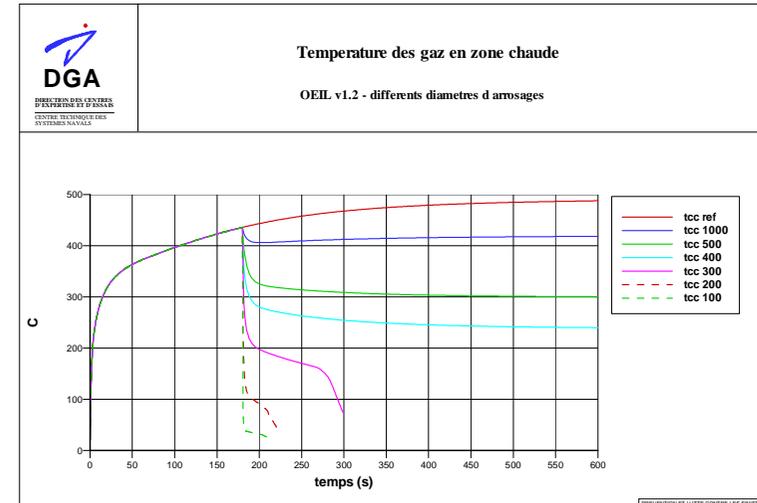
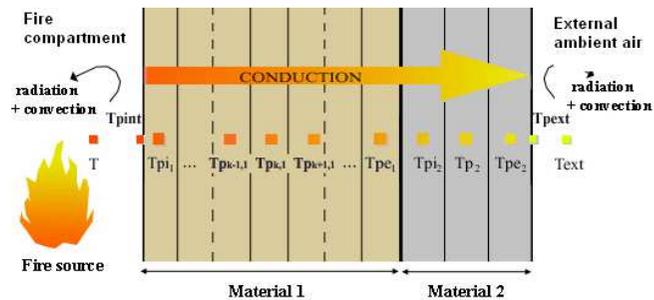
- le rayon,
- la vitesse ascensionnelle axiale,
- la différence entre la température axiale et celle de l'air, à une hauteur z du panache.

En supposant ces variables égales à des lois en puissance de z , on aboutit à :

- une vitesse qui varie selon une loi en $z^{-1/3}$,
- un débit massique d'air entraîné proportionnel à $Q_{conv}^{1/3}$,
- une température axiale décroissante selon z en fonction de $z^{-5/3}$.

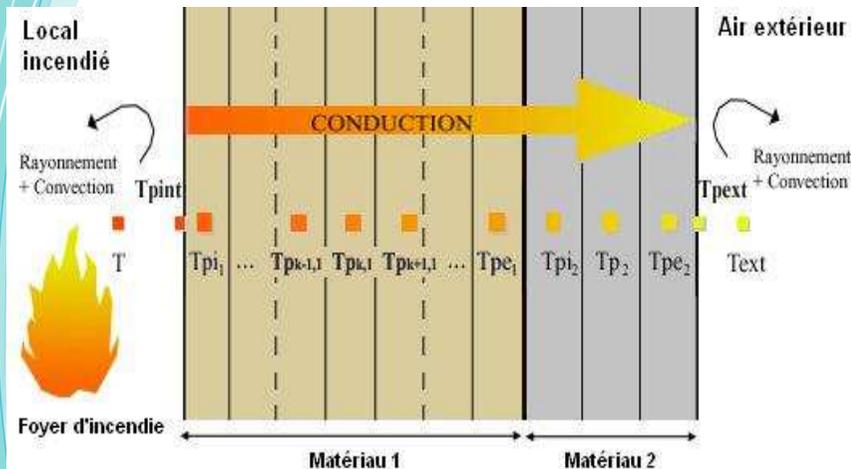
Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (4)

ISOLATION DES PAROIS (V 1.1 en 2004)
C.L. EN TEMPERATURE (V 1.4 in 2006)



LUTTE PAR ARROSAGE (V 1.2 en 2004)

Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (5)



Les pertes thermiques par les parois

Température de la paroi calculée en résolvant l'équation instationnaire de la chaleur discrétisée en utilisant la méthode des Différences Finies centrées. Le transfert de chaleur dans la paroi est supposé 1D dans la direction normale à la paroi.

Le maillage associé à chaque couche i est uniforme (pas d'espace constant, $drp(i)$) et adapté en fonction de son épaisseur et des propriétés thermo-physiques du matériau qui la constitue.

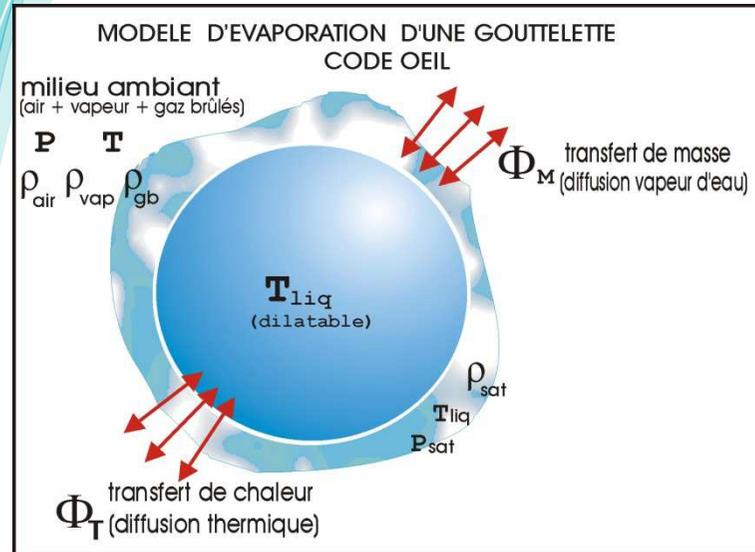
$$T_p(i, j) = a(i)T_{p0}(i, j - 1) + [1 - 2a(i)]T_{p0}(i, j) + a(i)T_{p0}(i, j + 1)$$

Pour chaque nœud de la discrétisation, la température résulte du bilan entre les flux thermiques entrant et sortant dans l'élément correspondant. Le calcul des densités de flux de surface interne et externe (par rapport au local source) et d'interface entre les 2 matériaux de chaque paroi, est effectué à partir des températures de surface et d'interface.

On peut aussi choisir pour chaque paroi du local, le profil de température que l'on veut imposer à l'extérieur: une température ambiante externe (généralement constante), une représentative d'un incendie extérieur au local : profil de feu normalisé (ISO, DOE) ou profil de feu lui-même issu d'une simulation numérique avec le code de calcul ŒIL (incendie classique) ou le code de calcul MEGALO (incendie pyrotechnique).

Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (6)

La Lutte par Arrosage



On raisonne en régime permanent.

A chaque instant et dans chacune des 2 zones, le nombre de gouttes d'eau présent correspond à celui des gouttes injectées pendant le temps de parcours maximal d'une goutte.

En zone chaude, le débit d'injection en nombre de gouttes est constant et calculé à partir du débit volumique d'injection et la vitesse initiale des gouttes à partir de la pression différentielle d'injection du système d'arrosage.

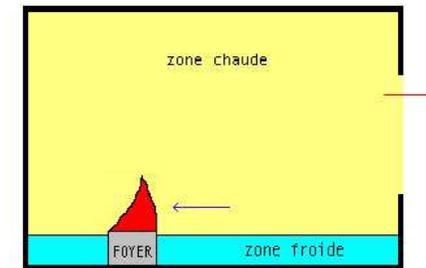
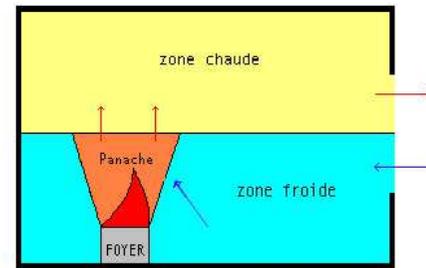
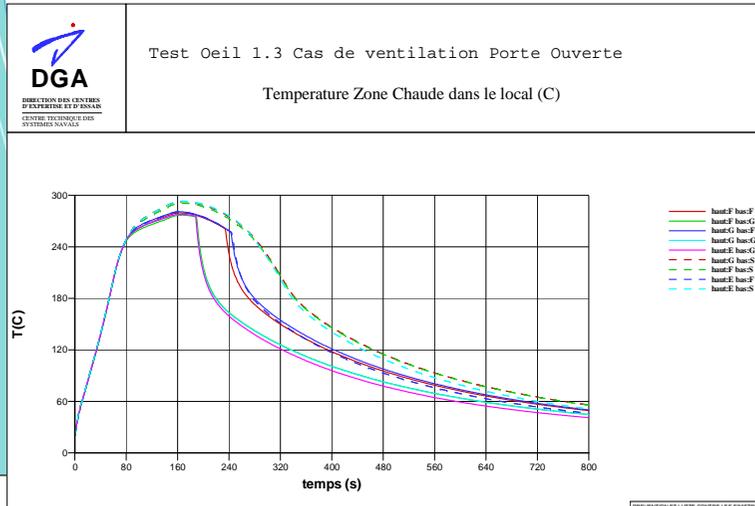
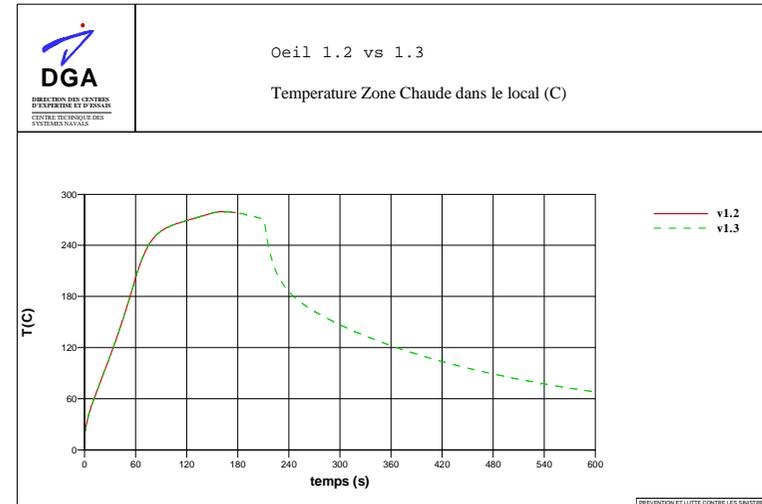
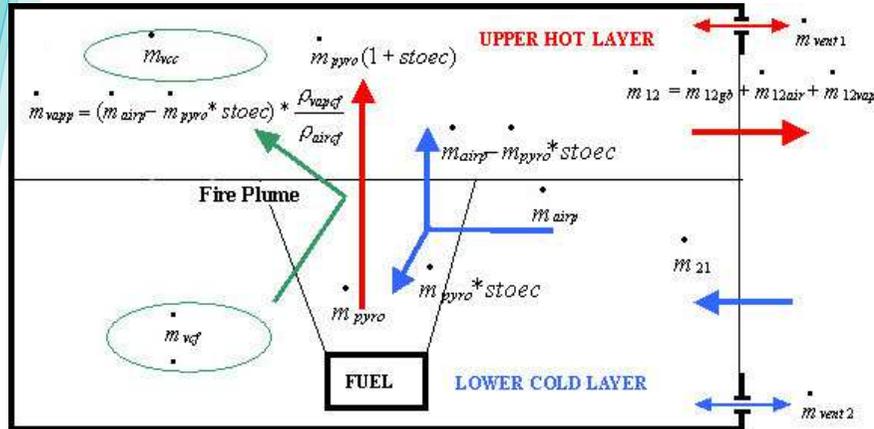
En zone froide, les caractéristiques initiales de la phase liquide correspondent à celles finales de la zone chaude.

Modélisation interaction gaz - gouttelettes considèrent 2 types de transfert « diffusif » à la périphérie de la goutte vers le milieu ambiant (Modèle de SHAPIRO avec corrélation de RANZ - MARSHALL) :

- la **diffusion de la masse** Φ_M de vapeur d'eau entre un film de vapeur attaché à la goutte et le milieu ambiant (gaz brûlés + air + vapeur d'eau), suivant une loi en gradient de concentration massique de vapeur d'eau dans le gaz,
- la **diffusion thermique** Φ_T entre la zone diphasique (goutte et film de vapeur d'eau attaché à la goutte supposés à la même température, celle du liquide) et le milieu ambiant.

Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (7)

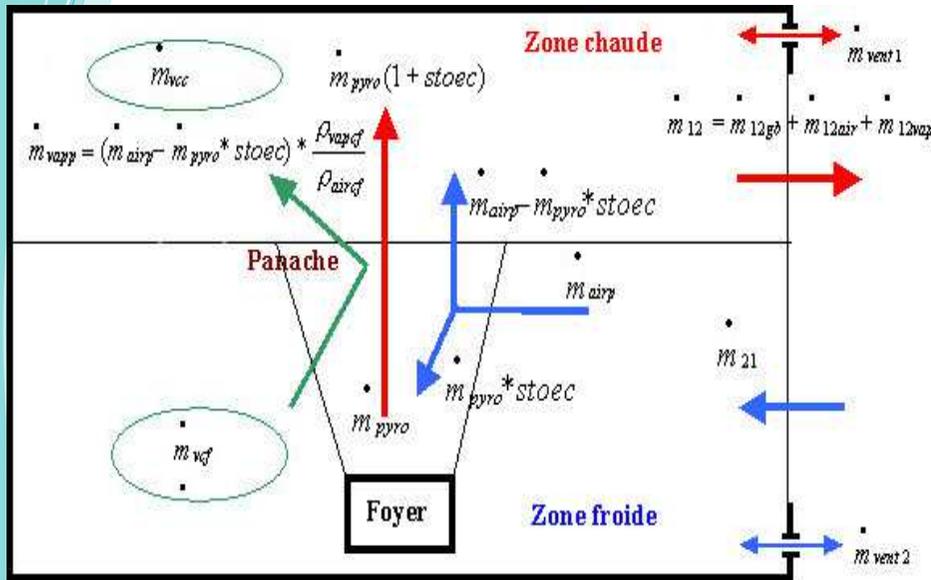
VENTILATION (V 1.3 en 2005 & V1.5 en 2009)



TRANSITION AVEC/SANS PANACHE (V 1.3 en 2005)

Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (8)

La prise en compte de la Ventilation



Hypothèse : soufflage, extraction ou ventilation naturelle s'effectuent par l'intermédiaire de 2 bouches d'aération, situées en partie haute « 1 » ou basse du local « 2 ».

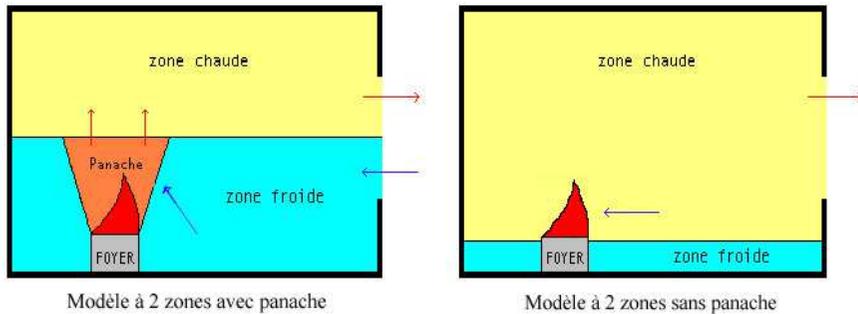
Modélisation du fonctionnement à partir du débit volumique de soufflage ou d'extraction ($m^3.h^{-1}$) pour une **ventilation forcée** et de la température dans le réseau de ventilation.

Pour une grille (ventilation naturelle ou circuit de ventilation fermée), on indique la section du conduit d'aération (m^2), la température initiale dans le réseau (K), les positions basses et haute de la grille (m), le débit volumique « objectif » de soufflage ou d'extraction et enfin la résistance de l'air caractéristique du circuit (m^{-2}) pour tenir compte des pertes de charges.

Pour un fonctionnement retardé et/ou arrêté, deux instants sont à préciser, correspondant à ceux de mise en route et d'arrêt de la ventilation.

Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (9)

La Transition Modèle avec et sans Panache

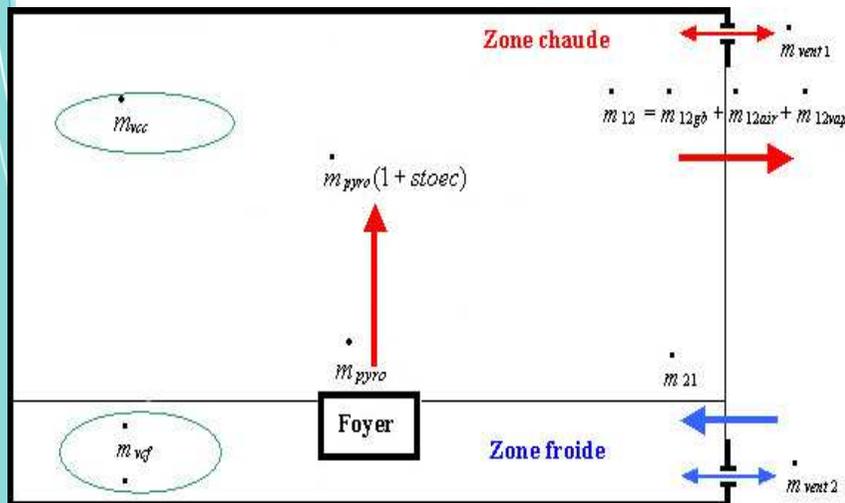


Objectif : modéliser des feux de grande ampleur qui conduisent souvent à un envahissement total du local par les gaz brûlés.

Le modèle « **avec panache** » suppose la création d'une zone chaude au plafond alimentée par des gaz brûlés (combustion stoechiométrique au sein du volume situé au dessus du foyer appelé panache) ; cette combustion aérobie est assurée par l'air « frais » de la zone froide.

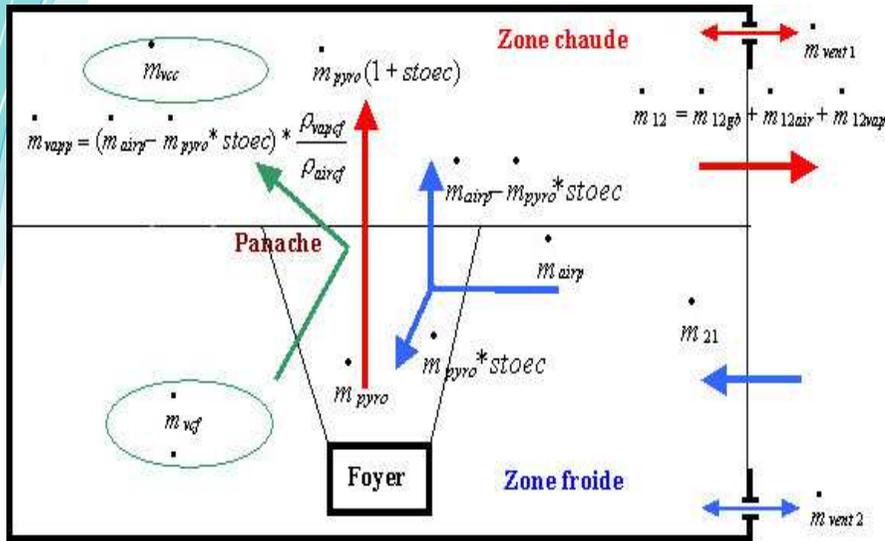
Le panache est délimité en partie inférieure par la surface du foyer et en partie supérieure par l'interface zone chaude / zone froide, ce qui interdit à cet interface de descendre en dessous de la position haute du foyer.

Un modèle « **sans panache** » est donc introduit. La combustion stoechiométrique du matériau est assurée cette fois par l'air restant en zone chaude (suppression du volume représentatif du panache).



Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (10)

Bilan Masse



En zone froide :

-pour la phase gazeuse :

La variation en masse de l'espèce "air" est égale au débit d'air pénétrant par l'ouverture augmenté ou diminué de celui transitant par la bouche de ventilation en zone froide et diminué de celui entraîné par le panache.

La variation de masse de vapeur est égale au débit d'évaporation de l'eau en zone froide diminué du débit vapeur pénétrant en zone chaude et diminué de la vapeur sortant par la bouche de ventilation en zone froide en mode extraction.

-pour la phase liquide :

La variation de la masse d'eau liquide s'exprime à partir du débit d'évaporation du liquide (gouttes) en zone froide.

En zone chaude :

-pour la phase gazeuse :

La variation de masse de l'espèce "gaz brûlés" est égale au débit massique dû à la combustion du matériau diminué du débit sortant de l'espèce considérée vers l'extérieur et/ou par la bouche de ventilation en zone chaude en cas d'extraction.

La variation de l'espèce "air" est égale au débit d'air entraîné par le panache ne participant pas à la pyrolyse du matériau diminué du débit sortant par l'ouverture et/ou diminué ou augmenté de l'air entraîné ou provenant de l'extérieur et transitant par la bouche de ventilation en zone chaude.

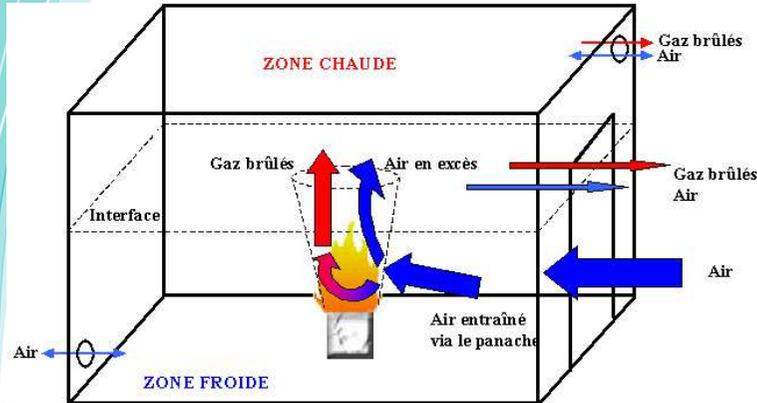
La variation de masse de vapeur d'eau, le bilan est effectué à partir du débit d'évaporation du liquide en zone chaude augmenté du débit vapeur provenant de la zone froide (entraîné par le panache) et diminué de celui sortant par l'ouverture et/ou par la bouche de ventilation en zone chaude en mode extraction,

-pour la phase liquide :

La variation de la masse d'eau liquide s'exprime par celle du diamètre des gouttes et est égale au débit d'évaporation de l'eau, du fait que l'arrosage est traité en régime permanent (débit entrant = débit sortant),

Le modèle à zones ŒIL (*): Présentation (11)

Bilan Énergie



En zone froide :

-pour la phase gazeuse :

La variation d'enthalpie est égale à l'apport d'enthalpie d'air provenant de l'extérieur (ouverture et bouche de ventilation), augmenté de celui provenant de la vaporisation de l'eau en zone chaude. Elle est diminuée des débits d'enthalpie des 2 espèces « air » et « vapeur » entraînées par le panache, de la quantité de chaleur nécessaire à l'échauffement de l'eau, du travail de la pression et des pertes thermiques par les parois ainsi que du débit enthalpique des espèces sortant par la bouche.

-pour la phase liquide :

La variation d'enthalpie est égale à l'enthalpie due à l'évaporation de l'eau augmenté de la quantité de chaleur apportée par l'écoulement gazeux et nécessaire à l'échauffement de l'eau.

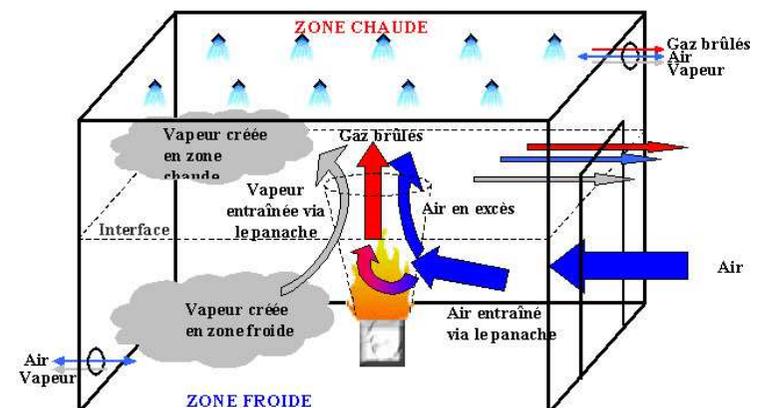
En zone chaude :

-pour la phase gazeuse :

La variation d'enthalpie est égale à l'apport d'enthalpie dû à la combustion du matériau combustible augmenté de celui provenant de la vaporisation de l'eau en zone froide entraîné par le panache, de celui généré par la vaporisation des gouttes issues des sprinklers et de celui de l'air pénétrant par la bouche de ventilation. Cet apport est diminué des débits d'enthalpie de sortie par l'ouverture et par la bouche de ventilation située des 3 espèces gazeuses, de la quantité de chaleur nécessaire à l'échauffement des gouttes, du travail de la pression et des pertes thermiques par les parois,

-pour la phase liquide :

La variation d'enthalpie est égale à l'apport d'enthalpie dû à l'évaporation de l'eau augmenté de la quantité de chaleur apportée par l'écoulement gazeux pour son échauffement.

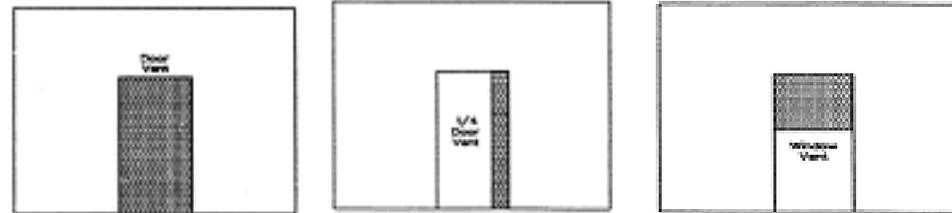
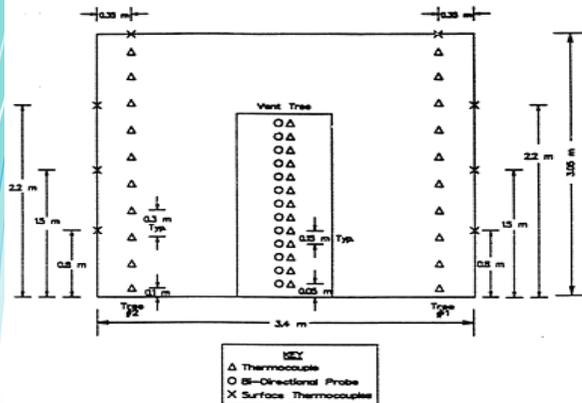


La Validation/Qualification des Simulations/Modèles

- La **validation des simulations** est un processus visant à s'assurer qu'une simulation et les modèles qu'elle met en œuvre représentent le monde réel d'une façon suffisamment précise pour remplir les besoins d'une utilisation donnée.
- Il est très important de noter que la validation n'est valable que pour un domaine d'emploi donné et doit être remise en question pour toute nouvelle utilisation sortant de ce domaine.
- La validation peut également être appliquée aux données utilisées par les simulations.
- La validation est une partie d'un processus plus large, dit de vérification, validation et acceptation des données, modèles et simulations (VV&A). Ce processus est fondamental en simulation, car il détermine non seulement la qualité du produit final, mais également la crédibilité des résultats obtenus. La formalisation de ce processus fait l'objet de travaux de standardisation.

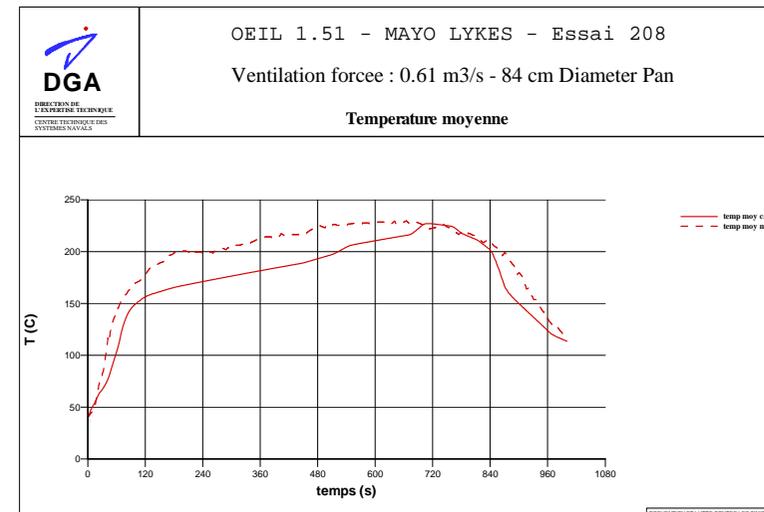
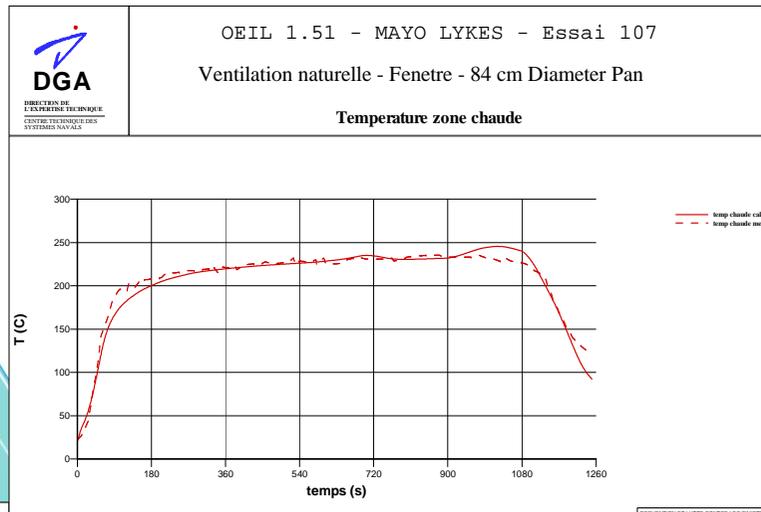
Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (1)

Essais Mayo Lykes



Ouvertures : porte, $\frac{1}{4}$ porte, fenêtre
 Taux de ventilation : 900, 1400 et 2200 m³/h

Feux de kérosène dans un compartiment de 34 m³



Température zone chaude - S107 : fenêtre - S208 : ventilation de 2200 m³/h

Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (2) Essais Mayo Lykes

Essai N°	D _{bac} (cm)	ventilation (m3/s)	m _{ppyro} (kg/s)	T _{cc_cal} (° C)	T _{cc_mes} (° C)	ΔT _{cc} (%)
101	62	porte	0.0062	230.0	241.4	-2
102	84	porte	0.017	267.2	265.4	3
105	62	fenêtre	0.0074	221.1	197.8	5
107	84	fenêtre	0.0084	245.6	235.5	2
111	62	1/4 porte	0.0053	190.5	192.4	0
112	84	1/4 porte	0.011	261.8	269.7	-1
201	62	0.38	0.0055	140.3	159.9	-5
203	84	0.38	0.009	216.9	218.2	0
207	62	0.61	0.007	155.2	167.1	-3
208	84	0.61	0.0012	227.1	226.4	0
210	62	0.25	0.0051	172.1	152.5	5
211	84	0.25	0.0083	235.4	223.4	2
						2

Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (3)

Essais Mayo Lykes

Essai N°	D _{bac} (cm)	ventilation (m3/s)	m _{ppyro} (kg/s)	T _{pimax_cal} (° C)	T _{pimax_mes} (° C)	ΔT _{pimax} (%)	T _{pemax_cal} (° C)	T _{pemax_mes} (° C)	ΔT _{pemax} (%)
101	62	porte	0.0062	56.3	61.9	-2	55.9	55.6	0
102	84	porte	0.017	75.1	75.5	0	75.0	69.4	2
105	62	fenêtre	0.0074	65.8	67.5	1	65.7	59.4	2
107	84	fenêtre	0.0084	84.8	90.3	-2	84.6	84.7	0
111	62	1/4 porte	0.0053	53.9	59.9	-2	53.8	58.0	-1
112	84	1/4 porte	0.011	72.2	86.2	-4	71.6	83.4	-3
201	62	0.38	0.0055	90.4	60.3	9	90.2	57.5	10
203	84	0.38	0.009	135.4	90.2	12	135.0	85.1	14
207	62	0.61	0.007	90.2	58.8	9	89.9	54.4	11
208	84	0.61	0.0012	141.6	96.6	12	141.1	91.8	14
210	62	0.25	0.0051	82.9	53.1	9	82.7	49.0	0
211	84	0.25	0.0083	132.8	77.6	15	132.7	75.7	16
						6			
							7		

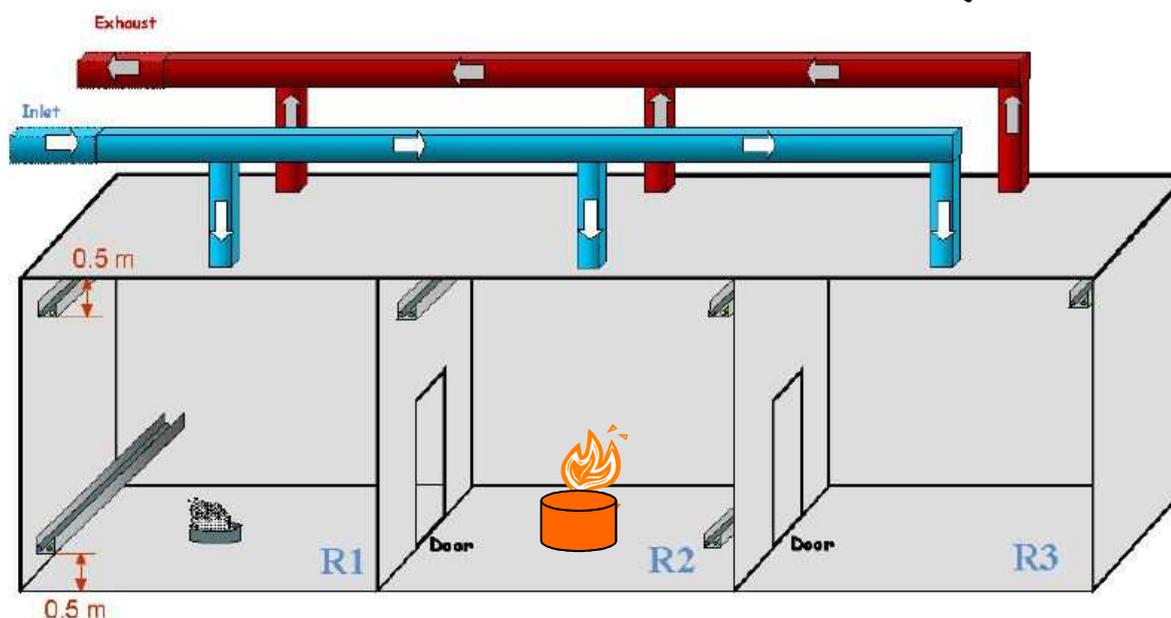
Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (4) Essais PRISME - SOURCE (IRSN)

LOCAL SOURCE : LOCAL R2 de la plateforme DIVA (IRSN)

Dimensions: 6 m x 5 m x 3.95 m

Parois en béton - Plafond isolé (laine de roche)

Ventilation:
 $TR = 4.7h^{-1}$
ou $560m^3/h$



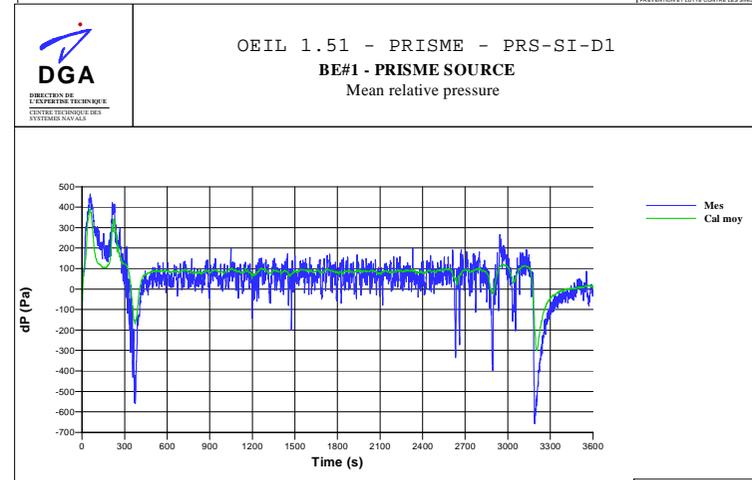
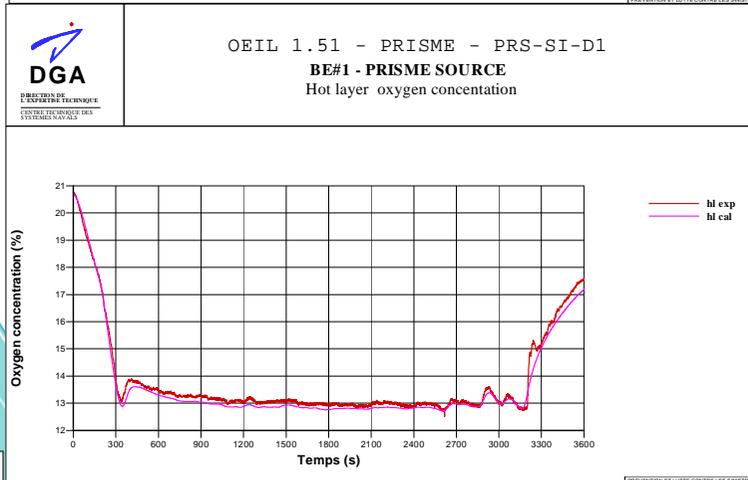
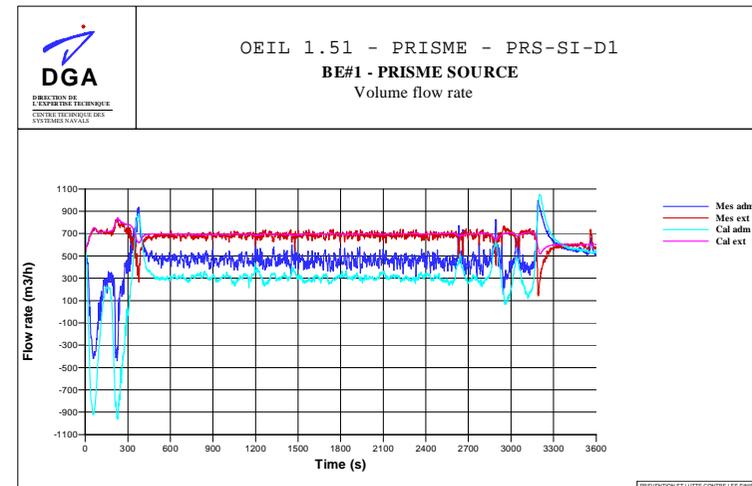
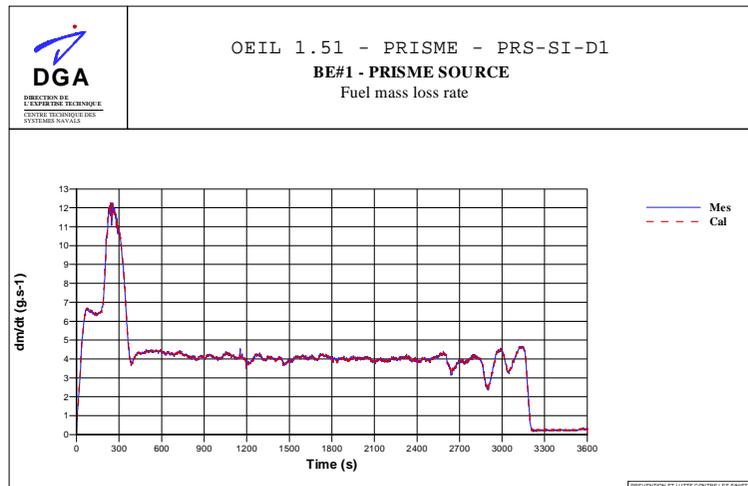
Foyer:

Combustible:

bac circulaire de $0.4m^2$ à 40cm du sol
dodécane ($C_{12}H_{26}$, $800kg/m^3$ et $h_{comb}=42 MJ/kg$)
Mesure du débit de pyrolyse en continu
(14.3/16kg ont brûlé)

Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (5) Essais PRISME - SOURCE (IRSN)

Débit massique de combustion, débits volumiques de ventilation



Concentration en O_2 , différentiel de pression



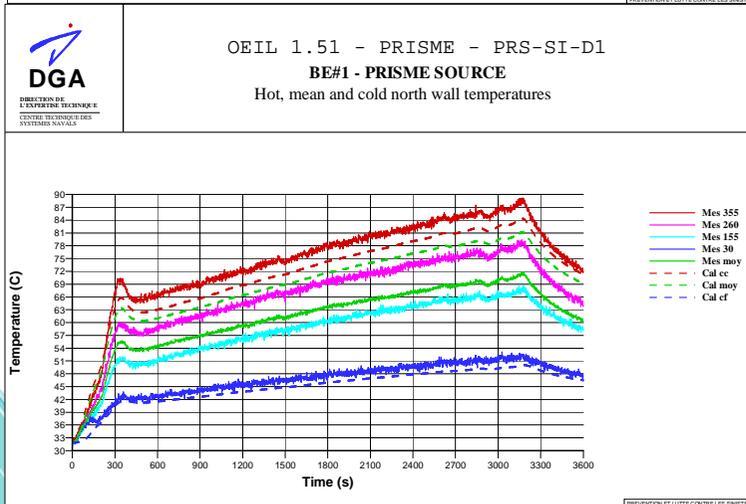
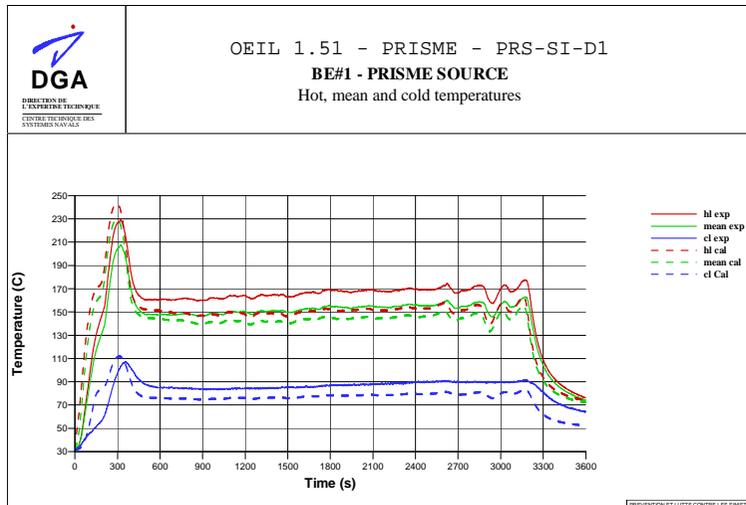
MINISTÈRE DE LA DÉFENSE



(*Tous droits réservés DGA Tn

Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (6) Essais PRISME - SOURCE (IRSN)

Températures ambiantes



ESSAI PRS-SI-D1 0.4 m ² - 560 m ³ /h	
ΔP (Pa)	42
T_{up} (°C)	4
T_{low} (°C)	2
T_{mean} (°C)	3
$T_{W_{mean}}$ (°C)	1
$F_{w_{mean}}$ (W)	20
$X_{O2_{up}}$ (%)	11
Int_T_{up} (K.s)	2
Int_T_{low} (K.s)	1
Int_T_{mean} (K.s)	1

Températures pariétales



MINISTÈRE
DE LA DÉFENSE

DGA

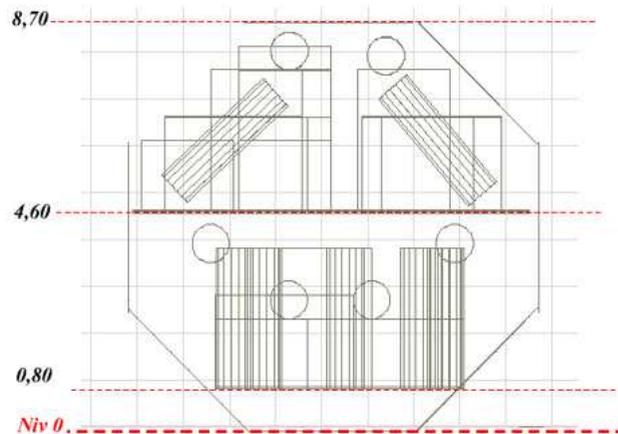
(*)Tous droits réservés DGA Tn

Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (7)

Essais BARRACUDA (CNPP)



Feux d'huile TVEP- Compartiment de 1100 m³



Dimensions	Enceinte
Longueur	19.00 m
Diamètre cercle inscrit	8.70 m
Hauteur niveau 1	0.80 m du sol
Hauteur niveau 2	4.60 m du sol
Surface au sol niveau 1	85 m ²
Surface au sol niveau 2	157 m ²
Volume intérieur	1130 m ³

Foyer :

Huile TVEP : masse volumique de 0.876 kg.l⁻¹,

PCI de 43 MJ.kg⁻¹

Bacs de 1.44 m² (1.2 x 1.2 m), 6 m² (3 x 2 m)
et 0.4 m² posés à 20 cm au dessus du plancher

Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (8) Essais BARRACUDA (CNPP)

Essai N°	Date	Foyer	Localisation	Porte	Ventilation	Particularités
2	26/01/04	1.44 m ²	Niveau inférieur	Fermée	1500 m ³ /h (3 min)	-
4	27/01/04	1.44 m ²	Niveau inférieur	Fermée	3000 m ³ /h (3 min)	Ouverture porte à t=15 min
5	28/01/04	1.44 m ²	Niveau inférieur	Fermée	1500 m ³ /h (3 min)	Ouverture porte à t=8 min
6	28/01/04	1.44 m ²	Niveau inférieur	Fermée	1500 m ³ /h (3 min)	Ouverture porte à t=6 min
10	03/02/04	1.44 m ²	Niveau inférieur	Ouverte	1500 m ³ /h (3 min)	Pas fermeture porte
12	05/02/04	6 m ²	Niveau inférieur	Fermée	1500 m ³ /h (3 min)	-
4cd	05/11/04	0.4 m ²	Niveau inférieur	Fermée	1500 m ³ /h (3 min)	Ouverture porte à t=15 min



MINISTÈRE
DE LA DÉFENSE

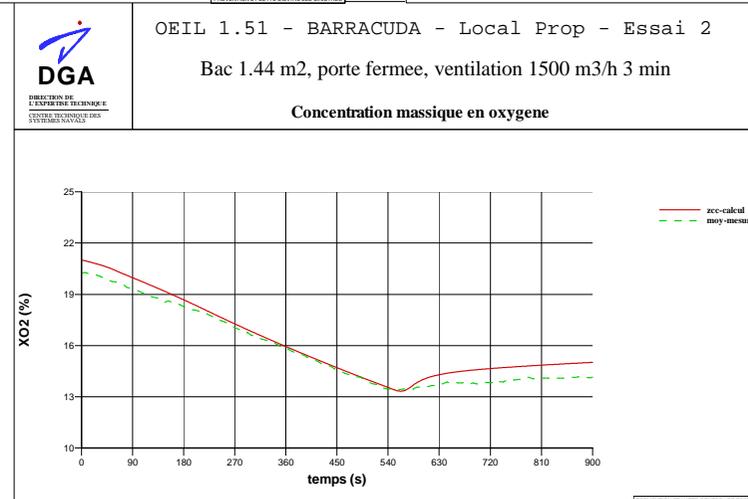
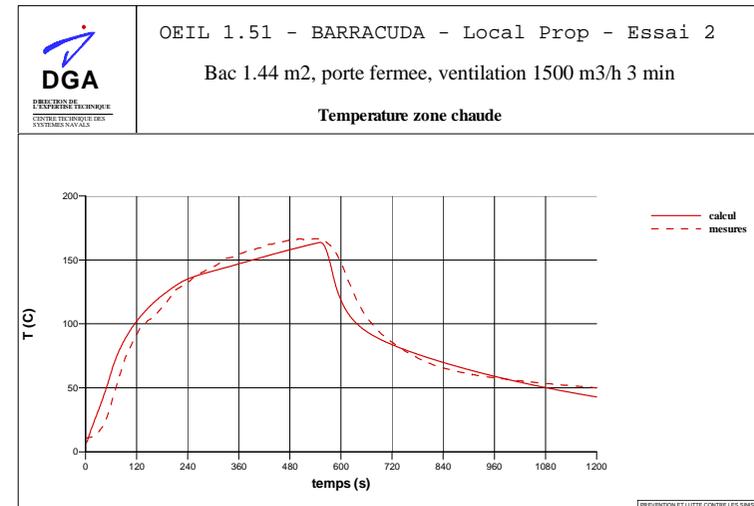
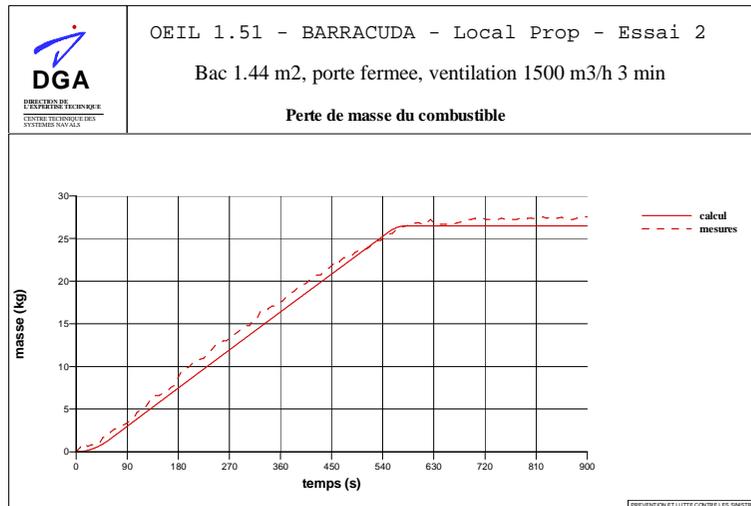


(*)Tous droits réservés DGA Tn

Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (9)

Essais BARRACUDA (CNPP)

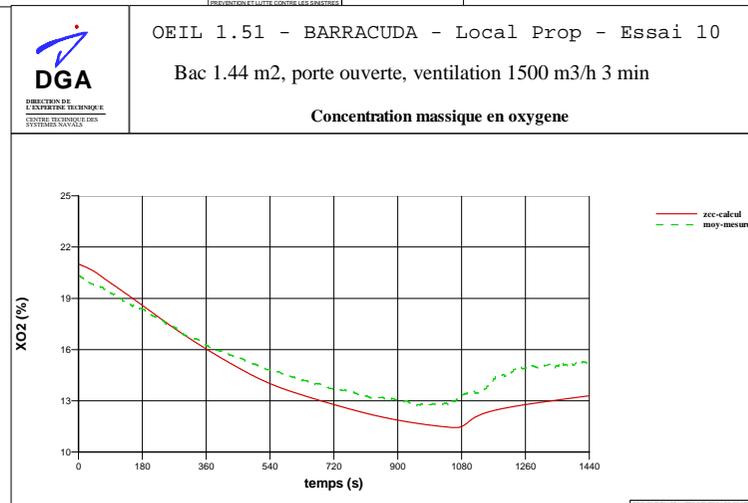
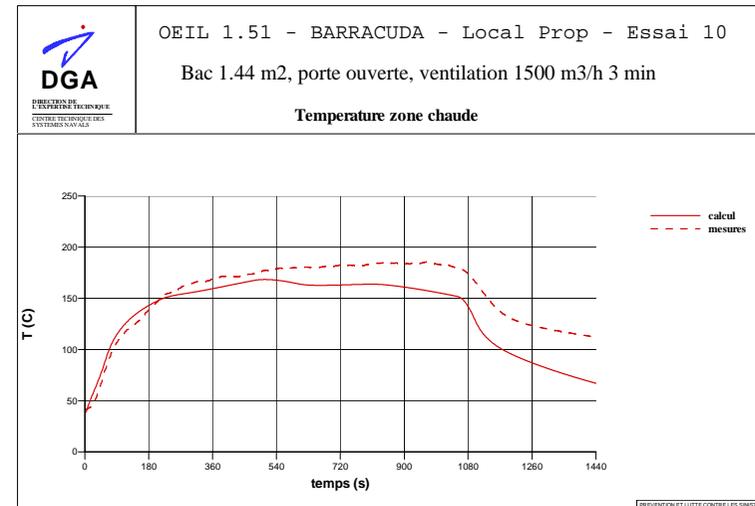
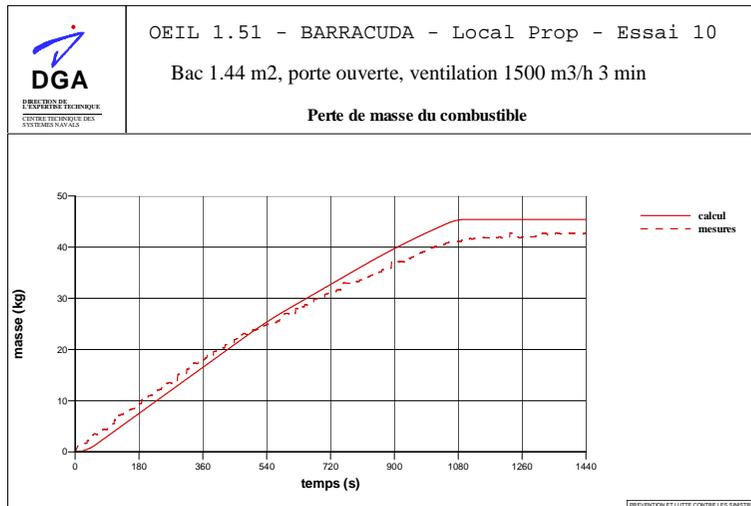
ESSAI 2 : Perte de masse, température zone chaude et concentration en O₂



Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (10)

Essais BARRACUDA (CNPP)

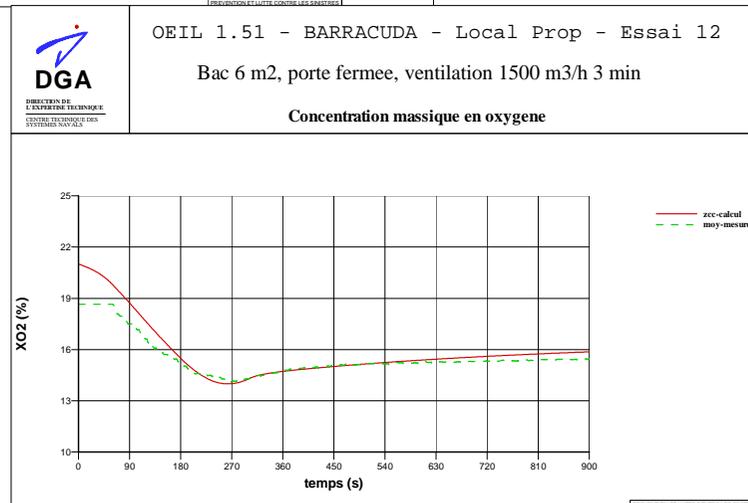
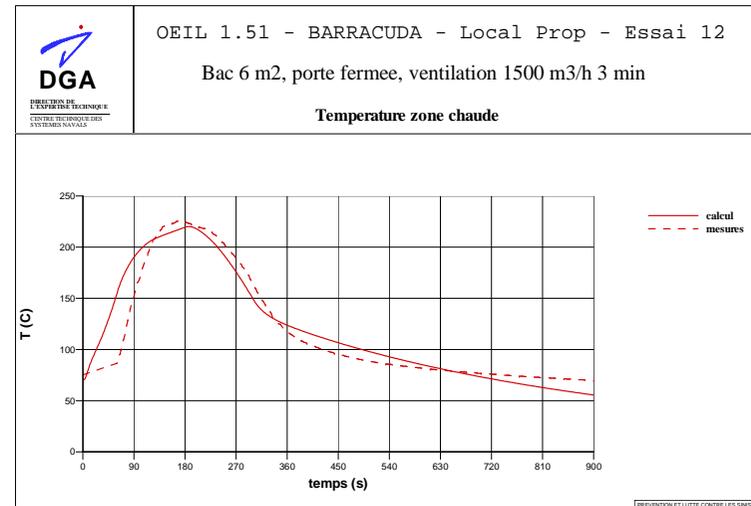
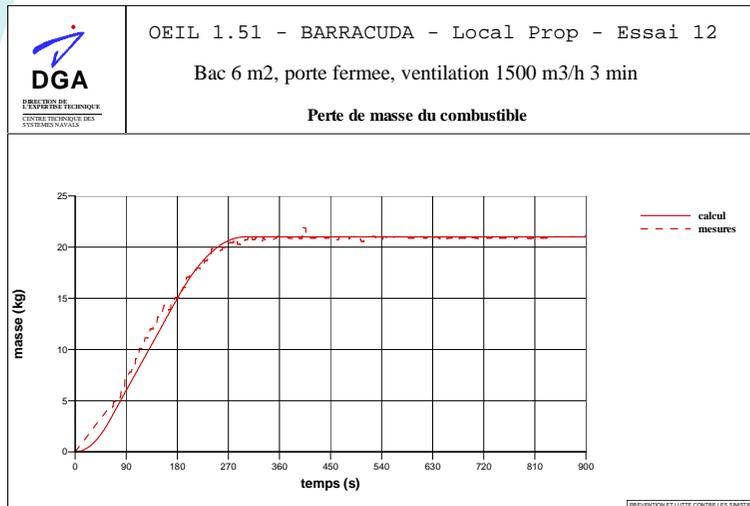
ESSAI 10 : Perte de masse, température zone chaude et concentration en O₂



Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (11)

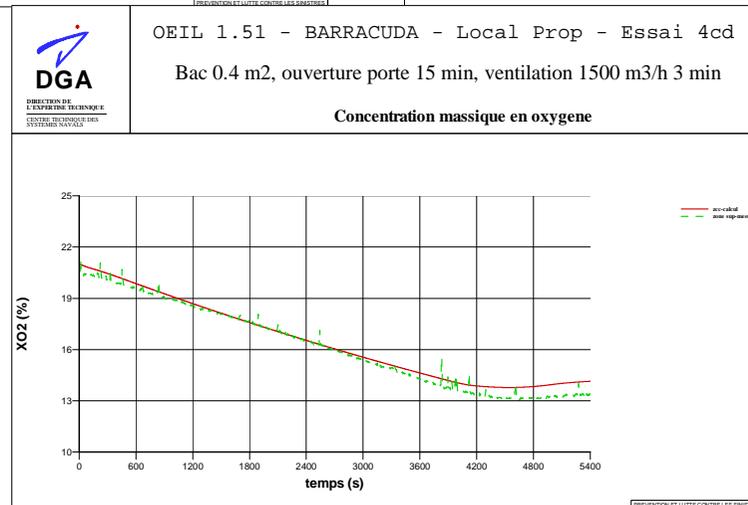
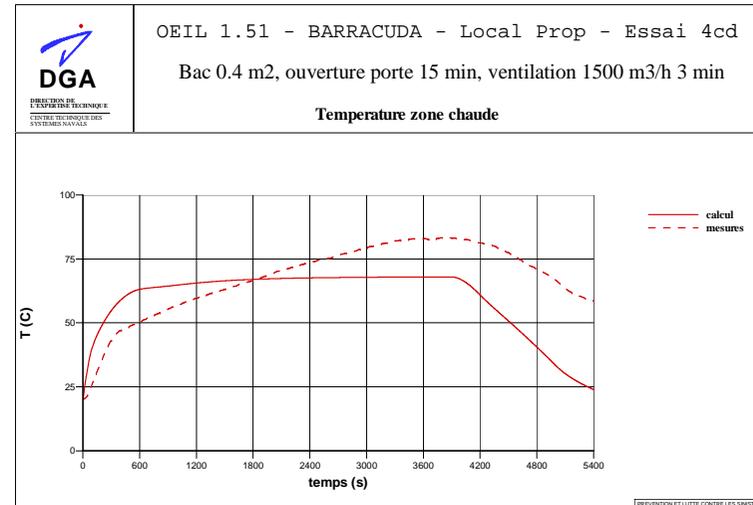
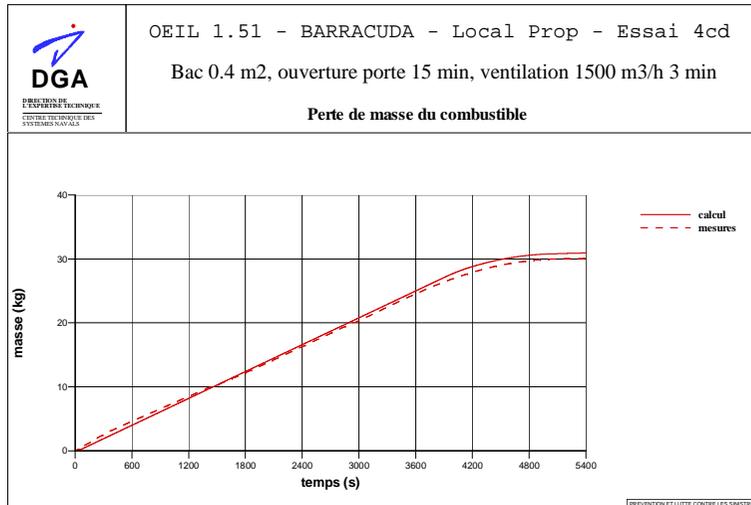
Essais BARRACUDA (CNPP)

ESSAI 12 : Perte de masse, température zone chaude et concentration en O₂



Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (12) Essais BARRACUDA (CNPP)

ESSAI 4cd : Perte de masse, température zone chaude et concentration en O₂



Le modèle à zones ŒIL (*): Validation (13) Essais BARRACUDA (CNPP)

Essai	Durée (s)	m° _{pyro} (kg/s)	T _{max} cal (°C)	T _{res} cal (°C)	T _{max} mes (°C)	T _{res} mes (°C)	ΔT max (%)	ΔTres (%)
2	580	0.05	204	83	192	61	2	7
4	600	0.05	203	63	201	54	0	3
4cd	5100	0.007	78	29	93	50	-4	-6
5	600	0.05	198	61	205	65	-1	-1
6	840	0.05	193	78	209	85	-3	-2
10	1140	0.05	182	56	224	92	-8	-10
12	300	0.1	254	62	256	70	0	-2
							3	4

Essai	Xo _{2min} cal (%)	Xo _{2fin simu} cal (%)	Xo _{2min} mes (%)	Xo _{2fin simu} mes (%)	ΔXo ₂ min (%)	ΔXo ₂ fin simu (%)
2	13.3	15.0	13.4	14.2	-1	6
4	13.4	15.3	13.1	14.5	2	6
4cd	13.8	14.1	13.9	14.1	-1	< 1
5	13.6	15.5	13.6	16.5	< 1	-6
6	12.9	14.6	13.0	15.7	-1	-7
10	11.4	13.3	12.7	15.1	-10	-12
12	14.0	15.9	14.1	15.5	-1	-3
					2	6

L'Analyse de Sensibilité

Complément à la Validation des modèles

Permet d'analyser l'influence des facteurs sur le comportement du feu
Plan d'expérience permet de limiter le nombre de simulation nécessaires

Plans factoriels à deux niveaux de variation :

- chaque facteur peut prendre 2 valeurs,
- toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation.

Plans factoriels complets : 2^k

- le nombre d'expériences augmente très vite avec le nombre de facteurs
- pour k facteurs prenant chacun 2 niveaux → plan à 2^k essais

Plans factoriels fractionnaires : 2^{k-q} (plan complet divisé par 2^q)

On se limite à 2^{k-q} essais → moins d'expériences au prix d'une perte d'information qui, dans la plupart des cas, n'est pas gênante

Dans le cas présent:

- 6 facteurs à 2 niveaux
- PFC : $2^6=64$ essais
- PFF : $2^{6-3}= 8$ essais avec interaction entre facteurs (théorie des aliases)

L'Analyse de Sensibilité (1)

Le modèle à zones ŒIL (*) et le code 3D SAFIR (**)

Paramètres d'entrée	1	2		3	4	5	6
	MLR (kg/s)	Fraction Radiative (ŒIL)	Densité Suies (SAFIR)	Conductivité (parois) (W/m/K)	Cp (parois) (J/kg/K)	Emissivité (parois)	Ventilation (m ³ /h)
0	Ref	0.35	1800	1.5	1000	0.7	560
1	-10 %	0.3	1620	1.93	800	0.9	620
2	+10 %	0.3	1620	1.07	800	0.5	620
3	-10 %	0.4	1980	1.07	800	0.9	500
4	+10 %	0.4	1980	1.93	800	0.5	500
5	-10 %	0.3	1620	1.93	1200	0.5	500
6	+10 %	0.3	1620	1.07	1200	0.9	500
7	-10 %	0.4	1980	1.07	1200	0.5	620
8	+10 %	0.4	1980	1.93	1200	0.9	620

6 Facteurs – 8 essais

L'Analyse de Sensibilité (2)

Le modèle à zones ŒIL (*) et le code 3D SAFIR (**)

Réponses	Dénomination	Position	Commentaires
T1	Température moyenne verticale quart NE (°C)	(-1.5 ; -1.25 ; Z)	Maximum [0; 3600 s]
T2	Température moyenne verticale quart NE (°C)	(-1.5 ; -1.25 ; Z)	Moyenne [1500; 2500 s]
XO2	Fraction molaire d'oxygène quart SE (-)	(1.5 ; -1.25 ; 3.3 ou Zc)	Minimum [0; 3600 s]
Twall	Température paroi Nord (°C)	(-3 ; 1.5 ; 2.6 ou Zc)	Maximum [0; 3600 s]
RHF	Flux radiatif paroi Nord (W/m ²)	(-3 ; 1.5 ; 2.6 ou Zc)	Maximum [0; 3600 s]
THF	Flux total paroi Nord (W/m ²)	(-3 ; 1.5 ; 2.6 ou Zc)	Maximum [0; 3600 s]
P1	Pression relative (Pa)	Local	moyenne [1500; 2500 s]
P2	Pression relative (Pa)	Local	Maximum [0; 3600 s]
P3	Pression relative (Pa)	Local	Minimum [0; 3600 s]

Choix des réponses

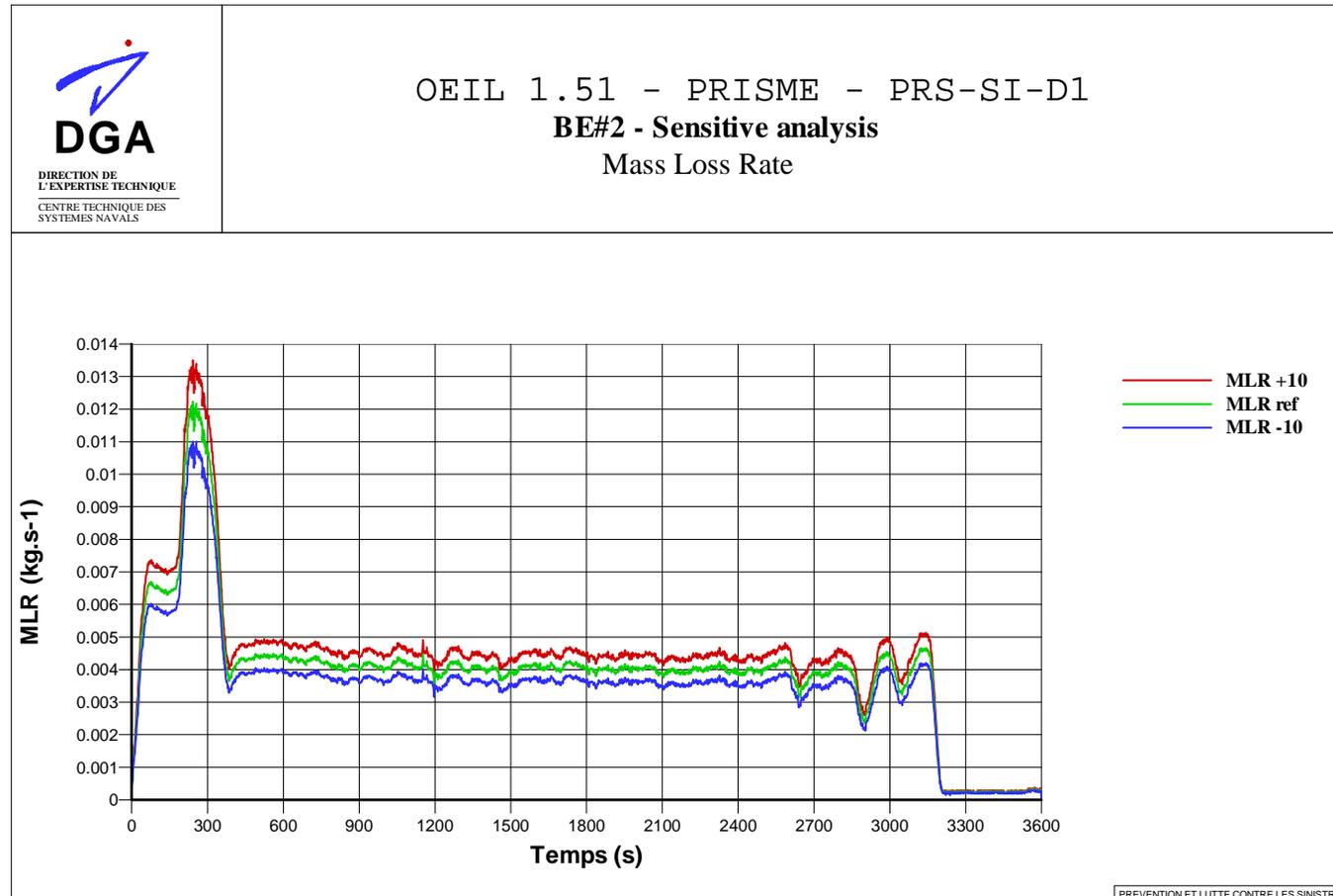


(*)Tous droits réservés DGA Tn

(**)Tous droits réservés DGA Tn/IUSTI

L'Analyse de Sensibilité (3)

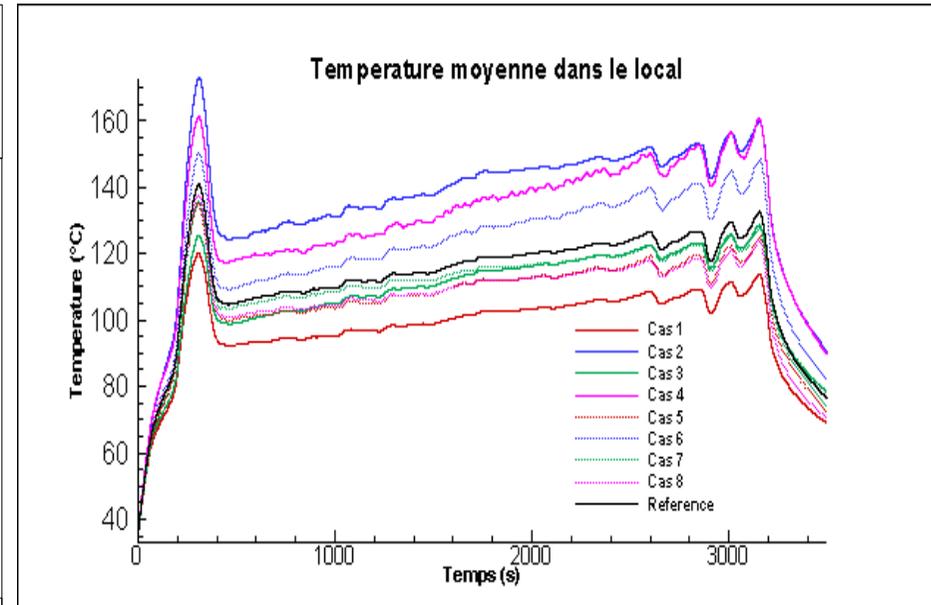
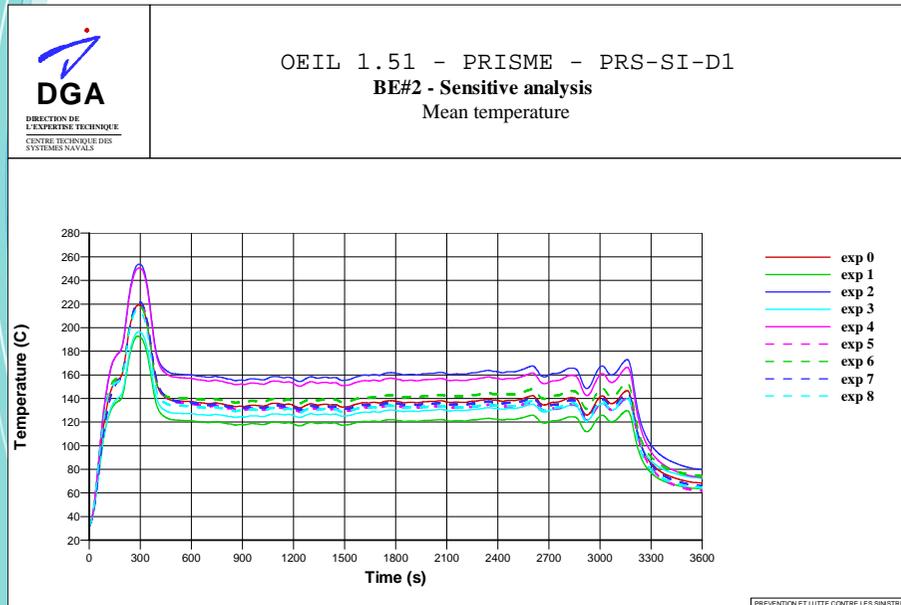
Le modèle à zones ŒIL (*) et le code 3D SAFIR (**)



Débit de pyrolyse - Donnée d'entrée

L'Analyse de Sensibilité (4)

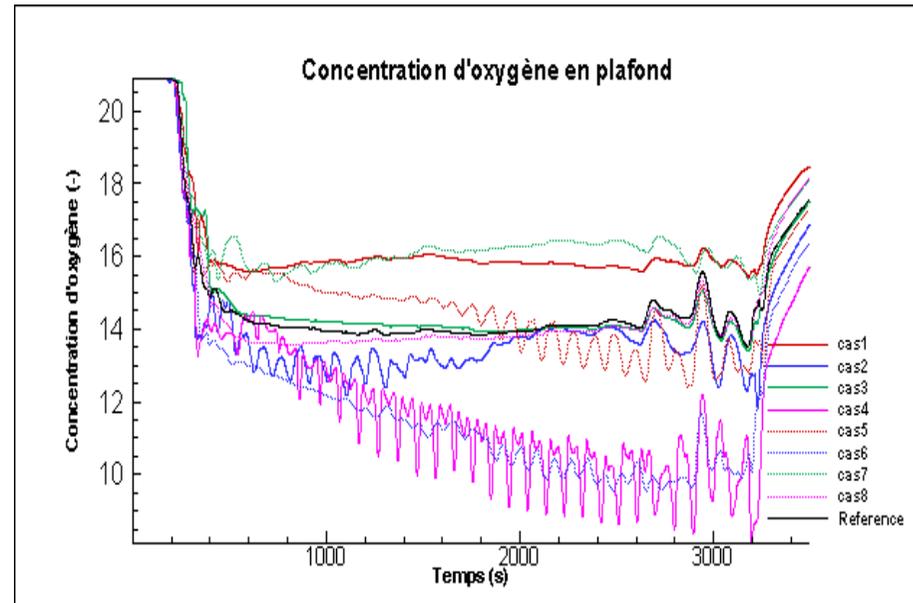
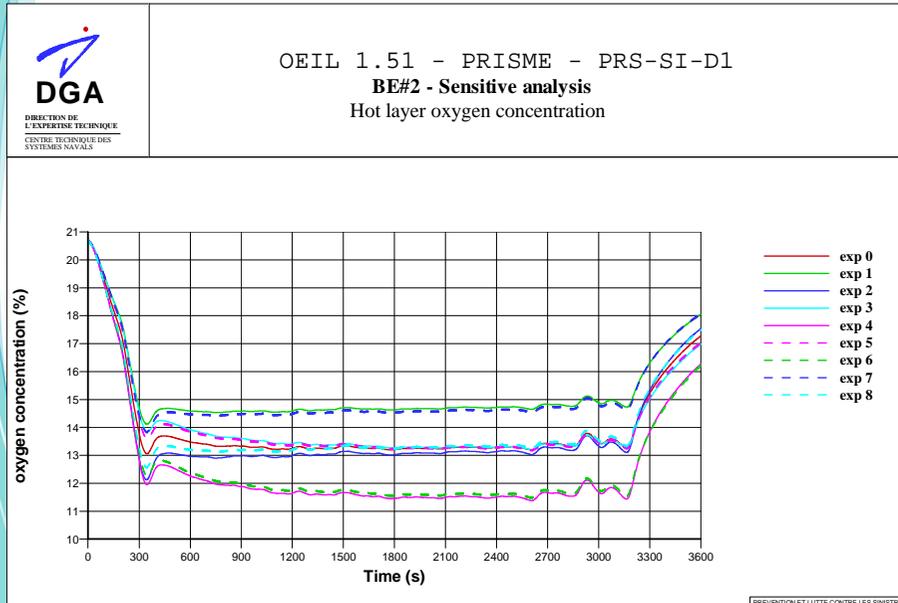
Le modèle à zones ŒIL (*) et le code 3D SAFIR (**)



Température ŒIL & SAFIR

L'Analyse de Sensibilité (5)

Le modèle à zones ŒIL (*) et le code 3D SAFIR (**)

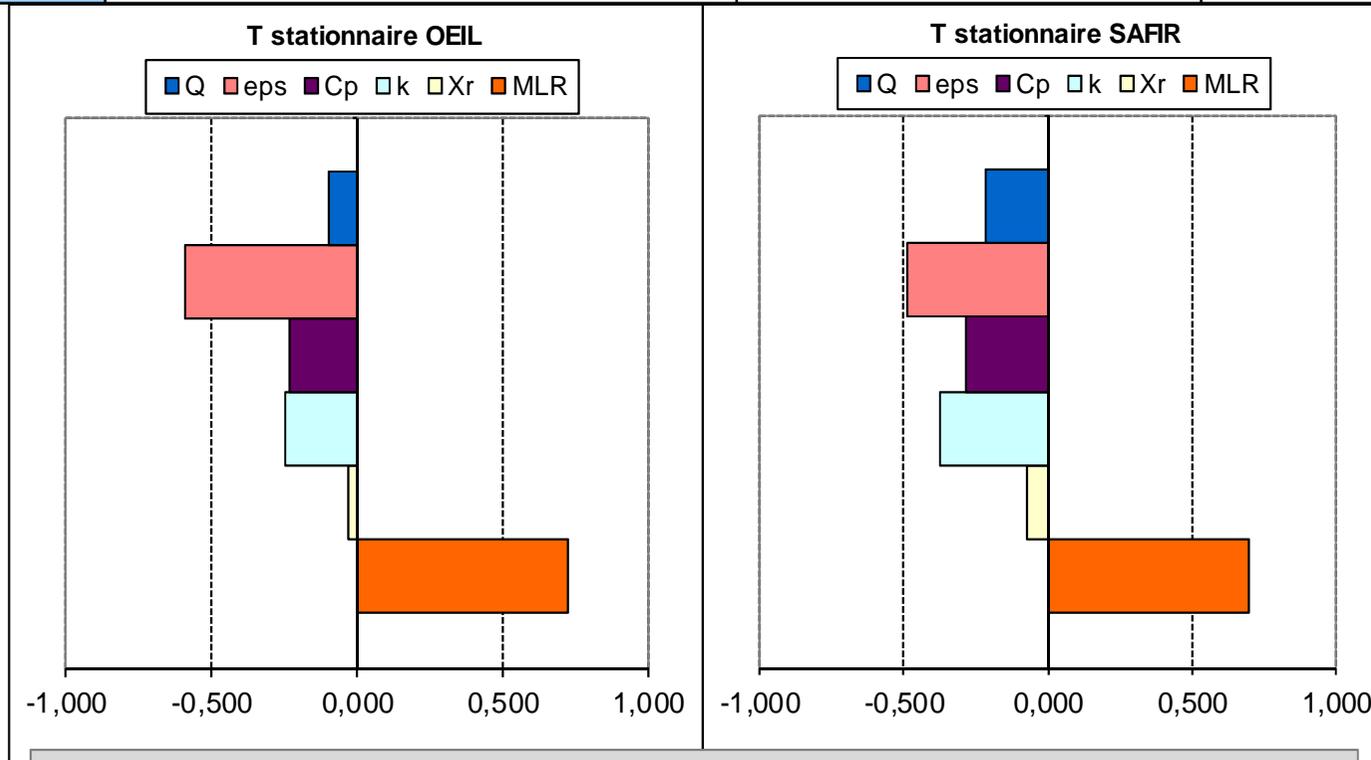


Concentration O₂ ŒIL & SAFIR

L'Analyse de Sensibilité (6)

Le modèle à zones ŒIL (*) et le code 3D SAFIR (**)

T2	Température moyenne verticale quart NE (°C)	(-1.5; -1.25; Z)	Moyenne sur [1500;2500 s]
-----------	--	-------------------------	----------------------------------



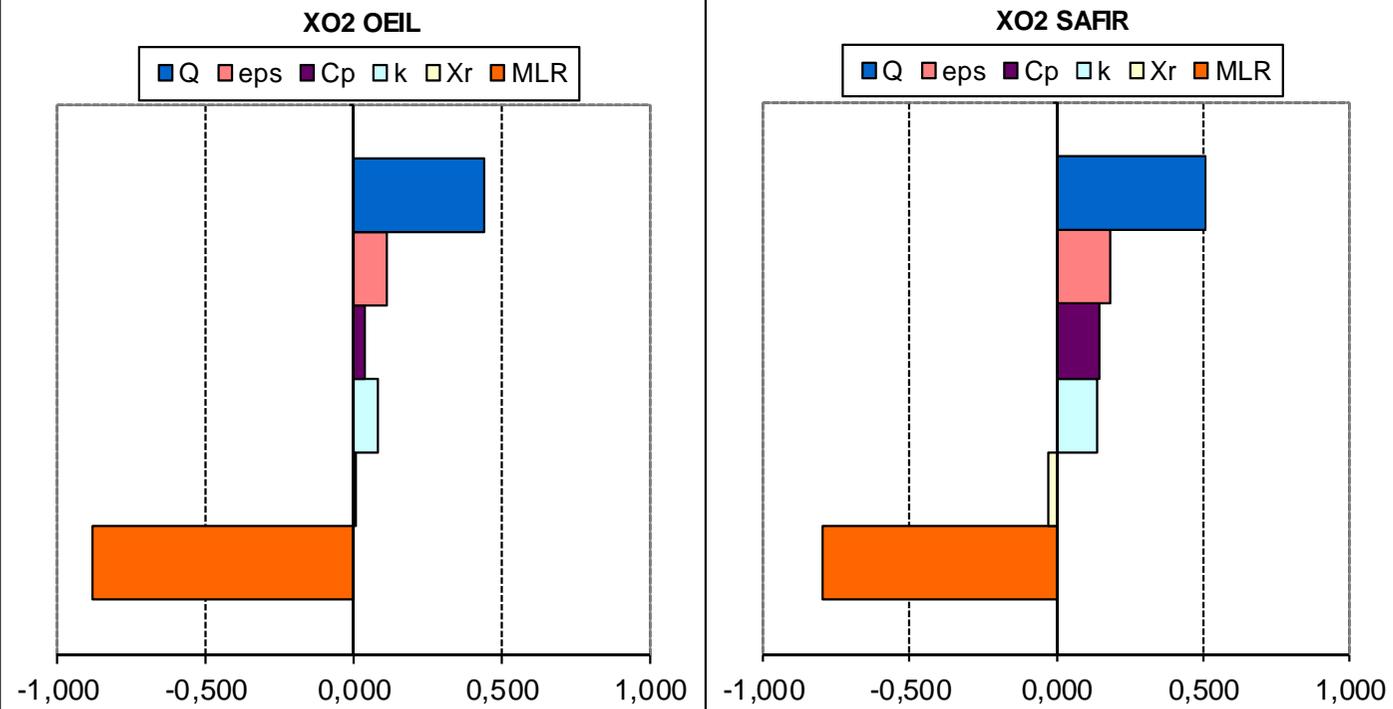
T2, dans la phase stationnaire, dépend essentiellement de:

- l'émissivité des parois (effet <0)
- du débit-masse de pyrolyse (effet >0)

L'Analyse de Sensibilité (7)

Le modèle à zones ŒIL (*) et le code 3D SAFIR (**)

XO2	Fraction molaire d'oxygène couche chaude	(-1.5; -1.25;3.3)	Min sur [0; 3600 s]
------------	---	--------------------------	----------------------------

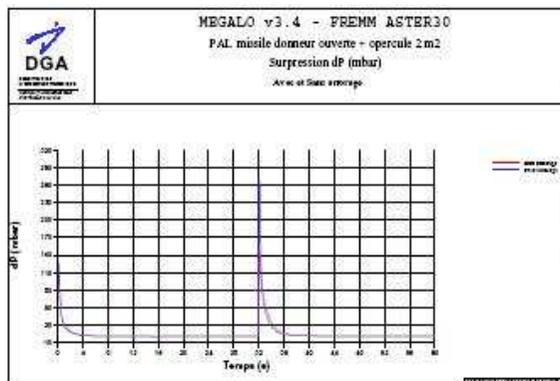
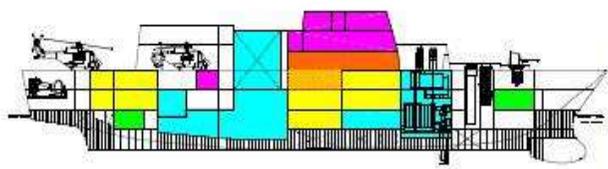


XO2 dépend essentiellement de :

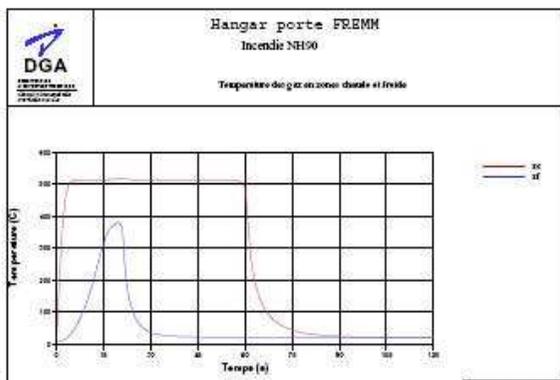
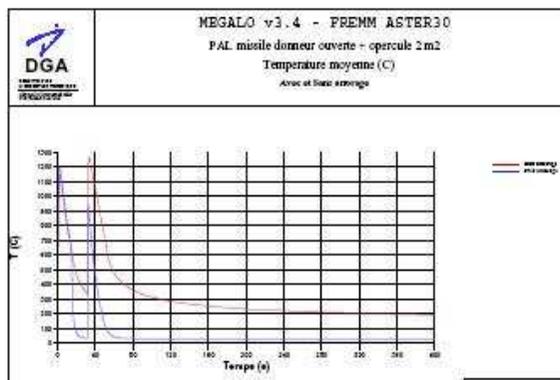
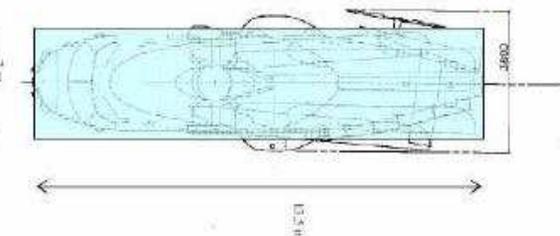
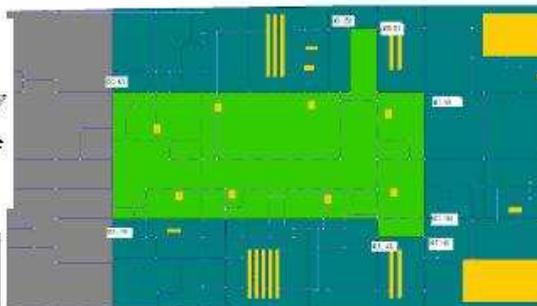
- du débit de ventilation (effet >0)
- du débit-masse de pyrolyse (effet <0)

Exemple d'application - Modèle à zones OEIL

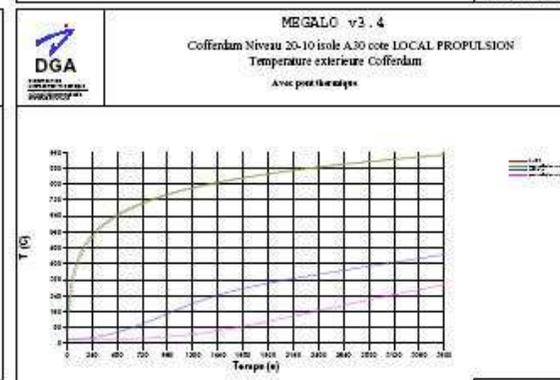
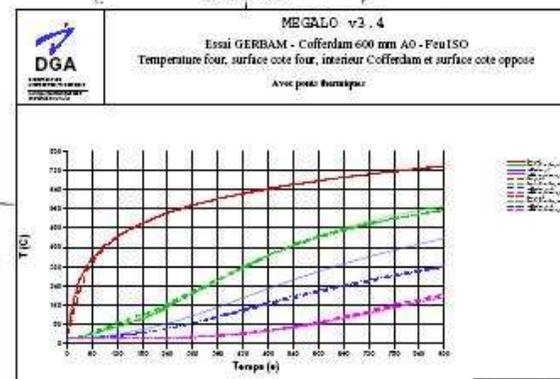
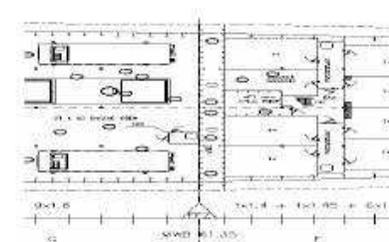
Feu de munitions dans le puits VLS



Incendie dans le Hangar Hélico



Tenue au feu d'un cofferdam



Programme FREMM (de 2007 à 2013, 15 études)

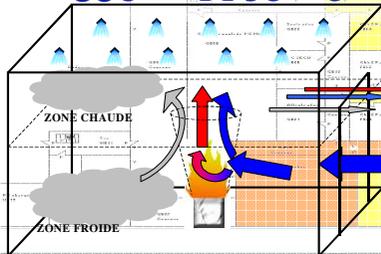
La Maîtrise des Risques à bord des navires

Les outils de simulation numérique

LUCIFER (*): Logiciel macroscopique de propagation d'incendie à l'échelle du navire

Feux classiques
aérobie

850 - 1100 °C

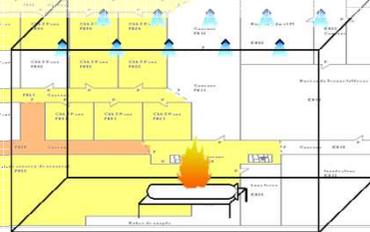


OD-1D
Codes

OEIL (*)

Feux pyrotechniques
anaérobie

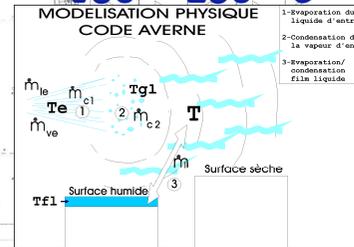
2000 - 3000 °C



MEGALO (*)

Risque vapeur

150 - 250 °C



AVERNE (*)

Bilan Thermique
multilocaux
20 à 200 °C

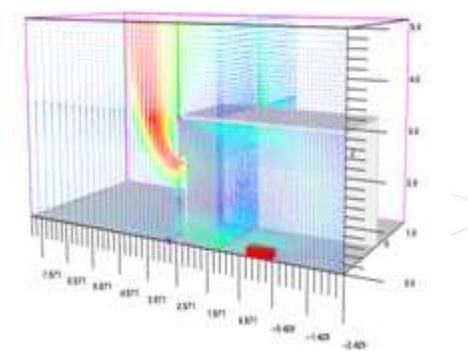
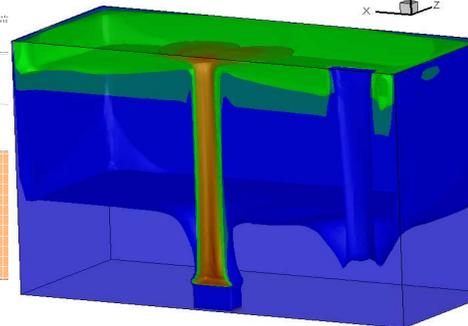
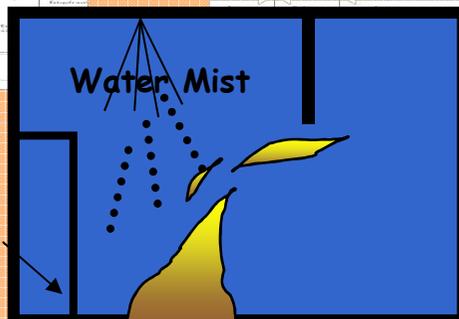


KoZiBu (***)

REPARE (*)
PROPAGAZ (*)
FLAM2 (*)

- > Tenue au feu d'une paroi (isolée/arrosée)
- > Transport des fumées dans une gaine de ventilation
- > Tenue à l'échauffement d'une munition

2D-3D
CFD Codes



SAFIR (**) code CFD 3D et multilocaux spécifique incendie

Liberté - Egalité - Fraternité
REPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE
DE LA DÉFENSE

DGA

(*) Tous droits réservés DGA Tn

(**) Tous droits réservés DGA Tn/IUSTI (***) Tous droits réservés JNLOG

La modélisation d'un incendie en milieu confiné

Les modèles à zones

Conclusions et Perspectives

Un des moyens de simulation d'un incendie en milieu confiné, relativement simple à développer et à utiliser pour peu que les précautions suivantes soient prises en compte :

- ✓ Le développement d'un modèle implique une bonne connaissance du domaine dans lequel il va être utilisé, de la physique du feu mais aussi des méthodes numériques*
- ✓ Un modèle ne peut être prédictif que s'il a été préalablement validé et qualifié, d'où la nécessité de disposer d'essais bien instrumentés*
- ✓ Un modèle ne doit pas être utilisé hors ses limites d'établissement et de validation*
- ✓ Un modèle doit sans cesse évoluer pour rester pertinent*