



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt

(DRA 03)

Rapport intermédiaire d'Opération
Modélisation de l'incendie en milieu confiné

F. CRETIN, A. CARRAU

Décembre 2000

Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt

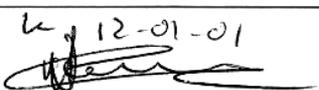
(DRA 03)

Rapport intermédiaire d'Opération
Modélisation de l'incendie en milieu confiné

F. CRETIN, A. CARRAU

18 décembre 2000

Ce document comporte 68 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	F. CRETIN	A. CARRAU	D. GASTON
Qualité	Stagiaire à la Direction des Risques Accidentels	Responsable de programme à la Direction des Risques Accidentels	Directeur Adjoint à la Direction des Risques Accidentels
Visa		le 12-01-01 	

PREAMBULE

Le présent document a été établi :

- au vu des données scientifiques et techniques disponibles ayant fait l'objet d'une publication reconnue ou d'un consensus entre experts,
- au vu du cadre légal, réglementaire ou normatif applicable.

Il s'agit de données et informations en vigueur à la date de l'édition du document, le 18 décembre 2000.

Le présent document comprend des propositions ou recommandations. Il n'a en aucun cas pour objectif de se substituer au pouvoir de décision du ou des gestionnaire(s) du risque ou d'être partie prenante.

TABLE DES MATIERES

1. RESUME	5
2. PREAMBULE.....	6
3. INTRODUCTION	6
4. GÉNÉRALITES SUR L'INCENDIE	7
4.1 Feu et combustion	7
4.2 Inflammation.....	7
4.3 Effets d'un incendie.....	7
4.4 Feux en espace confiné	8
5. LES CODES A ZONES	11
5.1 Présentation des codes à zones	11
5.2 Le code à zone CFAST	11
6. SIMULATIONS D'INCENDIE PAR LES CODES CFD.....	17
6.1 Introduction.....	17
6.2 Le code Fire Dynamics Simulator	17
6.3 Utilisation de la méthode LES	22
7. SIMULATIONS D'INCENDIES DANS UN HANGAR.....	25
7.1 CAS TEST D'INCENDIES DANS UN HANGAR AVEC CFAST	25
7.2 SIMULATION DES EXPERIENCES AVEC FDS	35
8. COMPARAISONS SIMULATIONS/EXPERIENCES D'UN FEU DE PYRIDINE EN ESPACE CONFINE.....	38
8.1 PRESENTATION DE L'EXPERIENCE	38
8.2 MODELISATION DE L'EXPERIENCE AVEC CFAST	40
8.3 CALCULS DES TEMPERATURES DANS LA CHAMBRE AVEC FDS ..	46
9. SIMULATION D'INCENDIES DANS LES PARCS OUVERTS A VOITURES	51
9.1 CONTEXTE DE L'ETUDE	51
9.2 ETUDE AVEC CFAST	53
9.3 ETUDE COMPLEMENTAIRE AVEC FDS	59
10. CONCLUSION	63
NOMENCLATURE	64

RÉFÉRENCES66
11. LISTE DES ANNEXES68

1. RESUME

A l'heure actuelle, les codes de calcul modélisant l'incendie en milieu confiné peuvent être classés en deux grandes familles :

- les codes dit à zones,
- les codes à champ ou codes dits "CFD" (Computational Fluid Dynamics).

Dans le cadre de cette étude , deux codes de calcul provenant du National Institute of Standards and Technology (U.S.A) ont été testés :

- le code à zone CFAST plus spécifiquement utilisé dans le milieu du bâtiment,
- le code à champ Fire Dynamics Simulator utilisant des méthodes de résolution novatrices pour ce genre de situation.

Des études paramétriques et des évaluations de résultats numériques par rapport à des données expérimentales pour un feu dans un hangar et un feu de pyridine en espace confiné ont permis d'estimer l'intérêt que ces 2 codes pouvaient représenter. Une dernière étude a également été menée sur des incendies dans des parcs de stationnement aériens.

Ces calculs ont montré que CFAST donnait de bons résultats pour des géométries de grandes dimensions de l'ordre de 100×100 mètres. Dans de tels cas, un maillage définissant plusieurs cellules séparées par des murs fictifs permet d'obtenir des informations plus détaillées sur les températures et les hauteurs de couches chaudes. Toutefois, l'approximation en 2 zones ne peut fournir qu'un ordre de grandeur pour les températures dans de tels espaces.

Un code à champ tel que FDS présente une mise en œuvre plus complexe qu'un code à zone. Un tel logiciel permet une modélisation beaucoup plus fine du développement de l'incendie. Les trois exemples traités dans ce rapport montrent l'intérêt de posséder un tel outil. Par contre, les temps de calcul encore élevés limitent pour l'instant son champ d'application.

Ce code nécessite encore des développements et un travail de validation mais offre des perspectives très intéressantes pour des modélisations incendie.

2. PREAMBULE

Ce rapport repose principalement sur le travail réalisé à l'INERIS par F. Cretin sous l'encadrement de A. Carrau dans le cadre d'un stage de troisième année d'école d'ingénieur (ISTIL) et d'un DEA (Université de Lyon).

3. INTRODUCTION

L'étude du développement d'un incendie dans un entrepôt passe par la modélisation de celui-ci.

A l'heure actuelle, deux grandes familles de modèle existent pour modéliser l'incendie dans un milieu confiné :

- les codes à zone,
- les codes à champ ou codes tridimensionnels.

Les codes à zone sont basés sur une simplification tirée d'observations expérimentales. Cette simplification consiste à découper l'écoulement en deux zones homogènes : une zone haute ou couche chaude et une zone basse ou dite froide.

Les codes à champ sont basés sur la résolution complète des équations de la mécanique des fluides. Ils permettent de décrire finement un écoulement mais présentent une complexité de mise en œuvre beaucoup plus importante.

Dans le cadre de cette étude, deux codes de calcul ont été étudiés afin de voir leur adéquation avec la problématique des entrepôts : le code à zone CFAST et le code à champ FDS. Ils ont été développés par le NIST (National Institute of Standard and Technology, USA).

Pour cela, trois exemples ont été traités :

- un incendie dans un entrepôt,
- la modélisation d'essais de feu de pyridine réalisés à l'INERIS dans la chambre à 80 m³,
- la modélisation d'incendie dans un parc ouvert.

4. GENERALITES SUR L'INCENDIE

4.1 FEU ET COMBUSTION

Un feu est un phénomène physico-chimique. Il est basé sur la réaction d'un combustible avec un comburant. Dans la grande majorité des cas, le comburant est de l'oxygène présent à 21% dans l'air. Pour que la réaction soit possible, une quantité d'énergie, appelée énergie d'activation doit être apportée (exemple de l'allumette sur le grattoir). Très souvent le phénomène de combustion est illustré par le triangle du feu (Figure 1).

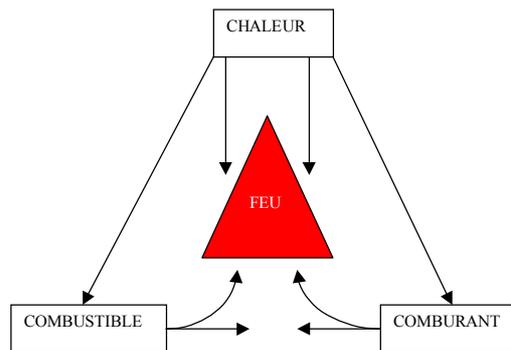


Figure 1 : triangle du feu

4.2 INFLAMMATION

Le combustible peut être initialement un liquide, un gaz ou un solide. Mais le phénomène de combustion s'effectue sur un produit à l'état gazeux ou sous forme de vapeurs. Pour que l'inflammation ait lieu, une condition nécessaire est que la concentration de gaz dans le mélange combustible-comburant soit comprise entre la limite inférieure et supérieure d'inflammabilité (respectivement LII et LSI).

Pour un solide, l'énergie calorifique apportée a ensuite pour rôle de porter le mélange à une température minimale appelée température d'auto-inflammation. Pour un liquide, on parlera de point éclair.

4.3 EFFETS D'UN INCENDIE

Un feu est caractérisé par le flux d'énergie qu'il dégage par unité de temps en Watts (J/s) ou par un débit calorifique (énergie par unité de temps et de masse) responsable des augmentations de température. Cette énergie dépend des caractéristiques et de la quantité de combustible et du comburant (oxygène) mis en jeu. La flamme qui est observée lors d'un feu représente la libération d'une certaine quantité de cette énergie par un rayonnement dans le domaine du visible.

Il y a 4 formes de propagation de l'énergie produite :

- la radiation,
- la conduction,
- la convection,

- les brandons.

La radiation est l'émission d'ondes électromagnétiques qui transportent une partie de l'énergie. Cette énergie est proportionnelle à la puissance 4 de la température. C'est le transfert de chaleur prédominant dès lors que la température est supérieure à 400°C.

La convection est le transport de l'énergie par les mouvements de fluide. Ainsi, la couche limite thermique le long d'une paroi est en relation avec les variations de vitesse des particules à cette paroi (couche limite cinématique).

La conduction est le transfert de chaleur à travers les solides (murs, plafond, etc.). Le transfert d'énergie de cette manière est relié au gradient de température par la loi de Fourier.

Les brandons sont des petites flammellettes qui se dégagent des flammes principales d'un foyer.

La consommation d'oxygène (présent dans l'air) et la production de chaleur génère également d'autres phénomènes et en particulier un écoulement au-dessus de la source combustible qui constitue le panache. La température est plus importante et sous l'effet des forces d'Archimède, il y a une montée des produits de la réaction (fumées, gaz imbrûlés, suie) créant ainsi un mouvement d'entraînement d'air qui alimente le feu en oxygène (Figure 2).

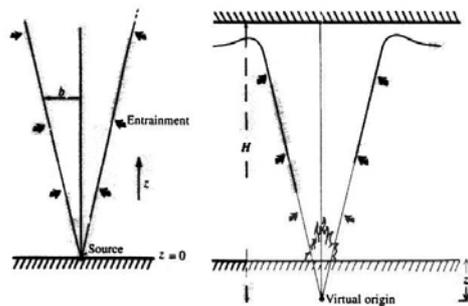


Figure 2 : entraînement d'air dans le panache d'un feu

4.4 FEUX EN ESPACE CONFINE

La complexité de l'ensemble de ces phénomènes est nettement accentuée lorsque l'on considère un feu en espace clos car un grand nombre d'objets et d'interactions doivent être pris en compte pour étudier les transferts de matière et les transferts thermiques. La difficulté vient du fait qu'en espace clos, la quantité d'air et plus spécifiquement la quantité d'oxygène disponible est un paramètre fondamental qui va gouverner le développement ou non du feu. Ainsi, selon la ventilation, la combustion peut être ralentie voire s'arrêter et on parle alors de feux sous ventilé.

Ces feux peuvent être décomposés en 4 étapes dans le temps (Figure 3) :

- Etape 1 : Le feu commence à se développer. Lors de cette étape, le panache constitué par les gaz chauds issus de la combustion montent au plafond sous l'effet des forces d'Archimède. De l'air frais est entraîné dans cette montée et attise le foyer. L'entraînement d'air dans le panache augmente le volume de fumées. Dès que ces gaz ont atteint le plafond, ils s'étalent radialement formant ainsi une mince couche appelée le jet de plafond.
- Etape 2 : La fumée constituée de particules fines commence à descendre du plafond sous l'effet de la gravité car sa température a diminué. Elle occupe peu à peu la pièce. Si la pièce n'est pas bien ventilée la température dans l'enceinte peut être très importante. De plus, le manque d'oxygène rend la combustion incomplète et la quantité de gaz imbrûlés importante. L'atmosphère peut devenir alors explosive.
- Etape 3 : Ces fumées s'étendent à d'autres pièces par l'intermédiaire des minces ouvertures. Si les portes sont fermées, la combustion peut cesser et la température lentement diminuer. Cependant, même si la réaction de combustion est arrêtée, un apport d'oxygène peut enflammer les gaz imbrûlés car la température est suffisamment élevée. Si par exemple une porte s'ouvre, alors il y a un phénomène de flashover et l'ensemble de ces gaz dispersés dans toute la pièce réagit fortement et l'incendie se généralise.
- Etape 4 : Le feu est complètement généralisé à toute la pièce grâce au contact de l'air frais. On atteint le pic de chaleur qui va diminuer très rapidement.

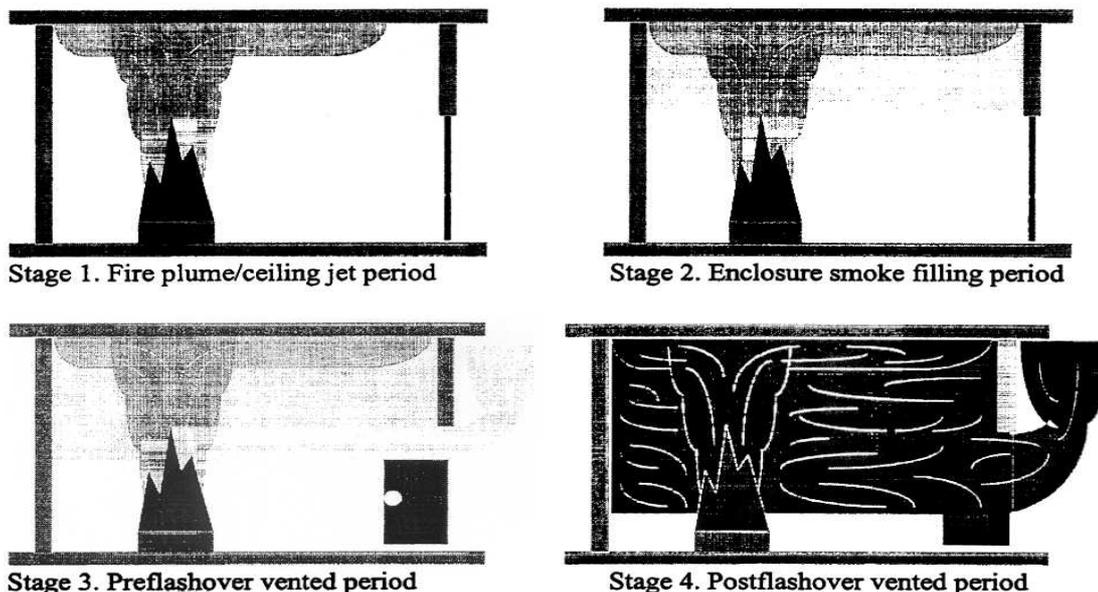


Figure 3 : étapes d'un feu en espace confiné

Le flashover est une étape de transition rapide entre la croissance et le plein développement du feu, ce qui provoque un incendie généralisé.

Un phénomène apparenté est le backdraft ou retour de flamme qui concerne les milieux très confinés. Dans ce cas, le contact des imbrûlés contenus dans une pièce avec de l'oxygène par l'ouverture brutale d'une ventilation provoque une explosion.

Le flashover comme le backdraft sont des phénomènes qui sont très redoutés par les pompiers car ils sont à l'origine de nombreux accidents mortels.

5. LES CODES A ZONES

5.1 PRESENTATION DES CODES A ZONES

Les codes à zones sont des codes de calcul destinés à prédire l'environnement à l'intérieur d'un bâtiment dans lequel se sont développés un ou plusieurs feux. Ils sont basés sur une simplification tirée d'observations expérimentales qui est le découpage en 2 zones à peu près homogènes (en température, en espèces chimiques, en densité optique, etc.) du volume d'une pièce lors du développement d'un feu dans un espace clos (Figure 4).

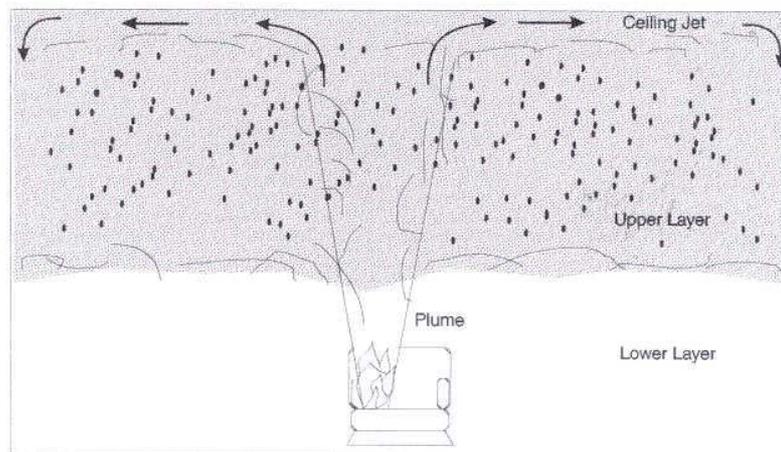


Figure 4 : modèle à 2 zones

La zone ou couche haute est dite chaude alors que la couche basse est dite froide. La température de cette couche est proche de la température ambiante. Il existe des variations à l'intérieur des zones mais elles sont petites voire négligeables par rapport à celles existant entre les 2 zones. Le phénomène observé s'explique par l'effet des forces d'Archimède auxquels sont soumis les gaz chauds ou les produits de combustion sous l'effet de la température.

Les codes à zones ont été développés pour prédire les hauteurs des interfaces entre les couches ainsi que leurs caractéristiques. Ils sont en général basés sur des modèles itératifs simples et procurent l'avantage d'obtenir des résultats très rapidement, minimisant ainsi les coûts de calculs.

5.2 LE CODE A ZONE CFAST

De nombreux codes à zone existent à l'heure actuelle. Pour une première approche, le code à zone qui a été étudié est le code CFAST (CFAST est la version graphique du code FAST 3.1.6). Le code CFAST est développé depuis une dizaine d'années par le laboratoire américain BFRL (Building and Fire Research Laboratory) du NIST (National Institute of Standard and Technology). Ce code qui fait référence dans le monde est en accès gratuit.

CFAST a été développé pour l'étude des feux dans les bâtiments composés d'appartements et de pièces séparées par des murs. Son but premier est de comprendre les phénomènes qui entrent en jeu lors d'un incendie dans un tel environnement. Il apporte des informations intéressantes pour les services d'intervention à la suite d'un accident afin de confirmer ou de comprendre les causes de celui-ci. Mais il peut également être utilisé pour évaluer les conséquences de plusieurs scénarios d'incendie.

Le but de l'étude est de vérifier la validité des résultats obtenus dans le cas des espaces larges tels que les entrepôts ou les parcs de stationnement qui peuvent ne pas être satisfaisants dans la mesure où CFAST est principalement basé sur des corrélations empiriques dont le domaine de validité est mal défini.

5.2.1 Principe du modèle

CFAST est basé sur la résolution d'équations différentielles ordinaires à conditions initiales avec comme termes sources : des débits massiques \dot{m} (transferts de masse en kg/s) et des enthalpies \dot{s} (transferts de chaleur en W). Ces équations sont déduites des équations de base de conservation de la masse, de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la loi des gaz parfaits. Ces équations sont appliquées aux systèmes formés par les zones (zones chaudes et froides).

Lors d'un calcul, au temps $t=0$, la couche basse prend tout le volume d'un compartiment puis par les transferts de masse et de chaleur, la couche haute augmente en volume alors que le volume de la couche basse diminue. Chaque couche est supposée complètement homogène ce qui constitue une des limites du modèle car il n'est pas possible de calculer par exemple des gradients de température dans une zone.

5.2.2 Equations du modèle

Un compartiment est divisé en 2 zones. A chaque zone est attribuée une masse, une énergie interne, une densité, une température respectivement définies par m , E , ρ , T .

Pour une zone n° i , ces variables sont calculées à partir des équations suivantes :

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i \quad (1)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} (\dot{s}_i + V_i \frac{dP}{dt}) \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_i}{dt} = -\frac{1}{c_p \rho_i V_i} \left((\dot{m}_i T_i) + V_i \frac{dP}{dt} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{\gamma P} \left((\gamma - 1) \dot{s}_i - V_i \frac{dP}{dt} \right) \quad (4)$$

L'entropie \dot{s} est définie par la première loi de la thermodynamique :

$$\frac{dE_i}{dt} + P \frac{dV_i}{dt} = \dot{s}_i \quad (5)$$

La pression P est la même dans l'ensemble d'un compartiment. Elle est décomposée en une pression de référence P_{ref} et une variation de pression ΔP par la relation : $P = P_{ref} + \Delta P$.

Cette pression est calculée par l'équation suivante au cours du temps :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (S_{basse} - S_{haute}) \quad (6)$$

où V représente le volume total du compartiment et S_{haute} , S_{basse} sont respectivement les enthalpies des couches hautes et basses.

Ces équations 1, 2, 3, 4, 6 sont résolues par un solveur d'équations différentielles à condition initiale ; le système ainsi obtenu est de la forme :

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(y, t) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

5.2.3 Transferts de masse

Les transferts modélisant l'écoulement se produisent d'une part entre les zones d'un compartiment et d'autre part entre les compartiments eux-mêmes.

Au niveau du compartiment contenant la source, le transfert de masse entre la zone froide à la zone chaude s'effectue au niveau du panache du feu (Figure 4). Cette masse dépend de la quantité de combustible pyrolysée (paramètre d'entrée) \dot{m}_f et de la quantité d'air entraînée \dot{m}_e dans le panache ("plume") estimée par le modèle empirique de McCaffrey selon la relation :

$$\dot{m}_{panache} = \dot{m}_e + \dot{m}_f$$

avec $\dot{m}_e < \frac{\dot{Q}_c}{c_p (T_{chaude} - T_{froide})}$

La quantité $\dot{m}_{panache}$ représente la masse transférée entre les 2 zones.

Initialement, le panache était pris en compte dans CFAST séparément des zones. Une mauvaise prédiction de l'évolution de l'interface entre les couches au cours du temps a conduit à ne plus séparer ces zones mais à limiter la quantité d'air entraînée \dot{m}_e dans le panache [2].

Les transferts entre compartiments dus à des différences de pression sont quant à eux estimés à partir de l'équation de Bernoulli.

5.2.4 Paramètres d'entrée

Pour un calcul de base, relativement peu de paramètres d'entrée sont nécessaires ou utiles. En fait, il existe 2 types de calculs liés à la connaissance plus ou moins bonne de la réaction de combustion générant l'incendie :

- un calcul pour un feu contraint par la quantité d'oxygène disponible (par exemple pour des cas de sous-ventilation)
- un calcul pour un feu non contraint supposant la réaction de combustion totale.

Pour pouvoir considérer un feu contraint, il est nécessaire de disposer de données sur l'évolution des propriétés chimiques du combustible et des produits de la combustion, ce qui est rarement le cas en pratique. Ce cas est cependant intéressant car il est possible de calculer des concentrations d'espèces telles que l'oxygène ou le monoxyde de carbone dans chaque zone d'un compartiment.

5.2.4.1 Le feu non contraint

La définition du feu est basée sur les données de base suivantes :

- \dot{Q} : puissance thermique dégagée en fonction du temps (kW),
- \dot{m} : vitesse de combustion en fonction du temps (kg/s),
- H_c : enthalpie de combustion du combustible (kJ/kg).

Ces trois paramètres sont reliés par la formule : $\dot{Q} = \dot{m}H_c$. Ainsi la définition de 2 paramètres sur les 3 définit complètement la source. A priori la connaissance de \dot{Q} est impossible pour un calcul, alors que \dot{m} et H_c sont des caractéristiques du produit et donc plus faciles à définir. L'enthalpie H_c est une constante, ce qui n'est vrai que pour des produits purs dont la composition chimique ne varie pas au cours de la combustion. Cependant, en entrant à la fois \dot{Q} et \dot{m} , il est possible de s'affranchir de cette difficulté.

La fraction de radiation χ_r est également une donnée de base puisque l'énergie dégagée \dot{Q} se décompose principalement en 2 parties : une puissance rayonnée définie par la formule $\dot{Q}_{radiation} = \chi_r \dot{Q}$ et une puissance convectée donnée par $\dot{Q}_{convection} = (1 - \chi_r) \dot{Q}$. En général, χ_r est compris entre 0.15 et 0.5.

5.2.4.2 Le feu contraint

Pour un tel calcul, il est nécessaire de définir la limite inférieure d'inflammabilité, les propriétés du combustible ($\frac{H}{C}, \frac{O}{C}$) ainsi que les concentrations des produits de combustion ($\frac{HCl}{fuel}, \frac{HCN}{fuel}, \frac{CO}{CO_2}, \frac{suie}{CO_2}$) au cours du temps. Généralement, il est difficile voire impossible de pouvoir fournir ce genre de données. Aussi pour de telles simulations, ce code est utilisé a posteriori d'une expérience permettant d'obtenir ces informations.

5.2.4.3 Les cibles

Alors qu'il n'est possible de définir qu'une seule source principale pour l'incendie, d'autres éléments répertoriés dans une base de données peuvent être positionnés dans l'ensemble du bâtiment défini. L'inflammation de ces objets est déterminée par une température, un flux thermique ou simplement un temps entré par l'utilisateur. Une restriction importante cependant est que la courbe de puissance thermique de ces objets doit avoir une forme particulière du type suivant :

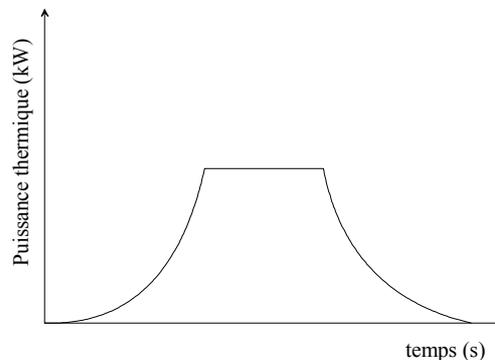


Figure 5 : puissance thermique pour les éléments de la base de données de CFAST

5.2.4.4 Le modèle à une zone

Lorsque les dimensions d'un compartiment sont très petites par rapport à la vitesse de diffusion des espèces ou que la longueur est grande par rapport à la largeur, tel qu'un couloir par exemple, on peut ne prendre en compte qu'une seule zone. En effet, la vitesse de propagation est suffisamment faible pour que les fumées aient le temps de se refroidir et donc de redescendre au niveau du sol avant qu'une couche chaude occupe toute la pièce. Ce modèle peut être employé pour un couloir reliant 2 compartiments.

5.2.4.5 Le réseau de ventilation

Il est possible dans CFAST de définir tout un réseau de ventilation avec des conduites et un mouvement forcé d'air. Il suffit pour cela d'entrer des caractéristiques des ventilateurs et des dimensions de conduite de manière classique (rugosité, courbe de fonctionnement en fonction de la pression pour les ventilateurs, etc.). Le calcul de l'écoulement se fait à l'intérieur de la ventilation par application des équations de Bernoulli.

5.2.4.6 Les détecteurs

Un réseau de détecteur de fumées ou de chaleur ainsi qu'un ensemble de moyen de protection par sprinklage peut être considéré pour étudier les moyens de sécurité à l'intérieur d'un compartiment. Il faut pour cela connaître les caractéristiques des sprinklers (temps de réponse et densité de sprays) ainsi que leur position dans l'espace.

5.2.5 Outils d'estimation

CFAST possède également un certain nombre d'outils d'estimation permettant d'obtenir des ordres de grandeur de certains paramètres tels que la température de jet de plafond, la ventilation pouvant engendrée un flashover pour un feu donné, etc. Ces résultats sont basés sur l'utilisation de corrélations et non de calculs itératifs qui composent l'outil d'estimation FPETool du NIST. La référence [3] regroupe l'ensemble de la théorie de ces corrélations.

6. SIMULATIONS D'INCENDIE PAR LES CODES CFD

6.1 INTRODUCTION

L'idée d'étudier la dynamique d'un feu par des outils de simulation numérique remonte au tout début de l'informatique. Cependant, malgré la connaissance de l'ensemble des équations relatives à la dynamique des fluides, il existe de très nombreuses difficultés auxquelles il faut faire face pour obtenir des résultats raisonnables.

La puissance toujours croissante des moyens de calcul permet aujourd'hui d'envisager de façon sérieuse de résoudre ces équations en 3 dimensions et de pouvoir ainsi simuler des écoulements. Mais dans le cas d'incendie notamment, la complexité est accrue puisqu'il faut considérer également des transferts de chaleur importants et une modélisation pour le processus et les phénomènes de combustion qui sont encore assez mal connus. La nécessité de prendre en compte les phénomènes de turbulence dans ce genre de cas constitue également une difficulté importante.

Les approches classiques du type $k-\varepsilon$ ont permis de faire considérablement avancer les modèles numériques. Aujourd'hui, d'autres techniques différentes comme les modèles de sous-maillages ou même les simulations numériques par calcul direct de la viscosité turbulente sont en plein essor grâce à des résultats prometteurs.

C'est dans ce cadre que le NIST travaille depuis plusieurs années sur la mise au point d'un code CFD (Computational Fluid Dynamics) utilisant la technique *Large Eddy Simulation* (LES) et même tout dernièrement la technique de *Direct Numerical Simulation* (DNS). Ce code nommé *Fire Dynamics Simulator* (FDS) a fait l'objet de cette étude.

6.2 LE CODE FIRE DYNAMICS SIMULATOR

Ce code est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes appropriées aux faibles nombres de Mach et sur des considérations thermodynamiques classiques. Afin de modéliser la turbulence, la technique LES ou bien la technique de simulation directe sont employées pour prendre en compte l'influence des différentes échelles.

La méthode LES permet à partir d'un maillage "grossier" (au sens des petites structures dissipatives) de restituer de la manière la plus fidèle possible les phénomènes grâce à des temps de calcul raisonnables. Néanmoins pour cela, on sait qu'il faut capter des structures suffisamment petites, ce qui constitue une contrainte assez importante sur le pas de maillage et les dimensions physiques du domaine considéré.

La méthode directe (DNS) permet quant à elle une résolution dans laquelle la viscosité turbulente n'est pas modélisée mais calculée directement en fonction des espèces. Cette résolution est encore en plein développement et pose toujours de très nombreuses difficultés en raison d'une part du modèle de combustion et d'autre part des temps de calcul.

Pour ces raisons, dans le cadre de ce rapport, seule la méthode LES a été étudiée.

6.2.1 Principe et objectifs du modèle

Ce code a été spécialement développé dans le but de modéliser les conséquences d'incendie de taille industrielle.

Les objectifs poursuivis dans le développement du code FDS sont multiples. Premièrement en tant que code CFD, il permet la modélisation de la dynamique du feu. On peut penser qu'à terme avec l'amélioration croissante de la puissance de calcul il sera possible d'obtenir une résolution permettant une simulation de plus en plus proche de la réalité. Deuxièmement il est destiné à prévoir les conséquences d'un incendie dans de très diverses géométries. Il est à l'heure actuelle au cœur d'un programme entre le NIST et les industriels américains pour améliorer la prédiction des moyens de protection (influences entre sprinklers, cantonnements et événements).

6.2.2 Equations du modèle hydrodynamique

Pour un mélange de gaz idéaux, les équations de base sont les équations de conservation de la mécanique des fluides :

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (7)$$

Conservation des espèces :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_e) + \vec{\nabla} \cdot (\rho Y_e \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\rho D)_i \vec{\nabla} Y_e + \dot{W}_e'' \quad (8)$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right) + \vec{\nabla} p = \rho \vec{g} + \vec{f} + \vec{\text{div}} \vec{\tau} \quad (9)$$

Conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \vec{\nabla} \cdot (\rho h \vec{u}) - \frac{dp}{dt} = \dot{q}''' + \vec{\nabla} \cdot k \vec{\nabla} T + \vec{\nabla} \cdot \sum_{\text{espèces } e} h_e (\rho D)_e \vec{\nabla} Y_e \quad (10)$$

Dans l'équation (10), $\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} p$ représente la dérivée particulaire de la pression p .

La pression p se décompose en 3 termes par la relation :

$$p = p_0 - \rho_\infty g z + \tilde{p}$$

avec \tilde{p} perturbation de pression et $p_0 = p_0(t)$.

Pour des faibles nombres de Mach, on a de plus l'équation d'état des gaz parfaits

$$p_0(t) = \rho T R \sum_{\text{espèces } e} \left(\frac{Y_e}{M_e} \right) \quad (11)$$

En tenant compte du fait que la chaleur spécifique de l'espèce i est supposée indépendante de la température on obtient les 2 équations suivantes pour la pression p_0 :

$$p_0(t) = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \rho h \quad (12)$$

$$\frac{dp_0}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} \left(\int_{\Omega} \dot{q}''' dV + \int_{\partial\Omega} k \bar{\nabla} T d\bar{S} + \sum_{\text{espèces}} \int_{\partial\Omega} c_{p,e} T \rho D \bar{\nabla} Y_e d\bar{S} \right) - \frac{\gamma p_0}{V} \int_{\partial\Omega} \bar{u} d\bar{S} \quad (13)$$

La divergence de la vitesse est ensuite extraite de l'équation (10) de conservation des espèces :

$$\text{div} \bar{u} = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0} \left(\dot{q}''' + \bar{\nabla} \cdot k \bar{\nabla} T + \bar{\nabla} \cdot \sum_{\text{espèces}} c_{p,e} T \rho D \bar{\nabla} Y_e - \frac{1}{\gamma - 1} \frac{dp_0}{dt} \right) \quad (14)$$

Enfin, une pseudo-pression totale définie par $\bar{\nabla} H = \frac{1}{2} \bar{\nabla} |\bar{u}|^2 + \frac{\bar{\nabla} \tilde{p}}{\rho}$ est introduite dans l'équation (9) :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{\nabla} H = \frac{1}{\rho} \left((\rho - \rho_{\infty}) \bar{g} + \bar{f} + \overrightarrow{\text{div}} \bar{\tau} \right) + \bar{u} \times \bar{\omega} \quad (15)$$

La dérivée de l'équation (15) donne une équation dite de Poisson pour la pression :

$$\Delta H = - \frac{\partial(\text{div} \bar{u})}{\partial t} - \text{div} \bar{F} ; \bar{F} = - \bar{u} \times \bar{\omega} - \frac{1}{\rho} \left((\rho - \rho_{\infty}) \bar{g} + \bar{f} + \overrightarrow{\text{div}} \bar{\tau} \right) \quad (16)$$

L'ensemble des passages ne sont pas détaillés mais le lecteur pourra se reporter à la référence [10] pour plus de détails.

Les équations étant établies, il se pose le problème du calcul de la viscosité dynamique dans le tenseur des contraintes : $\tau = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$ apparaissant dans l'équation

(16). L'emploi de la méthode LES détaillée plus loin permet de résoudre cette difficulté.

6.2.3 Résolution numérique

6.2.3.1 Rappel des équations

Le système d'équations implémentées dans les calculs sont les suivantes :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = -\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_e) + \vec{\nabla} \cdot (\rho Y_e \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\rho D)_i \vec{\nabla} Y_e + \dot{W}_e''' \quad (18)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x_i} + F_i = 0 \quad \text{avec } F_i = (\vec{u} \times \vec{\omega})_i - \frac{1}{\rho} ((\rho - \rho_\infty) g_i + f_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}) \quad (19)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0} (\dot{q}''' + \frac{\partial}{\partial x_i} (k \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{\text{espèces}} c_{p,e} T \rho D \frac{\partial Y_e}{\partial x_i} - \frac{1}{\gamma - 1} \frac{dp_0}{dt}) \quad (20)$$

$$p_0(t) = \rho T R \sum_{\text{espèces}} \left(\frac{Y_e}{M_e} \right) \quad (21)$$

L'équation de Poisson de la pression (16) qui est la dérivée spatiale de l'équation (19) est également utilisée.

Chaque variable est traitée séparément selon la méthode numérique décrite au paragraphe suivant.

6.2.3.2 Principe de la méthode numérique

Le principe de la méthode numérique réside en une approximation des dérivées spatiales par des différences centrées du second ordre. Un schéma prédictor-correcteur explicite du second ordre est appliqué pour l'incrémentation en temps des variables. Le principe de la méthode de résolution de ce système d'équations s'établit comme suit :

- 1- A $t=t_n$, ρ , Y , (u,v,w) , H , p_0 sont connus. Toutes les autres quantités découlent de ces variables.

Les particules sont injectées dans l'écoulement, de même que d'éventuelles gouttelettes des sprinklers. Les termes diffusifs et convectifs F_i de l'équation de conservation de la quantité de mouvement - équation (19) - sont calculés.

- 2- Les valeurs de ρ , Y , p_0 sont estimées au temps $n+1$ par un schéma d'Euler explicite. A partir de ces quantités, une divergence de la vitesse estimée est déduite.
- 3- résolution de l'équation de Poisson - équation (16) - par une transformée de Fourier permettant de déterminer une estimation de la vitesse :

$$\Delta H = - \frac{(\overrightarrow{\text{div}} \vec{u})^{(n+1)_e} - (\overrightarrow{\text{div}} \vec{u})^n}{\delta t} - (\overrightarrow{\text{div}} \vec{F})^n$$

$$\vec{u}^{(n+1)_e} = \vec{u}^n - \delta t (\vec{F}^n + \vec{\nabla} H^n)$$

La condition de stabilité est vérifiée avant de corriger les valeurs estimées. Cette condition CFL porte sur le pas de temps qui doit satisfaire la relation suivante :

$$\delta t < \min\left(\frac{\delta x}{u}, \frac{\delta y}{v}, \frac{\delta z}{w}\right)$$

Dans le cas contraire, une nouvelle procédure d'estimation est effectuée avec un pas de temps corrigé.

4- correction de toutes les quantités au pas de temps $n+1$.

6.2.3.3 Résolution de la masse volumique

Il n'est détaillé dans ce rapport que le calcul de la masse volumique ρ . Le lecteur pourra se reporter à la documentation [10] pour plus de précision.

Estimation de ρ à l'instant t_{n+1} :

$$\rho_{ijk}^{(n+1)e} = \rho_{ijk}^n - \delta t ((\vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho)_{ijk}^n + \rho_{ijk}^n (\text{div} \vec{u})_{ijk}^n)$$

avec

$$\left\{ \begin{aligned} (\vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho)_{ijk} &= \frac{1 \pm \varepsilon_u}{2} u_{ijk} \frac{\rho_{i+1,jk} - \rho_{ijk}}{\delta x} + \frac{1 \pm \varepsilon_u}{2} u_{i-1,jk} \frac{\rho_{ijk} - \rho_{i-1,jk}}{\delta x} + \\ &\quad \frac{1 \pm \varepsilon_v}{2} v_{ijk} \frac{\rho_{i+1,jk} - \rho_{ijk}}{\delta y} + \frac{1 \pm \varepsilon_v}{2} v_{i,j-1,k} \frac{\rho_{ijk} - \rho_{i,j-1,k}}{\delta y} + \\ &\quad \frac{1 \pm \varepsilon_w}{2} w_{ijk} \frac{\rho_{ij,k+1} - \rho_{ijk}}{\delta z} + \frac{1 \pm \varepsilon_w}{2} w_{ijk} \frac{\rho_{ijk} - \rho_{ij,k-1}}{\delta z} \\ (\text{div} \vec{u})_{ijk} &= \frac{u_{ijk} - u_{i-1,jk}}{\delta x} + \frac{v_{ijk} - v_{i,j-1,k}}{\delta y} + \frac{w_{ijk} - w_{ij,k-1}}{\delta z} \end{aligned} \right.$$

Les nombres ε sont les nombres CFL locaux. La divergence pouvant être estimée au pas $n+1$, la valeur corrigée de ρ à ce pas de temps est déduite par :

$$\frac{\rho_{ijk}^{n+1} - \frac{1}{2}(\rho_{ijk}^n + \rho_{ijk}^{(n+1)e})}{\frac{1}{2}\delta t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho)_{ijk}^{(n+1)e} = -\rho_{ijk}^{(n+1)e} (\text{div} \vec{u})_{ijk}^{(n+1)e}$$

Une particularité du code est le calcul en maillage décalé ou "staggered grid". Les vitesses sont calculées aux interfaces des cellules alors que les quantités thermodynamiques telles que p , ρ , T , Y_e , le sont aux centres des cellules (Figure 6).

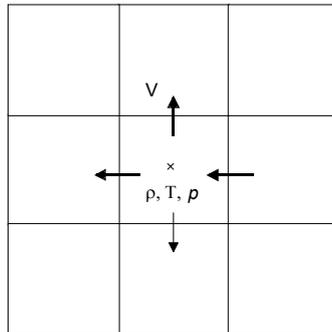


Figure 6 : calcul par maillage décalé

6.3 UTILISATION DE LA METHODE LES

6.3.1 Compréhension de la turbulence

Le traitement statistique de la turbulence a longtemps été la seule possibilité d'approche du phénomène avec la décomposition de Reynolds de la vitesse et l'introduction de la moyenne des vitesses fluctuantes. Mais le gros problème de ces méthodes est celui du bouclage faisant intervenir à chaque fois des moments d'ordre $n+1$ dans les équations d'ordre n des fluctuations de vitesse. Le modèle $k-\varepsilon$ très largement utilisé est reconnu actuellement comme l'une des meilleures méthodes de résolution mais la puissance des moyens de calcul permet aujourd'hui d'envisager une autre voie.

L'approche par un modèle LES de la turbulence représente une rupture avec les approches antérieures et les méthodes DNS n'en sont qu'à leur tout début. Si l'on s'affranchit de certaines difficultés précédemment rencontrées, d'autres non moins délicates à résoudre viennent s'y substituer. En effet, outre les puissances de calcul encore insuffisantes pour envisager des cas complexes, la parfaite compréhension de la turbulence est fondamentale à cette approche si l'on souhaite aller au cœur du problème. De plus, la prise en compte de toutes les structures qui transportent et dissipent l'énergie est indispensable, ce qui n'est encore possible que pour des écoulements simples et connus.

Malgré tout, la méthode dite des larges échelles (LES) s'avère prometteuse en modélisant uniquement la dissipation des petites échelles alors que le transport par les grosses structures est calculé directement par un maillage suffisamment fin. Avec cette méthode, il est donc envisageable de simuler des écoulements plus complexes bien que la validité des résultats soit difficile à mesurer.

Différentes études ont montré l'importance de l'interaction entre grosses et petites structures dans un écoulement turbulent qui respectivement transportent et dissipent l'énergie. L'analyse de Kolmogorov mettant en évidence la cascade énergétique dans l'espace spectral constitue le point fondamental à la compréhension de la turbulence (Figure 7).

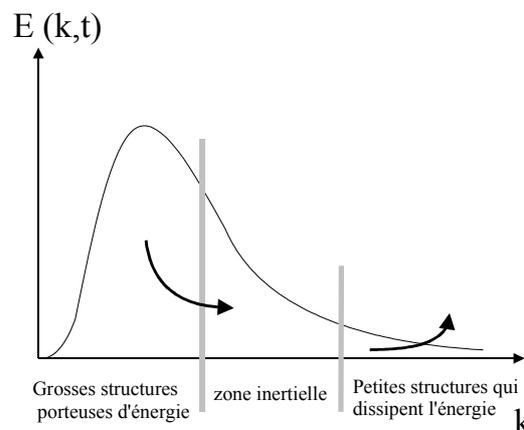


Figure 7 : Spectre d'énergie d'un écoulement turbulent

La nécessité de prendre en compte les grosses et les petites échelles pour simuler la turbulence est indéniable. Il est en effet nécessaire de capturer des petites échelles (au moins celle de l'ordre de Kolmogorov) mais également les grosses structures pour prendre en compte leur effet dissipatif. Ceci se traduit par un maillage fin dont le pas est fonction de la taille de l'échelle minimale à capter (filtrage spatial ou spectral) et devient alors une contrainte énorme vis-à-vis du temps de calcul.

6.3.2 Utilisation de la méthode LES dans FDS

Dans l'espace spectral, le principe de la méthode LES consiste à filtrer les petites échelles. Cela revient dans l'espace physique à ignorer les échelles de taille inférieure à une certaine dimension qui, dans le cas d'un code CFD, est défini par le pas de maillage. L'objectif est donc de modéliser l'effet (dissipatif) des échelles qui ne sont pas prises en compte c'est-à-dire de modéliser une certaine viscosité turbulente ν_t . La forme de cette modélisation caractérise les différents modèles de sous-maillages. Le modèle de viscosité dans l'espace physique de Smagorinsky (1963) est certainement le plus populaire. Il introduit une dépendance de ν avec le taux de déformation local lié aux grandes échelles et c'est sur une telle analyse que le code FDS repose.

La viscosité dynamique intervenant dans l'équation de la quantité de mouvement est calculée au centre de cellules de maillage par la formule :

$$\mu_{ijk} = \rho_{ijk} (C\Delta)^2 |S|$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} |S| = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \\ \Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3} \end{array} \right.$$

La conductivité thermique ainsi que la diffusivité matérielle sont calculées sur la base de cette viscosité de la manière suivante :

$$k_{ijk} = \frac{c_{p,0} \mu_{ijk}}{\text{Pr}} \quad \text{et} \quad (\rho D)_{ijk} = \frac{\mu_{ijk}}{\text{Sc}}$$

Les nombres de Prandtl, de Schmidt ainsi que la constante empirique C ont des valeurs basées sur des simulations de panache de fumées :

$$\text{Pr} = \text{Sc} = 0.2 \quad \text{et} \quad C = 0.14$$

Ces valeurs n'ont pas de justification théorique rigoureuse [10].

Pour un calcul LES, la combustion n'est pas modélisée. La puissance thermique dégagée par le feu est discrétisée par des particules thermiques ou lagrangiennes qui contiennent une certaine partie de la puissance thermique totale définie comme donnée d'entrée. Elles libèrent ensuite cette énergie rapidement (typiquement 0.25 s) après leur émission représentant ainsi l'inflammation du gaz combustible (réaction avec l'oxygène). Elles continuent ensuite leur déplacement en suivant l'écoulement et représentent alors les fumées. Sachant que les transferts thermiques résultants de ce phénomène sont calculés, on peut donc véritablement visualiser un feu et ses conséquences aussi bien en terme de températures, que de flux radiatifs calculés à partir des équations de base de la mécanique des fluides et de la thermodynamique pour des géométries complexes.

Si l'importance du maillage a été soulignée, il n'existe pas au niveau du code de moyen de contrôler la validité des calculs à ce sujet. En fait, il est précisé dans la documentation que pour avoir une bonne description du phénomène, le pas de maillage au niveau de la source doit être de l'ordre de 10% des dimensions de celle-ci. Cela implique que loin du feu, le maillage peut être plus "grossier". Cependant une description fine des températures ou des dispersions des fumées suppose un pas relativement fin par rapport à la géométrie. Il est communément admis que le nombre de points de maillage pour prendre en compte l'échelle de Kolmogorov doit varier comme $Re^{9/4}$ [13, 14].

Il est à noter que dans FDS, la géométrie est totalement reliée à la définition du maillage par l'emploi numérique de mailles dites bloquées. Ceci constitue une contrainte à la définition de grand pas de maillage dans le cas de géométries complexes.

7. SIMULATIONS D'INCENDIES DANS UN HANGAR

7.1 CAS TEST D'INCENDIES DANS UN HANGAR AVEC CFAST

7.1.1 Objectif de l'étude

Les espaces vastes tels que les entrepôts ou les hangars posent de nombreux problèmes concernant la protection incendie car ils peuvent contenir une grande quantité de matériel ou de combustible et leur géométrie rend délicate la sécurité des personnes physiques. Ceci est d'autant plus vrai que les modèles de calcul sur des bâtiments de plus de 10 mètres de plafond souffrent d'un manque de données expérimentales majeure. Il est par conséquent difficile de contrôler la validité des codes dans ces cas de figure.

La NASA a demandé dans ce contexte au NIST une étude en raison des problèmes qu'elle pourrait rencontrer dans les hangars où sont entreposés des avions. L'objectif de cette étude est d'analyser les conséquences d'un feu dans un hangar de 15 m de plafond situé à l'intérieur d'une zone de cantonnement afin de mieux comprendre les phénomènes qui entrent en jeu dans de telles situations.

Ces expériences ont fait l'objet d'une publication [7] à partir de laquelle a été basée les calculs sur CFAST et FDS.

Les paramètres mesurés sont principalement les températures à divers endroits pour suivre l'évolution du panache du feu ainsi que les vitesses de propagation du jet de plafond formé par les fumées.

Cette étude a consisté avec CFAST :

- à évaluer l'influence d'un maillage sur la zone de cantonnement et sur l'ensemble du hangar
- à comparer les résultats expérimentaux et les résultats obtenus
- à étudier l'influence de moyens de protection (cantonnements et événements) en fonction de la puissance du feu

et avec le code FDS :

- à retrouver les températures expérimentales dans la zone de cantonnement

7.1.2 Présentation de l'expérience

7.1.2.1 Géométrie du hangar

Le hangar considéré a des dimensions de 97.3×73.8×15 mètres (Figure 8). Il possède 2 grandes ouvertures au plafond sur la longueur (exutoires) donnant sur l'extérieur ce qui permet une évacuation des fumées.

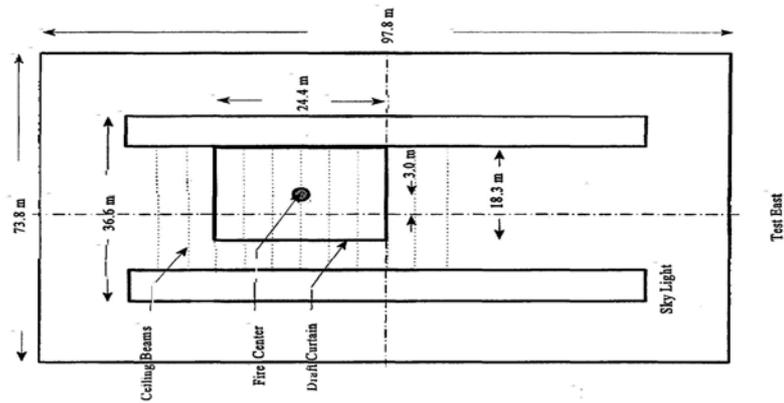


Figure 8 : plan du hangar

Le feu se trouve au centre d'une zone délimitée par des cantonnements ("Draft Curtains") qui sont des panneaux verticaux fixés au plafond, le but étant de réduire l'expansion latérale et de cantonner les fumées dans une certaine zone en dessous du plafond lors d'un incendie (Figure 9). Les cantonnements descendent sur 3 mètres en dessous du plafond.

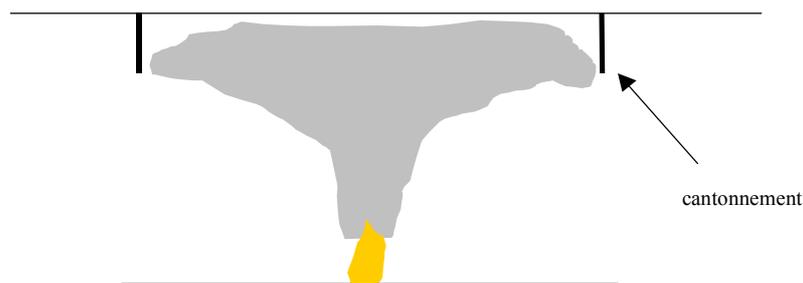


Figure 9 : zone de cantonnement

7.1.2.2 Caractéristiques du feu

Durant toute la campagne d'expérience, 11 feux différents ont été étudiés. Cependant, les résultats corrects en terme de position du panache et d'éléments perturbateurs concernent 2 feux seulement. Ils sont caractérisés par une puissance thermique dégagée et une vitesse de combustion sur une durée de 300 secondes soit 5 minutes (Figure 10). Le combustible est de type hydrocarbure.

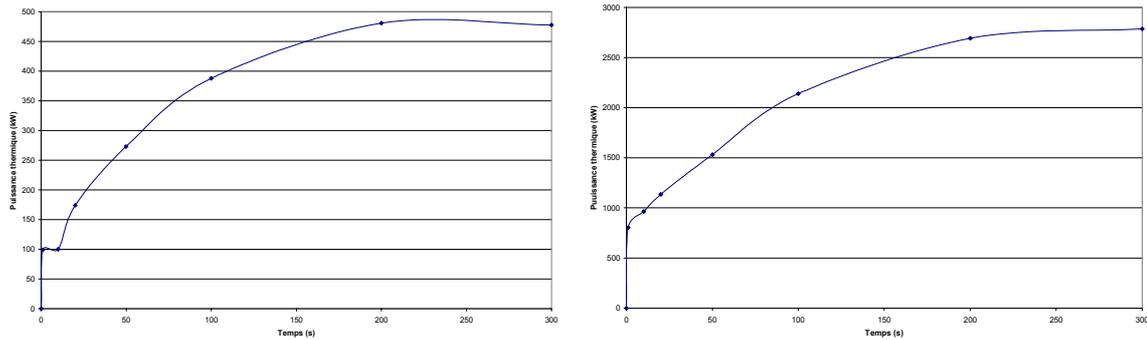


Figure 10 : puissances thermiques des feux 1 et 2

7.1.3 Etude avec CFAST

Les modèles sur lesquels sont basés les codes à zone implique implicitement que les cellules dans lesquelles l'incendie est modélisé sont de tailles petites (typiquement de l'ordre d'une pièce d'habitation).

De ce fait, le problème de l'utilisation de ces codes pour de grandes structures se pose naturellement.

Pour pallier à ce problème, l'idée d'effectuer un maillage du hangar a été choisie.

Ceci revient à choisir un découpage de la surface du hangar en plusieurs cellules reliées entre elles par des murs fictifs i.e. des faces ouvertes. Une discontinuité entre les interfaces des couches chaudes et froides des cellules voisines apparaît (Figure 11). Cependant, le phénomène de propagation des fumées peut être mieux représenté et les résultats plus proches de la réalité.

Aussi, un des objectifs de cette étude est d'étudier l'influence de ce maillage fictif sur les résultats.

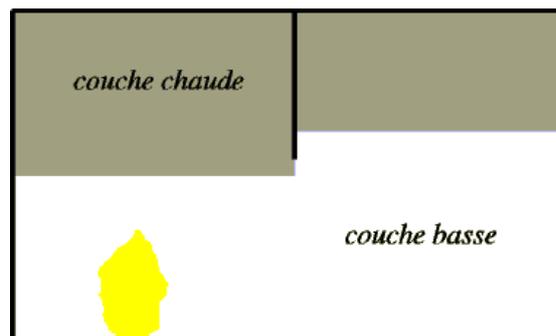


Figure 11 : discontinuité de la hauteur de l'interface entre cellules

7.1.3.1 Caractéristiques des matériaux

L'influence des matériaux sur cette simulation n'est pas significative puisque seule la conduction entre les cantonnements pourrait jouer un rôle sur les résultats. Néanmoins, il est donné dans le Tableau 1, à titre indicatif, la liste de ceux utilisés et de leurs propriétés.

Matériau	Emissivité	Conductivité (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Densité en kg/m ³	Epaisseur en m
Plafond : Acier	0.9	60	480	7850	0.1
Sol : Béton	0.94	1.75	1000	2200	0.15
Cantonnements : contreplaqué	0.9	0.12	1215	545	0.013
Mur : Brique	0.9	1.5	960	2625	0.076

Tableau 1 : matériaux utilisés dans la simulation d'incendie du hangar

7.1.3.2 Hypothèses prises

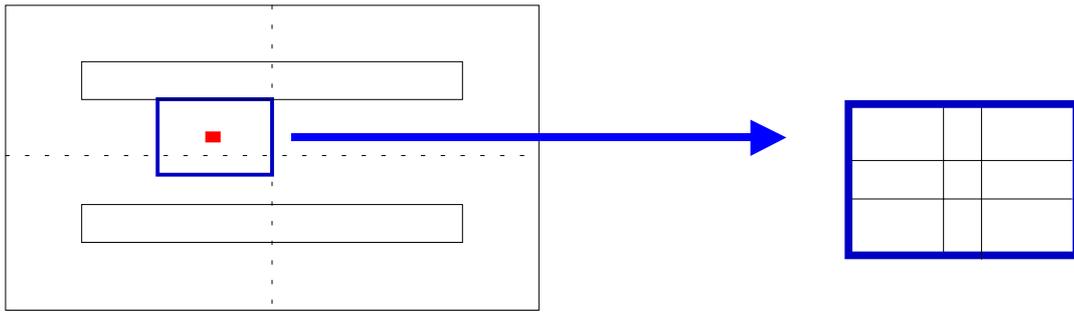
La plupart des paramètres d'entrée ont été définis arbitrairement car ne figurant pas dans la publication. Ces paramètres sont :

- le choix des matériaux,
- l'enthalpie de combustion des combustibles pour les feux 1 et 2 qui a été déduite des courbes de puissance thermique et de vitesse de combustion à partir desquelles une valeur moyenne a été estimée,
- la fraction de radiation $\chi_r=0.35$,
- la hauteur de plafond fixe (en réalité la hauteur de plafond du hangar n'était pas constante),
- les dimensions des exutoires.

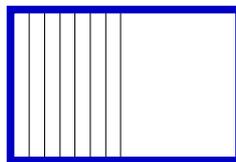
7.1.3.3 Calculs effectués

Plusieurs cas correspondant à différentes géométries et différents maillages ont été réalisés afin d'atteindre les objectifs fixés au départ. Les calculs ont été organisés de la manière suivante :

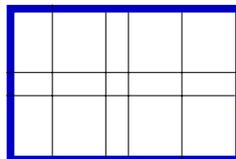
- a) évaluation des températures et de la hauteur d'interface de la zone délimitée par les cantonnements avec un seul compartiment (Annexe A.1),
- b) maillage de la zone de cantonnement avec 5 pièces et évaluation des températures pour les feux 1 et 2 (Annexes A.2 à A3).



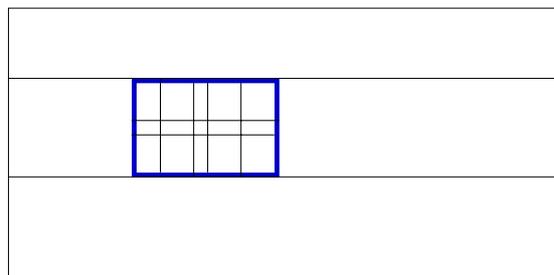
- c) maillage de la zone de cantonnement pour le feu 2 calé sur les points de mesures afin d'obtenir une comparaison plus précise avec les résultats expérimentaux (Annexes A.4 à A5)



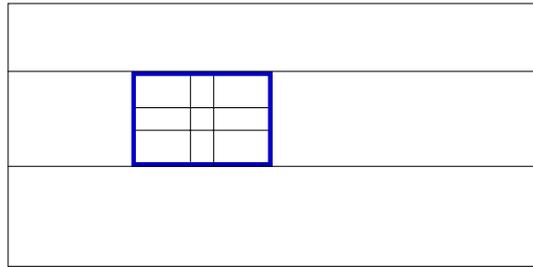
- d) maillage de la zone de cantonnement avec 15 pièces et évaluation des températures avec et sans cantonnement pour le feu 2 (Annexes A.6 à A8)



- e) maillage de l'ensemble du hangar et évaluation de l'influence des exutoires et des cantonnements pour le feu 2 (Annexes A.9 à A15)



- f) calcul complémentaire sur un feu dont la puissance thermique est 10 fois plus grande que le feu 2 afin d'étudier l'influence de ce paramètre sur les moyens de protection (Annexes A.16 à A.18)



Le feu se trouve dans tous les calculs au centre de la zone de cantonnement.

Etant données les dimensions du hangar, pour les maillages prenant en compte seulement la zone de cantonnement, les limites de cette zone sont définies par des sorties libres. Les exutoires au niveau du plafond sont pris en compte de la même manière.

7.1.3.4 Discussion des résultats

7.1.3.4.1 Influence du maillage sur la hauteur d'interface

Les 3 calculs (cas a, b et d) à l'intérieur de la zone de cantonnement permettent de constater que la hauteur des couches chaudes dépend peu de la puissance du feu. Les résultats pour les 2 feux sont en effet similaires. Les conditions de ventilation des cellules semblent donc être le facteur prédominant lors du calcul de la hauteur de l'interface.

Le maillage de la zone de cantonnement a des conséquences fortes sur la hauteur d'interface de la cellule contenant le feu. Plus les dimensions de cette cellule sont faibles, plus basse sera la couche chaude. Cependant, dans le cas d), la hauteur d'interface au-dessus du feu atteint 8 mètres pour une surface au sol du compartiment de 1 m². Cette zone correspond en fait aux dimensions du panache. A ce niveau, la hauteur d'interface ne représente donc rien physiquement.

Sur l'ensemble des autres cellules, les hauteurs d'interface convergent vers une valeur proche de celle obtenue sans maillage. Néanmoins, cette convergence est différente pour chacun d'entre eux. Il est par exemple possible de distinguer une propagation des fumées très rapide (sur les premières minutes) pour le cas d), de même que des pseudos-effets de bords sur les cellules où sont définis les cantonnements.

7.1.3.4.2 Influence du maillage sur les températures des couches chaudes

Les températures obtenues pour les 2 feux traduisent bien la différence de chaleur dégagée. Globalement une différence de 20°C entre les 2 feux est observée sur l'ensemble des cellules.

L'évolution des températures semble être plus sensible au maillage que les hauteurs d'interface. En effet, la température du compartiment contenant la source (cas d : 1 m²) augmente de 10°C (soit environ 20%) pour une variation de la hauteur d'interface de quelques dizaines de centimètres dans le cas b (2 m²). Les dimensions de cette cellule jouent probablement un rôle important.

Les températures des autres cellules évoluent de la même manière que leur distance à la source. Malgré tout, les différences constatées entre les compartiments sont faibles (quelques degrés) et proche de la température déterminée dans le cas a.

7.1.3.4.3 Comparaison des résultats obtenus avec les valeurs expérimentales

Il n'est donné dans la publication que des valeurs concernant la température. Aucune information n'est disponible sur les hauteurs de couches.

Par un "maillage" de la zone de cantonnement particulier, des températures en fonction des distances à la source ont été déterminées (Annexe A.4).

Les résultats montrent que pour les 2 feux, les températures calculées sont globalement inférieures aux températures expérimentales. Seule la cellule la plus éloignée présente une couche haute plus chaude que la température mesurée. Cependant il faut prendre en compte le fait que les températures calculées avec CFAST sont des températures moyennes de couches chaudes alors que les valeurs expérimentales correspondent à des thermocouples sous le plafond (endroit le plus chaud).

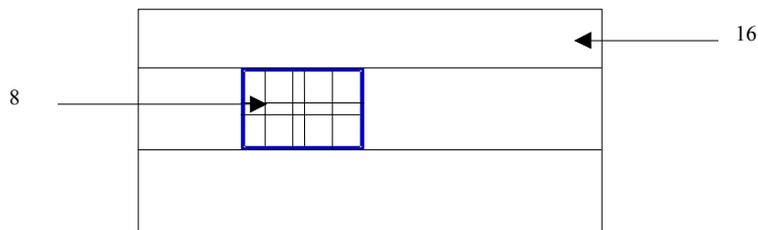
Malgré cette remarque, les températures obtenues avec CFAST sont proches des températures expérimentales. Ceci permet de conclure que les valeurs des températures des couches chaudes sont légèrement inférieures aux températures maximales réelles sous le plafond mais supérieures aux valeurs moyennes.

7.1.3.4.4 Influence des cantonnements et des exutoires sur les hauteurs de couches

L'effet sur les hauteurs d'interface des cantonnements est très significatif. La convergence des hauteurs d'interface vers une hauteur de couche homogène mise en évidence avec les cantonnements n'est plus observée sans ce moyen de protection. Une discontinuité de quelques dizaines de centimètres (Figure 11) apparaît clairement entre les cellules en relation avec leur position à la source. Cet effet est même ressenti par la cellule contenant le feu.

De la même manière, la présence ou non des exutoires influe sur les hauteurs d'interface et il est possible de mesurer l'interaction des exutoires avec les cantonnements.

Les hauteurs de couche des cellules 8 (voisin de la source) et 16 (grande façade du hangar) jugés significatifs du phénomène à l'instant $t=300$ secondes montrent les effets de ces moyens de protection (Tableau 2).



	aucune protection	exutoires	cantonnements + exutoires	cantonnements
cellule 8	12	12	10.8	10.8
cellule 16	13.1	12.5	12.3	11.7

Tableau 2 : effets de moyens de contrôle sur la hauteur d'interface

Il semble que l'emploi des moyens de protection ne soit pas intéressant dans ce cas puisqu'ils contribuent à une diminution de la hauteur d'interface dans toutes les configurations. Il est possible que l'effet des exutoires soit sous évalué. Ils contribuent à diminuer la couche chaude à l'extérieur de la zone de cantonnement. De plus, il est nécessaire de pondérer ces résultats avec les faibles températures à l'extérieur dans cette zone.

7.1.3.4.5 Influence des cantonnements et des exutoires sur les températures des couches chaudes

Les cantonnements augmentent de façon globale la température des couches chaudes. Cette augmentation est moins importante pour le compartiment contenant le feu (2 ou 3 degrés) et atteint une dizaine de degrés pour les autres.

La combinaison cantonnements/exutoires permet de constater que l'influence des exutoires est pratiquement nulle alors que l'emploi des cantonnements détermine les variations de températures (Tableau 3). Il faut remarquer les faibles températures mises en jeu loin de la source qui permettent d'affirmer que ces calculs sont aux limites de la validité de l'hypothèse des 2 zones.

	sans protection	cantonnements + exutoires	cantonnements	exutoires
cellule 8	49	55	56	48
cellule 16	36	33	34	36

Tableau 3 : effets de moyens de contrôle sur les températures des couches chaudes

7.1.3.4.6 Calculs complémentaires : influence de la puissance du feu sur les résultats

Les résultats obtenus pour un feu dont la puissance atteint 27 MW sont plus significatifs quant à l'influence des exutoires que précédemment.

Les événements permettent en effet d'obtenir les interfaces les plus élevées alors que le couplage cantonnements/événements est le cas le plus favorable en terme d'hauteur d'interface et de température.

Ces calculs sont plus représentatifs de la réalité et les influences des moyens de protection sont dans ce cas clairement identifiables.

7.1.4 Conclusion de l'étude

Cette étude a permis de déterminer que les effets d'un maillage sur le hangar étaient peu significatifs en présence d'une zone de cantonnement et malgré la hauteur de plafond. Cette technique permet néanmoins de découpler une cellule contenant la source des autres. Ceci a l'avantage de fournir des températures distinctes à différents endroits du hangar.

L'influence des cantonnements a été mise en évidence grâce aux évolutions des hauteurs d'interface et par une continuité des couches chaudes entre les cellules. Ils semblent contribuer à diminuer les températures loin du feu mais à les augmenter dans la zone de cantonnements.

Les exutoires ont un effet très faible voire insignifiant pour les 2 feux. Il semble que leur influence ne soit pas correctement prise en compte peut-être à cause de transferts sous estimés entre l'intérieur du hangar et l'extérieur. La puissance de ces feux a un effet sur les résultats puisque pour un feu atteignant 27 MW, l'influence des moyens de protection a été plus précisément mise en évidence.

Il faut remarquer que pour certaines cellules loin de la source, des couches chaudes importantes ont été calculées alors que la température de ces zones étaient proches de la température ambiante. Ceci confirme le fait que la validité de l'hypothèse des 2 zones peut être pour ces résultats remise en cause. Il aurait été intéressant d'avoir pour ces situations des résultats expérimentaux plus précis.

7.2 SIMULATION DES EXPERIENCES AVEC FDS

7.2.1 Objectifs des calculs

Dans le cadre d'une première approche de l'utilisation de FDS, les calculs réalisés avaient pour but de se familiariser avec ce nouveau code de calcul en essayant de reproduire les résultats expérimentaux donnés dans la publication.

Des thermocouples ont été disposés de manière à obtenir les variations de température dans le jet de plafond et en fonction de la distance radiale à la source.

7.2.2 Données d'entrée

Dans le cadre d'une première modélisation, et vu les temps de calcul nécessaires, seule la zone de cantonnement a été considérée.

Deux calculs pour chacun des feux 1 et 2 précédemment définis ont été effectués avec un maillage régulier de $40 \times 50 \times 40$ soit 80 000 points (Figure 12) pour un temps de simulation de 300 secondes. Ceci a conduit à des temps de calcul d'environ 8 heures.

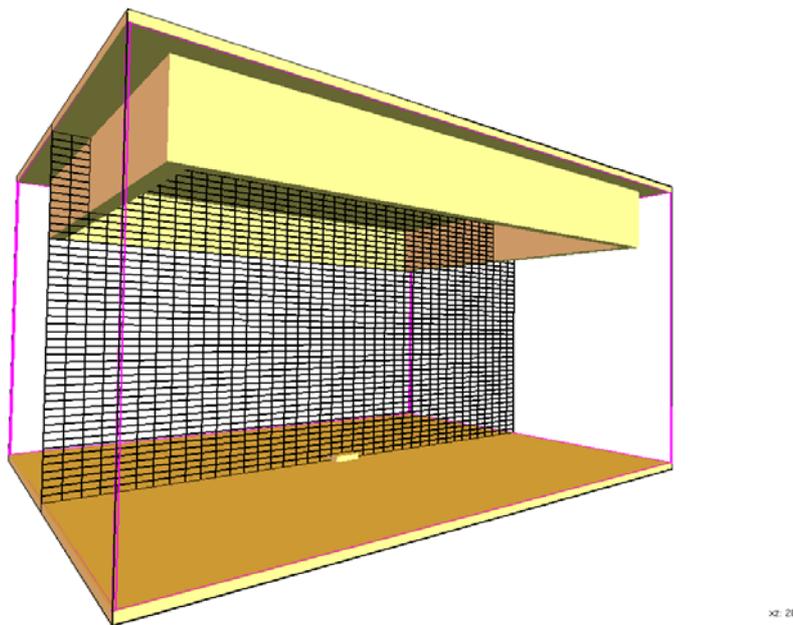


Figure 12 : maillage de la zone de cantonnement avec FDS

Les conditions aux limites de l'espace physique considéré sont des conditions de sortie libre étant données les grandes dimensions du hangar.

Les propriétés des matériaux sont identiques à celles définies pour les calculs avec CFAST.

Des arbres de thermocouples placés sous le plafond conformément à l'expérience permettent au cours du temps d'obtenir les températures en fonction de la distance à la source et au plafond.

7.2.3 Résultats des calculs

Les températures calculées au niveau des thermocouples ainsi que les résultats expérimentaux sont présentés en annexe B.

L'ordre de grandeur des températures obtenues est conforme à l'expérience pour les 2 calculs. Ces températures varient autour 40 °C pour le feu 1 et de 60°C pour le feu 2 sous le plafond (Figure 13).

Dans les 2 cas, les températures calculées sont généralement supérieures aux températures mesurées mais les erreurs restent inférieures à 40 %.

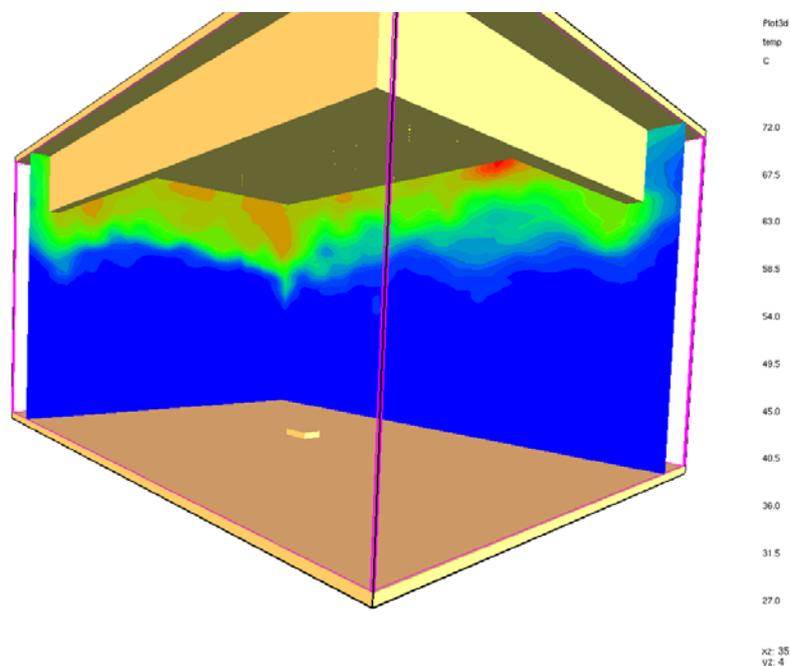


Figure 13 : champ de températures à 200 secondes – feu 2

La densité des fumées n'a pas été évaluée. Cependant par le gradient de température, il est possible d'estimer une hauteur d'interface qui correspond approximativement à celle déterminée avec CFAST.

L'effet des cantonnements sur le champ de température est mis en évidence par une vue de dessous (Figure 14).

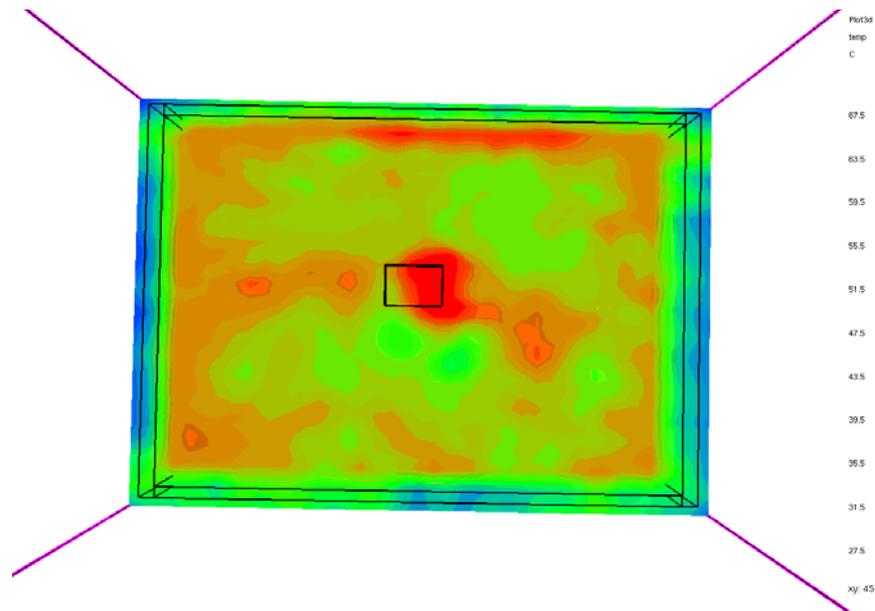


Figure 14 : champ de températures sous le plafond à 250 secondes – feu 2

Néanmoins, il est à remarquer que le gradient de températures sous le plafond lié à la couche limite thermique n'est pas reproduit (voir tableaux en annexe), les modèles ne permettant pas d'obtenir une telle précision.

7.2.4 Conclusion

Les premiers calculs effectués lors de cette étude dans des cas de géométrie simple ont permis d'obtenir de bons résultats avec des erreurs relativement raisonnables.

La propagation de la chaleur en fonction de la source a été observée alors que les gradients de température sous le plafond n'ont pas été correctement reproduits.

L'influence des exutoires n'a pas été encore étudiée.

8. COMPARAISONS SIMULATIONS/EXPERIENCES D'UN FEU DE PYRIDINE EN ESPACE CONFINE

8.1 PRESENTATION DE L'EXPERIENCE

Les expériences effectuées à l'INERIS sur des feux de pyridine en espace confiné ont été à la base de cette étude. Réalisées à l'intérieur d'une chambre de 80 m³ avec un bac de pyridine au centre, l'objectif était d'étudier les concentrations d'espèces chimiques (O₂, CO, etc.) et les températures à l'intérieur du milieu pour différentes conditions de ventilation et dans le cas de feux sous-ventilés.

Ces essais ont permis d'envisager une étude rigoureuse en terme de comparaisons expériences/simulations réalisées avec les codes CFAST et FDS.

Description des essais

La cellule 80 m³ est une pièce destinée à réaliser des essais d'incendies. Ses dimensions sont de 5×4×4 mètres et les murs sont en béton. Une entrée et une sortie d'air respectivement à 75 centimètres et 3.75 mètres du sol, sur des murs opposés, sont utilisées afin de conserver dans la chambre une pression constante mais également afin de contrôler la quantité d'air disponible au développement du feu. Ainsi, il est possible d'envisager une configuration de sous-ventilation du feu ou au contraire une quantité suffisante d'oxygène pour une combustion totale. Afin de permettre une bonne homogénéité de l'alimentation en air de la pièce et de ne pas influencer le développement du feu, un muret d'environ 1 mètre de hauteur est situé au niveau de l'entrée d'air et détourne l'écoulement entrant sur les côtés.

La chambre représentée avec FDS donne une bonne vision de la configuration expérimentale (Figure 15). L'entrée d'air se situe sur la face EST et l'arbre qui comporte le plus de thermocouples est orienté au SUD.

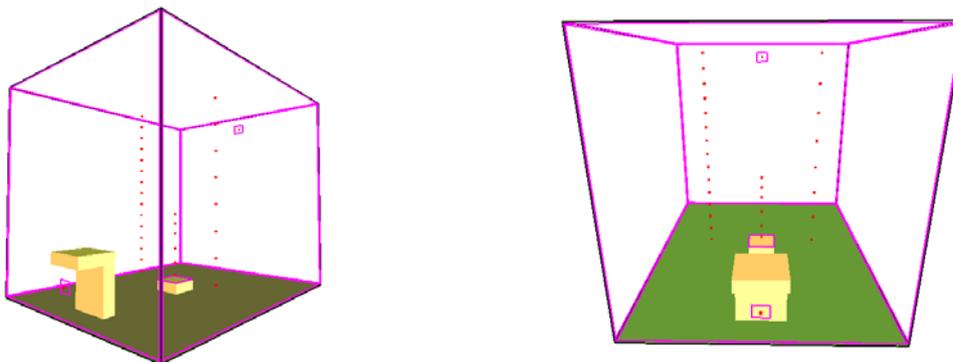


Figure 15 : vues du dispositif expérimental

Au centre de la pièce, un bac de 0.25 m² contient la pyridine de formule chimique C₆H₅N.

Cinq essais ont été réalisés avec pour chacun d'eux une valeur de débit d'air entrant et une durée de combustion différente. Les débits considérés sont les suivants : 1300, 900, 600, 370, 270 Nm³/h. Le dernier cas constitue, comme les résultats expérimentaux le montrent, la limite de sous-ventilation.

Les paramètres mesurés pour cette étude sont :

⇒ dans la cellule :

- l'évolution de la masse de combustible au cours du temps,
- les températures dans la flamme à 0.2 *D*, 0.6 *D*, 1.3 *D* et 1.7 *D*,
- les températures des fumées à 1 mètre des murs par une ligne verticale de thermocouples. Un arbre sud comporte 15 thermocouples espacés de 25 centimètres et un arbre nord est constitué de 8 thermocouples espacés de 50 centimètres,

⇒ au niveau de la conduite d'extraction :

- le débit d'extraction des fumées,
- la température des fumées en sortie,
- les fractions molaires en O₂, CO₂, CO, NO, NO₂, HCT,
- la génération de HCN par titrimétrie.

D'autres mesures ont été effectuées mais elles ne seront pas exploitées dans cette étude.

8.2 MODELISATION DE L'EXPERIENCE AVEC CFAST

CFAST est un code à zone permettant de simuler un incendie dans un espace clos et de prévoir des températures, des quantités d'espèces chimiques produites ou consommées par le feu au cours du temps ainsi que des flux radiatifs et des hauteurs de couches chaudes. Il est donc très bien adaptée à une telle étude. Des données expérimentales précises sur l'évolution de la combustion en termes d'espèces sont disponibles ainsi que toutes les données d'entrée nécessaires aux calculs.

Il faut remarquer qu'à l'heure actuelle, pour les simulations d'incendie, la plupart des codes ne possèdent pas de modèle de combustion. Ainsi, dans CFAST, la source est décrite en terme de puissance thermique et de vitesse de combustion (en kg/s). Une étude sur les concentrations d'espèces nécessite un certain nombre de données d'entrée et qui sont connues ici grâce à l'expérience.

L'objectif premier est de comparer les résultats des calculs avec ceux obtenus par les expériences c'est-à-dire :

- la détermination des concentrations des espèces,
- la prédiction de la température de la pièce.

Les fumées occupent très rapidement toute la chambre et, par conséquent, une seule zone est considérée avec CFAST (un calcul à 2 zones conduit très rapidement à une hauteur d'interface égale à zéro).

8.2.1 Définition de l'entrée et de la sortie d'air

Le dispositif expérimental complet prenant en compte tout le système de ventilation est difficilement réalisable sur CFAST. Il a fallu néanmoins définir des conditions permettant de se rapprocher au mieux de la réalité. Pour cela, des conduites ainsi que des ventilateurs ont été définis.

Les conduites sont caractérisées par une altitude de départ et d'arrivée, une longueur, une aire de section droite et une rugosité. Pour les ventilateurs, une altitude de départ et d'arrivée ainsi qu'une courbe de fonctionnement suivant la pression est requise.

Pour s'approcher au mieux de la pression expérimentale, les conditions d'entrée et de sortie ont été fixées de la même manière. Autrement dit, le dispositif de soufflage et d'aspiration sont parfaitement symétriques (Figure 16).

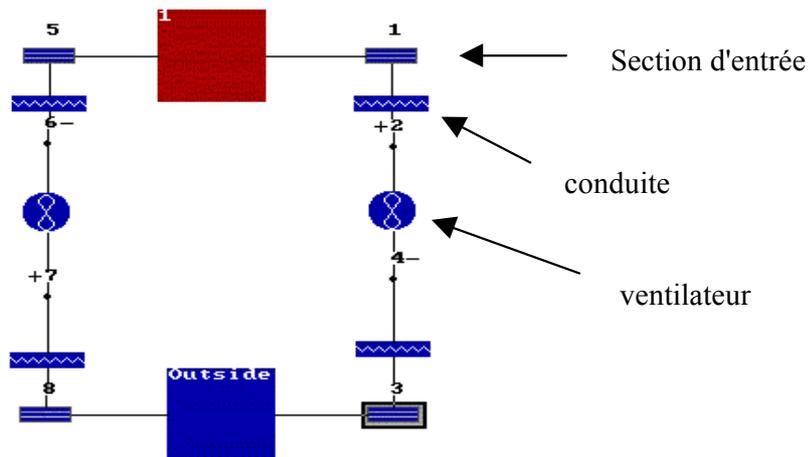


Figure 16 : dispositif de ventilation défini avec CFAST

8.2.2 Définition des matériaux

Les 6 faces de la pièce (sol, murs, plafond) ont été définies avec les propriétés du béton correspondant approximativement aux propriétés réelles. CFAST ne permet pas la distinction entre les 4 murs mais le sol et le plafond peuvent être différents. Les caractéristiques du matériau choisi sont les suivantes:

- conductivité : 0.8 W/m.K
- chaleur spécifique : 880 J/kg.K
- densité : 1750 kg/m³
- épaisseur : 20 cm
- émissivité : 0.95

8.2.3 Définition de la source et des espèces

Le feu est décrit par une puissance thermique (W) et une enthalpie de combustion (J/kg). Les données expérimentales sont suffisantes pour bien décrire ces termes. La puissance dégagée est définie par une fonction échelon (palier constant pendant un temps donné).

L'évolution des concentrations des espèces chimiques en fonction du temps est entrée ainsi que les caractéristiques du combustible. Les données fondamentales sont les suivantes :

- ⇒ Propriétés de la pyridine : H/C (kg/kg),
- ⇒ Produit de combustion : C/CO₂ (kg/kg), CO/CO₂ (kg/kg), HCN.

La prédiction de la production de monoxyde et dioxyde d'azote n'est pas possible et les données en HCT ne sont pas significatives.

Les 5 essais à différents débits de ventilation ont été simulés. Les paramètres qui diffèrent pour chacun sont les débits imposés en entrée et sortie, les quantités des espèces et la puissance du feu toujours en fonction des valeurs mesurées avec l'expérience.

Un tableau récapitulatif des données d'entrée pour les 5 essais est présenté ci-dessous (Tableau 4) :

Débit (Nm ³ /h)	C/CO ₂ (kg/kg)	CO/CO ₂ (kg/kg)	Puissance thermique (kW)	Durée du feu (secondes)
1300	0.0097	0.0093	275	1715
900	0.0091	0.0093	240	2520
600	0.0125	0.0088	200	3480
370	0.0045	0.0088	170	3420
270	0.0067	0.0137	150	5700

Tableau 4 : données d'entrée de CFAST pour les 5 essais pyridine

8.2.4 Résultats des calculs

Pour chaque essai, l'évolution des quantités d'oxygène, de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone est obtenue au cours du temps. Quelques courbes sont présentées dans le texte mais l'ensemble des résultats de ces simulations est donné en annexe C.

Le calcul de la pression et de la vitesse de combustion par CFAST permet de valider la définition des termes sources.

En effet, la variation de pression modélisée par CFAST est conforme à celle observée expérimentalement (Figure 17):

- Pic de pression dans les premiers instants correspondant à un effet tampon. Toutefois, le modèle prédit une valeur de pic beaucoup plus importante que celle mesurée,
- Chute de pression avant mise en place d'un régime stationnaire,
- Retour à l'équilibre à la fin de l'incendie. évolue de manière conforme à l'expérience avec un pic dans les premières minutes correspondant à l'effet tampon.

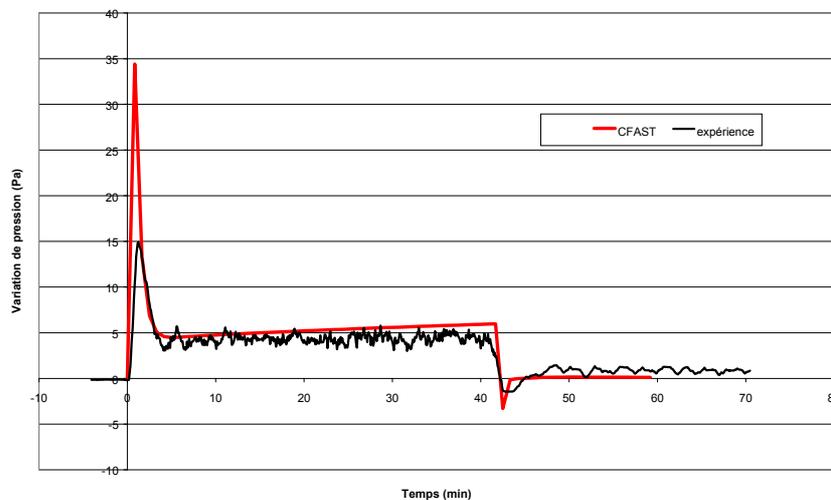


Figure 17 : pression dans la chambre – débit de 900 Nm³/h

L'évolution des concentrations d'espèces chimiques donne de très bons résultats pour le CO et le CO₂. Cependant, il est observé expérimentalement un gradient de concentration d'oxygène entre le haut et le bas de la pièce. Les résultats de la simulation pour cette espèce sont toujours inférieurs à la concentration minimale observée à une hauteur de 3.5 mètres.

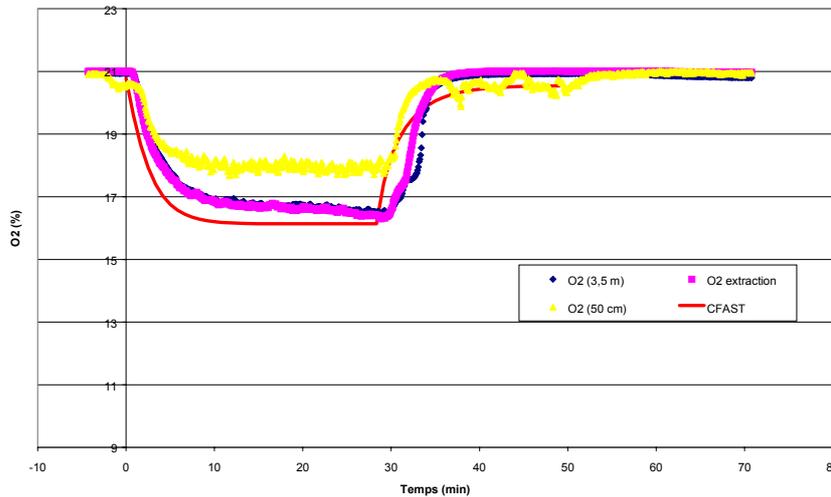


Figure 18 : concentration d'oxygène dans la chambre – débit de 1300 Nm³/h

La température calculée dans la chambre est présentée avec les valeurs expérimentales des thermocouples sur l'arbre sud. Ceci permet de voir que la température donnée par CFAST correspond aux températures mesurées à la moitié de la hauteur de la pièce, excepté pour le premier essai où la température maximale est celle mesurée sous le plafond (Figure 19 et Figure 20). Globalement des températures inférieures de l'ordre de 10 à 20% aux températures maximales dans la chambre sont obtenues.

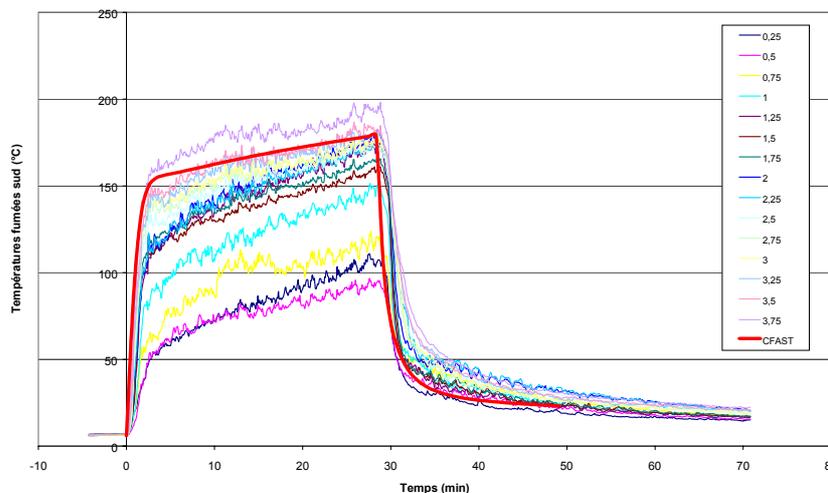


Figure 19 : températures dans la chambre – débit de 1300 Nm³/h

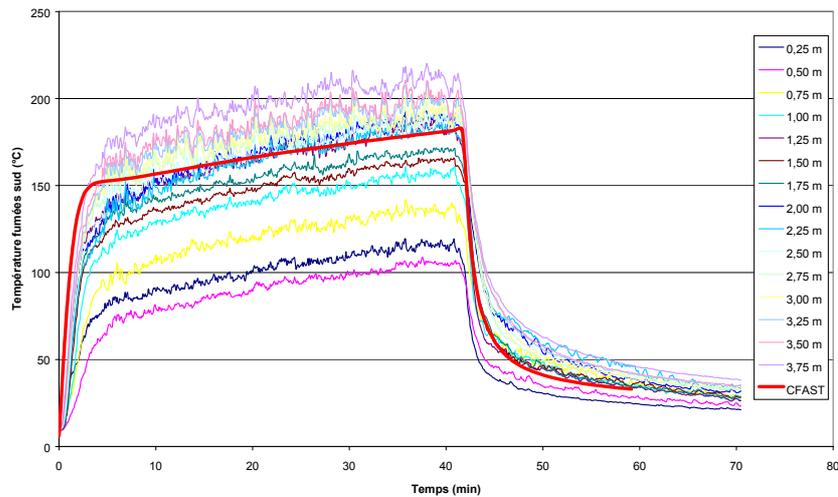


Figure 20 : températures dans la chambre – débit de $900 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Pour les 2 derniers essais, il n'apparaît pas expérimentalement de régime stationnaire pour le CO, alors qu'un pseudo-régime stationnaire est atteint pour l'O₂ et le CO₂. Il n'est pas possible avec CFAST de reproduire l'évolution du CO mais on peut vérifier que la quantité de CO produite est approximativement égale à la valeur expérimentale en considérant les intégrales des 2 courbes. Ce problème provient du fait qu'on approche un état de sous-ventilation du feu (la quantité d'oxygène disponible commence à être insuffisante), ce qui influe sur les produits de combustion incomplète (Figure 21 et Figure 22).

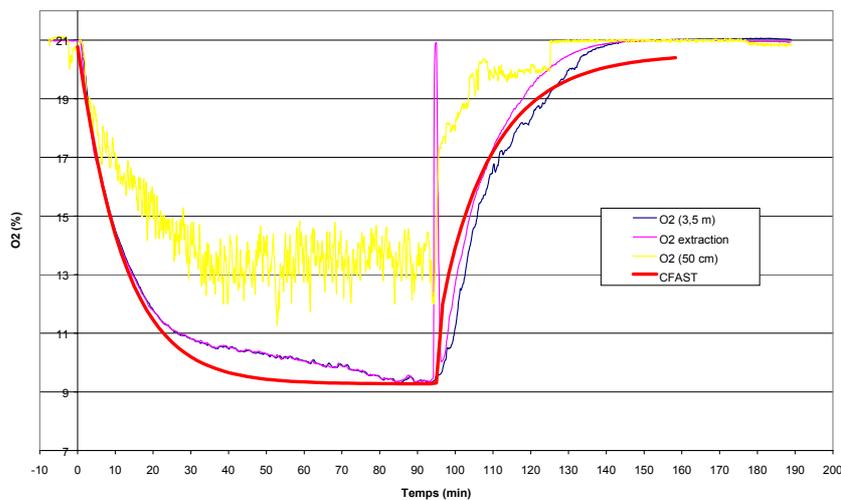


Figure 21 : concentration d'oxygène dans la chambre – débit de $270 \text{ Nm}^3/\text{h}$

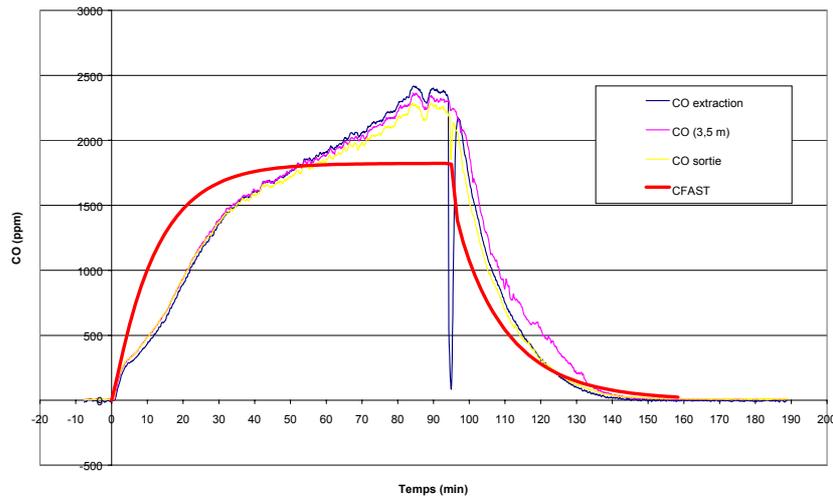


Figure 22 : concentration de CO dans la chambre – débit de 270 Nm³/h

8.2.5 Conclusion

Les résultats obtenus à l'aide du code CFAST sont globalement fiables pour ce qui est de l'évolution des espèces. Autrement dit, comme les bonnes évolutions des espèces (mesurées expérimentalement) sont données en entrée, le code restitue les bonnes concentrations à l'intérieur de la chambre. Une des limites du code étant le fait qu'il ne dispose pas de modèle de combustion, l'utilisateur doit connaître ces données d'entrée inaccessibles sans expérience.

La prédiction de la température dans la pièce est inférieure à la température maximale (sous le plafond) de l'ordre d'environ 20%. Cependant, cette température est une valeur moyenne des températures dans la pièce. Les résultats donnés par le code sont donc relativement corrects et proches de la valeur moyenne des températures mesurées.

8.3 CALCULS DES TEMPERATURES DANS LA CHAMBRE AVEC FDS

L'utilisation de FDS pour la simulation de cet essai donne plusieurs avantages par rapport au code à zone. Premièrement, le calcul en 3 dimensions permet d'obtenir un champ de températures et de pouvoir évaluer les gradients. Deuxièmement, la détermination d'un champ de vitesse peut permettre d'expliquer certains phénomènes observés expérimentalement comme par exemple le gradient de concentration d'oxygène par la visualisation de recirculations. Malgré tout, l'obtention de ces résultats possède un coup d'abord en temps de calcul (puisque une résolution minimale du maillage est requise a priori) et ensuite vis-à-vis de la définition des conditions aux limites qui est un point sensible pour toutes les simulations de ce type.

Cette étude comprend uniquement la simulation de l'essai pyridine 1 (débit d'air entrant de 1300 Nm³/h) avec 2 maillages différents. Le deuxième avait pour but d'avoir une vision plus précise de l'écoulement et d'étudier l'influence du maillage.

8.3.1 Géométrie et maillage

La définition de la géométrie dans le code étant liée au maillage (les solides sont représentés par des mailles bloquées), le pas de maillage a donc été estimé de façon à définir au mieux le muret et la source et à minimiser le temps de calcul.

Les 2 maillages sont définis de la manière suivante :

⇒ *maillage 1*

10 000 points de maillage,

variation du pas de maillage de 35 cm loin de la source à 15 cm au niveau de la source,

⇒ *maillage 2*

40 000 points de maillage sur la moitié de la chambre (utilisation de la symétrie),

variation du pas de maillage de 13 cm loin de la source à 5 cm au niveau de la source.

Les dimensions du bac au centre sont de 0.6×0.4 mètres soit 0.24 m². L'entrée d'air à 0.5 mètre du sol a une section droite de 0.05 m² de même que la sortie sur le mur opposé située à 3.7 mètres de hauteur. Le muret derrière l'entrée a une hauteur de 1 mètre et est destiné à détourner l'écoulement entrant sur les cotés.

Les caractéristiques du béton (unique matériau utilisé dans cette simulation) sont les mêmes que dans CFAST. Tous les murs ainsi que le muret sont définis de cette manière. Les arbres de thermocouples nord et sud sont situés à 1 mètre des murs (Figure 15).

Les temps de simulation suivants ont été obtenus :

- 26 heures pour 2000 secondes de simulation pour le maillage 1,
- 37 heures pour 300 secondes de simulation pour le maillage 2.

Les temps de calcul importants n'ont pas permis d'aboutir à la totalité de la simulation pour le maillage 2. C'est la raison pour laquelle cette simulation ne comprend que les 5 premières minutes.

8.3.2 Définitions des conditions aux limites et de la source

Au niveau de l'entrée, un débit volumique conforme à l'expérience de $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ est imposé pour une température ambiante de 6°C .

La définition de la sortie est plus délicate. En effet, la sortie a pour but de conserver à l'intérieur de la chambre une pression suffisamment faible et proche de la pression atmosphérique grâce à une extraction des gaz chauds. Expérimentalement ceci se traduit par un débit d'extraction en relation avec le débit entrant en tenant compte de l'augmentation de température. Cependant dans le cas de la simulation, il n'existe pas une seule source de débit. En effet, la source de chaleur se comporte comme une source de débit qu'il faudrait prendre en compte pour évaluer le débit d'extraction. La façon la plus appropriée pour prendre en compte cet effet est de considérer que la sortie est libre ce qui aura l'avantage de générer un effet tampon obtenu avec l'expérience mais de mal prédire le retour aux conditions normales après l'extinction du feu.

La source a été définie de la même manière que sur CFAST par une puissance thermique par unité de surface et une enthalpie de combustion.

La fraction de radiation a été fixée à une valeur de 0.5. Les premiers calculs avec $\chi_r=0.35$ donnait une sur-prédiction trop importante des températures.

8.3.3 Résultats des calculs

8.3.3.1 Prédiction des températures du maillage 1

L'évolution des températures calculées dans la pièce est différente de celle observée expérimentalement. Un palier plus net apparaît qui correspond à une situation de régime stationnaire plus accentuée. De plus, le retour aux conditions initiales s'établit plus rapidement que dans la réalité et légèrement avant le début de celui obtenu expérimentalement (Figure 23). Néanmoins, les températures sont correctement prédites en fin de simulation. Au temps $t=28$ minutes, l'erreur est quasiment nulle dans toute la pièce.

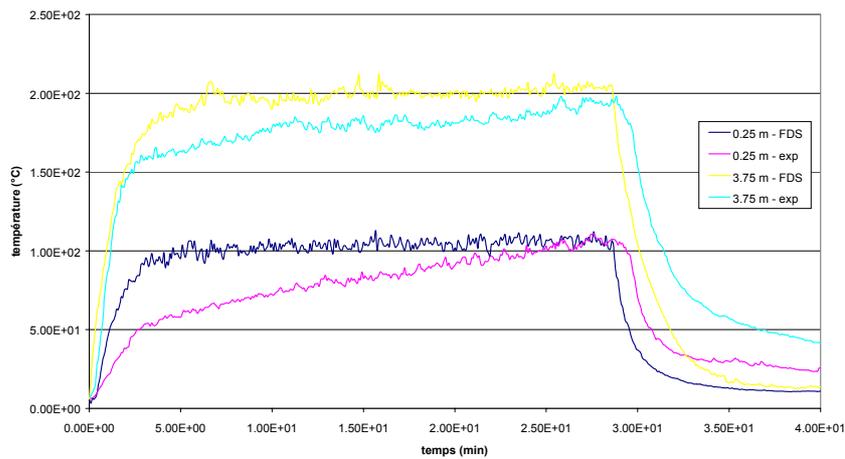


Figure 23 : températures sur l'arbre de thermocouples sud à 25 cm et 3.75 m du sol

La zone critique se situe au-dessus du bac où, à une hauteur de $0.2 D$, la température est 25% plus élevée qu'en réalité quel que soit l'instant.

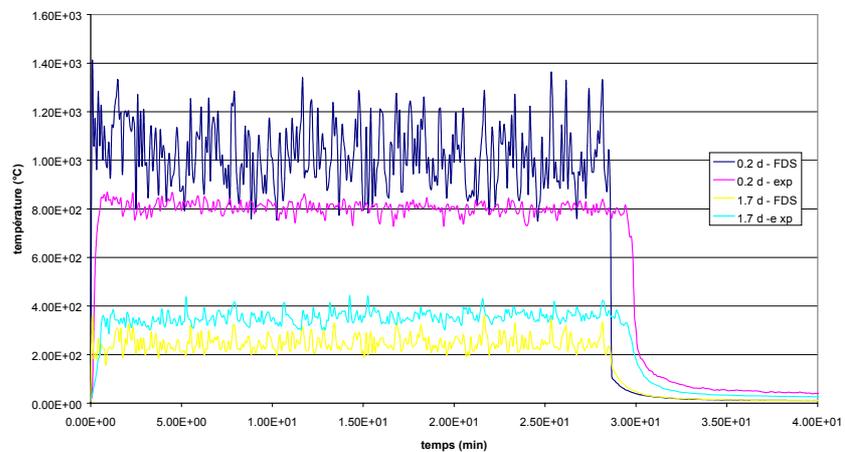


Figure 24 : températures dans la flamme à $0.2 D$ et $1.3 D$

Le gradient de température sur l'arbre de thermocouples sud a une allure proche de l'expérience et suit bien l'augmentation de température à l'approche du plafond.

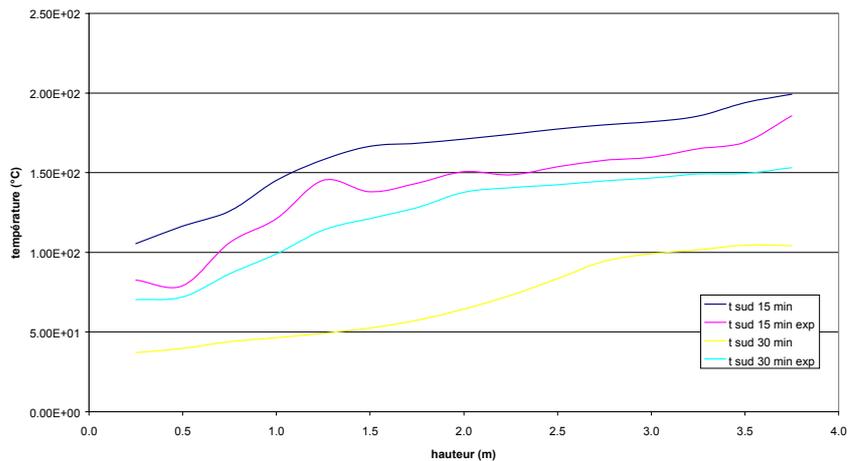


Figure 25 : gradient de températures sur l'arbre de thermocouples sud à 15 et 30 minutes

8.3.3.2 Prédiction de l'écoulement

L'écoulement semble très perturbé dans la moitié de la pièce où l'air est admis. C'est en effet à cet endroit que l'alimentation du feu en comburant est possible grâce à l'air frais. Ceci implique une déviation de la flamme vers le muret (Figure 26). Ce phénomène est observé grâce aux 2 simulations.

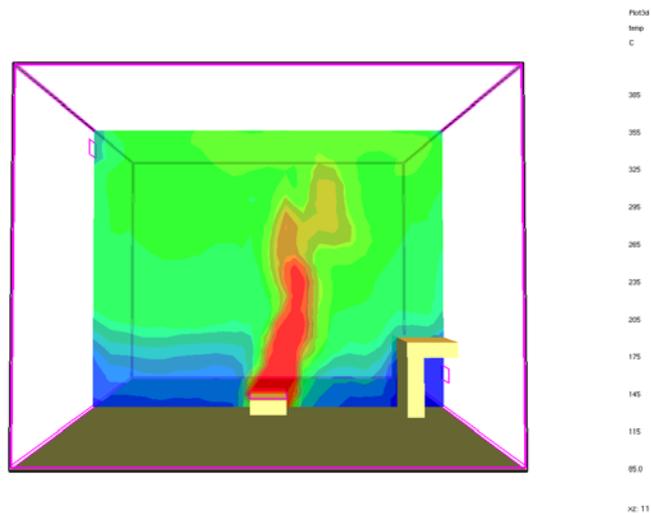


Figure 26 : champ de températures à l'instant $t=300$ s

L'air qui entre dans la chambre, dévié par le muret, semble d'après les résultats être attiré vers la zone où se produit la combustion. Cette observation a 2 conséquences :

- une circulation d'air entre les flammes et le muret (Figure 27)
- la formation de 2 tourbillons sous le plafond de part et d'autre du muret (Figure 28).

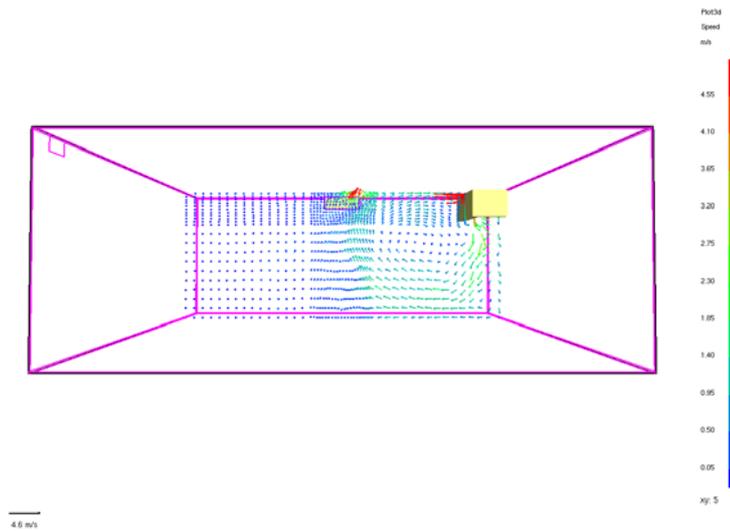


Figure 27

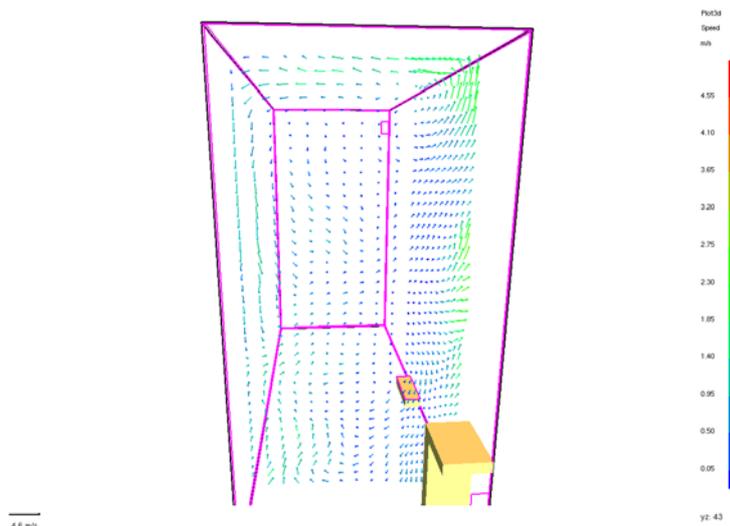


Figure 28

En effet, la circulation d'air entre le plafond et le sol ne peut pas se faire correctement en raison de l'admission de l'air frais et de l'entraînement de cet air par le feu. L'air chaud a donc un mouvement descendant le long des murs et ascendant en raison de cet entraînement et de l'écoulement en bas de la pièce. Cette constatation pourrait être à l'origine du gradient de concentration d'oxygène car l'analyse de ces simulations permet de conclure que l'air chargé en oxygène a du mal à atteindre le haut de la pièce.

8.3.4 Conclusion

Les calculs CFD réalisés sur cette expérience ont permis de démontrer qu'un maillage relativement "grossier" conduit à des résultats satisfaisants.

La bonne prédiction des températures a cependant été possible en faisant varier la fraction de radiation qui initialement conduisait à une sur-prédiction de l'ordre de 40% des températures.

L'allure de l'écoulement dans la chambre permet de tirer des conclusions en accord avec les concentrations d'oxygène mesurées. Et même s'il est impossible de capter la plupart des structures, les calculs effectués donnent dans ce cas une bonne base à la compréhension des phénomènes dans la chambre.

9. SIMULATION D'INCENDIES DANS LES PARCS OUVERTS A VOITURES

9.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Actuellement non autorisés sur le territoire français, les parcs de stationnement aériens à structure métallique font aujourd'hui l'objet de demandes de plus en plus pressantes quant à un nouvel examen de la stabilité de l'ouvrage et de sa résistance aux incendies. Les avantages qu'offrent de telles structures face aux parcs existants en terme de coût et de facilité d'exploitation sont en effet évidents.

De telles constructions peuvent être considérées, au regard de la modélisation incendie, dans une première approche de la même manière que des entrepôts avec cependant 2 caractéristiques bien spécifiques :

- des conditions de ventilation par des ouvertures latérales favorables à l'utilisation d'un modèle à 2 zones,
- une localisation précise des incendies qui ne concernent seulement que quelques voitures.

Considérer un scénario d'incendie généralisé dans ces conditions conduit à un surdimensionnement des structures et à des conditions de sécurité coûteuses et trop majorantes.

Dans ces conditions, une étude de l'influence de la ventilation sur la hauteur des zones chaude et froide est nécessaire afin de déterminer des surfaces d'ouvertures minimales.

L'objectif de l'étude est d'établir une surface d'ouverture minimale qui entraîne une hauteur d'interface entre couche chaude et froide suffisamment haute (de l'ordre de 2 mètres) pour permettre une éventuelle évacuation d'usagers et l'intervention des pompiers lors d'un incendie de véhicules. La géométrie considérée est représentée ci-dessous (Figure 29).

Des calculs pour différentes valeurs de h , H , de la longueur L de l'ouverture et du nombre de faces latérales ouvertes ont donc été réalisés.

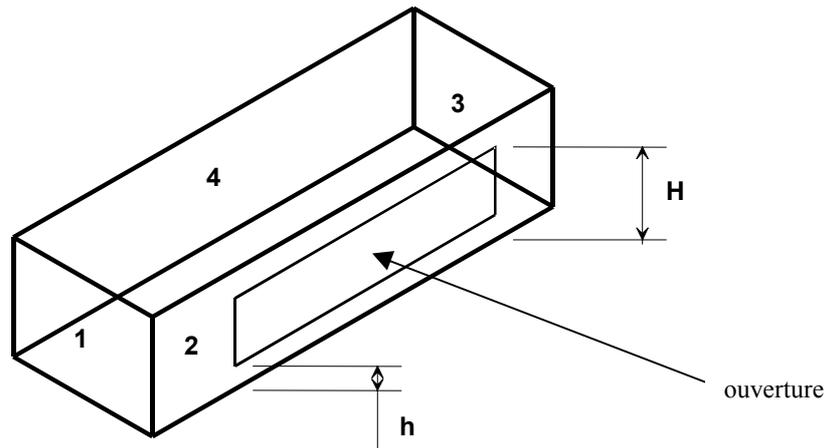


Figure 29 : géométrie du parc de stationnement

9.2 ETUDE AVEC CFAST

9.2.1 Description de l'incendie

Les véhicules actuels peuvent être répartis en plusieurs catégories en fonction des puissances thermiques dégagées en cas d'incendie. La détermination de cette puissance ne peut s'effectuer que par des essais à échelle réelle.

Il a été considéré pour cette étude, un feu de 3 véhicules prenant en compte l'incendie de 2 voitures qui se propage à une 3^{ème} voiture sur une durée d'environ une heure.

La puissance dégagée par ce feu a été estimée par une courbe en fonction du temps prenant en compte le phénomène de propagation et présentant un pic d'une dizaine de mégawatts à la moitié du temps de simulation.

9.2.2 Géométrie et conditions de désenfumage

Afin d'évaluer au mieux les surfaces d'ouvertures permettant des conditions d'interventions favorables pour les secours, un parc standard d'environ 120 places a été considéré.

Une variation de la surface des ouvertures sur l'extérieur (au niveau des façades) a été définie en fonction de la surface totale des façades. Ceci permet de dégager un pourcentage minimum d'ouverture pour une hauteur de couche donnée.

Des calculs sur l'influence de la géométrie du parc permettent ensuite de voir si la généralisation de cette valeur est possible.

Les différents cas étudiés s'organisent de la manière suivante :

Calculs	Dimensions du parc (m)	Faces ouvertes	Pourcentage d'ouverture par face	Dimensions des ouvertures		
				<i>h</i> (m)	<i>H</i> (m)	longueur (m)
1	70×32×3	2 et 4	100	0	3	70
		1 et 3	100	0	3	32
2	70×32×3	2 et 4	100	0	3	70
		1	100	0	3	32
3	70×32×3	2 et 4	100	0	3	70
4	70×32×3	2 et 4	50	1	2.5	70
5	70×32×3	2 et 4	25	1	2.5	35
6	70×32×3	2 et 4	25	1.5	2.25	70
7	70×32×3	2 et 4	9.3	1.5	2.25	26
8	70×32×3	2 et 4	4.6	1.5	2.25	13
9	70×32×3	2 et 4	1.7	1.5	2.25	4.8

10	70×32×2.5	2 et 4	25	1	2.25	35
11	70×32×3.5	2 et 4	25	1	2.75	35
12	35×35×3	2 et 4	25	1	2.5	17.5
13	70×70×3	2 et 4	25	1	2.5	35
14	140×140×3	2 et 4	25	1	2.5	70

Des calculs complémentaires avec maillage du parc pour les cas 5 et 14 ont été réalisés afin de valider les résultats précédents ne considérant qu'une seule cellule pour tout le parc.

9.2.3 Résultats des calculs

9.2.3.1 Pourcentage d'ouverture minimum

En considérant qu'une hauteur de couche chaude supérieure ou égale à 2 mètres constitue des conditions confortables d'intervention, les résultats indiquent que seuls les cas 7, 8 et 9 ne satisfont pas à cette condition (Figure 30).

En conséquence, si 2 des plus grandes façades sont ouvertes sur l'extérieur avec une ouverture ayant une dimension de 25% de leur surface totale, alors la hauteur d'interface est supérieure à 2 mètres.

Les températures de la couche haute trouvée sont relativement proches pour l'ensemble des cas et sont estimées entre 200 et 250°C.

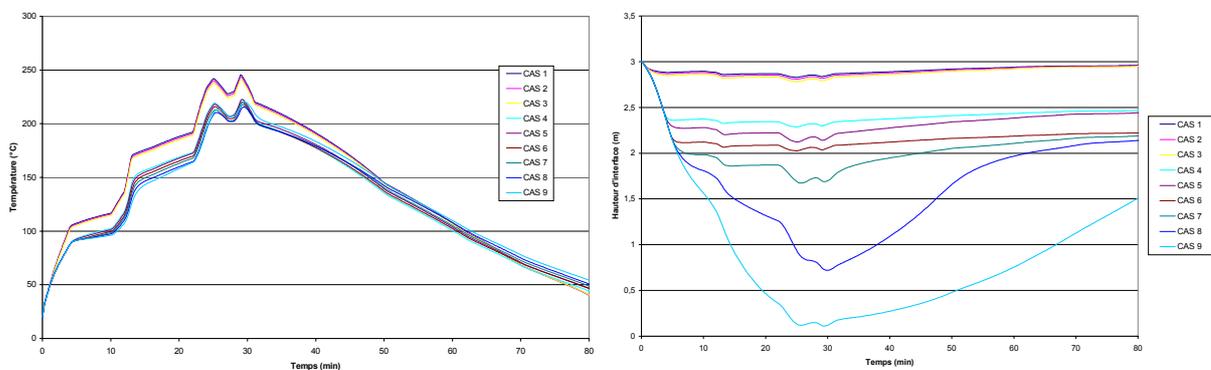


Figure 30 : températures et hauteurs d'interfaces calculées pour les 9 premiers cas

Un pourcentage minimal de 25% de surface d'ouverture sur les 2 faces les plus importantes conduit donc à une hauteur d'interface supérieure ou égale à 2 mètres.

9.2.3.2 Influence de la hauteur du parc sur le pourcentage d'ouverture minimum

L'étude des cas 5, 10 et 11 indique que la hauteur de couche est assez fortement liée à la hauteur du parc même si les 25% d'ouverture permettent toujours d'avoir une hauteur d'interface autour de 2 mètres (Figure 31).

Il semble en effet qu'une diminution de la hauteur du parc de 50 centimètres conduise à une diminution de la hauteur de couche de 25 centimètres. Les résultats sont semblables dans le cas d'une augmentation de 50 centimètres.

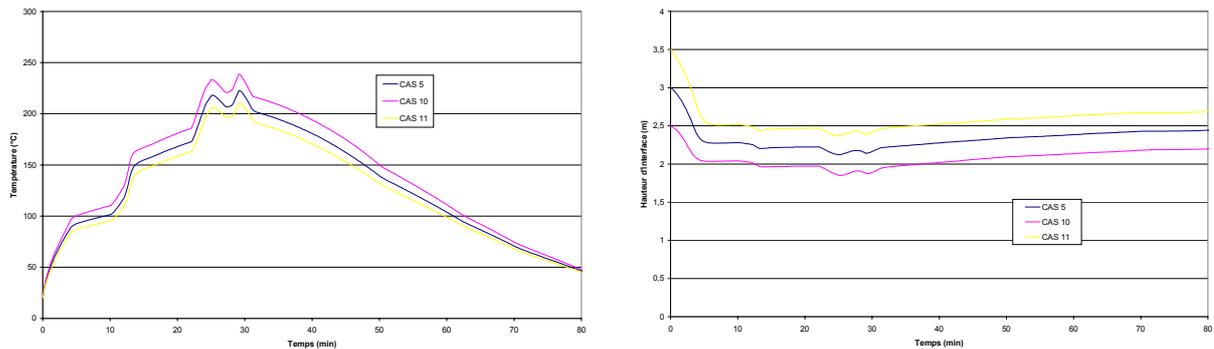


Figure 31 : températures et hauteurs d'interfaces paramétrées par la hauteur du parc

9.2.3.3 Influence des dimensions du parc sur le pourcentage d'ouverture minimum

Les calculs sur 3 autres parcs de 60, 240 et 960 places (respectivement cas 12, 13 et 14) avec un pourcentage d'ouverture par face de 25% ont été réalisés. Les résultats indiquent une influence notable des dimensions des parcs sur la hauteur de couche et plus encore sur les températures des couches chaudes.

L'évolution de la hauteur de l'interface pour ces 3 cas est différente pendant la première demi-heure de l'incendie alors qu'ensuite, il y a convergence vers la valeur de 2.5 mètres. Pour le cas le plus défavorable (cas 12), la hauteur minimale calculée est d'environ 1.75 mètres (Figure 32).

Les températures des couches chaudes pour le cas 12 est de l'ordre de celles trouvées sur les cas précédents. Les 3 températures suivent exactement l'évolution de la surface au sol du parc : ces températures doublent pour une surface au sol 4 fois moins importante.

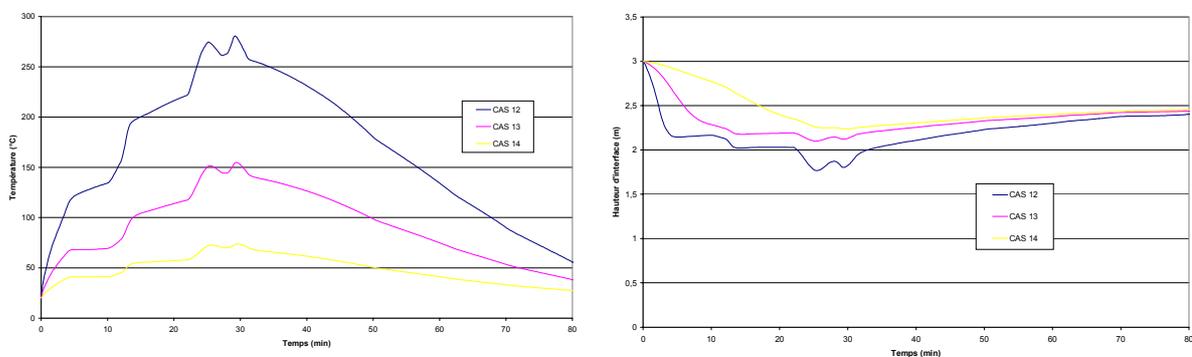


Figure 32 : températures et hauteurs d'interfaces paramétrées par la surface du parc

9.2.3.4 Influence des grandes dimensions sur les calculs

La validité des calculs précédents peut être limitée compte tenu de l'approximation des 2 zones puisque les dimensions qui entrent en jeu sont importantes. Des calculs ont donc été réalisés en reconsidérant les cas 5 et 14 avec un maillage de la surface afin de se rapprocher des domaines d'utilisation courantes des codes à zones.

Pour le cas n°5, le parc qui avait des dimensions de 70×32×3 mètres a été divisé de la manière suivante :

	cellule 1 10×10×3m	cellule 2 30×10×3m
	cellule 3 10×11×3m surface d'ouverture : 15 m ²	cellule 4 30×11×3m surface d'ouverture : 18.75 m ²

La source se trouve au centre de la cellule 1. Seuls les résultats des 4 cellules sont donnés en raison de la symétrie.

Pour toutes les cellules, les résultats montrent une hauteur d'interface quasiment égale et supérieure à 2 mètres (Figure 33). Le découpage de ce point de vue confirme la valeur obtenue pour la hauteur de couche chaude du calcul à une seule cellule.

Cependant, les températures ne sont pas homogènes dans le parc. Proche de la source (cellule 1), la température atteint 470°C, alors que dans la cellule la plus éloignée (cellule 4) la couche chaude n'est que de 150°C.

Il est à remarquer que la température dans la couche chaude de la cellule 2 est inférieure à celle obtenue pour la cellule 3. Ceci s'explique par une surface moins importante en 3 qu'en 2. La surface au sol est un paramètre qui dans ce cas prédomine face à l'ouverture sur l'extérieur dans la cellule 3.

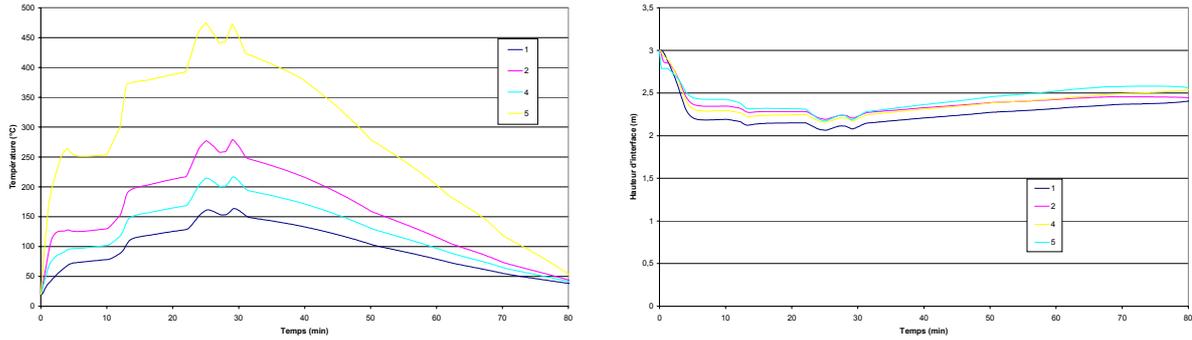


Figure 33 : températures et hauteurs d'interfaces des 4 compartiments

Pour le cas 14, les dimensions très importantes du parc (140×140×3 mètres) rendent encore plus contestables les conclusions sur un calcul à une seule pièce avec une approximation à 2 zones.

La même démarche que dans le cas précédent a été suivie en considérant le maillage suivant :

		compartiment 1 10×10×3	compartiment 2 30×10×3	compartiment 3 35×10×3
		compartiment 4 10×30×3	compartiment 5 30×30×3	compartiment 6 35×30×3
		compartiment 7 10×35×3 surface d'ouverture 15m ²	compartiment 8 30×35×3 surface d'ouverture 45m ²	compartiment 9 35×35×3

Un maillage de 25 cellules a été considéré. Pour des raisons de symétrie, Les résultats de 9 cellules sont présentés.

Les résultats de ce calcul montre, compte tenu du grand nombre de cellules, une propagation rapide des fumées du centre (1) à l'angle du parc (9). Les hauteurs d'interface des 8 premières cellules varie entre 2 et 2.5 mètres de manière assez inhomogène (Figure 34). La cellule 9 se distingue par une hauteur en constante diminution liée à sa position de coin non reliée à l'extérieur. Cependant la température à cet endroit n'est au maximum que de 35°C pour la couche chaude.

Il est à remarquer le fait que le premier calcul à une pièce du parc prévoyait une température de couche chaude de 70°C. Ici les températures maximales obtenues pour les cellules 2 et 4 sont supérieures à 200°C et par conséquent plus en accord avec les températures calculées pour la plupart des cas traités.

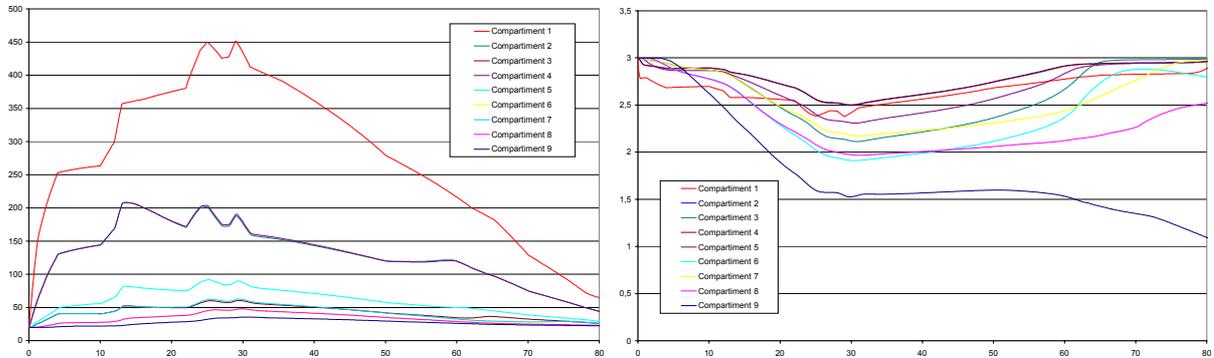


Figure 34 : températures et hauteurs d'interfaces des 9 compartiments

9.2.4 Conclusion

Les résultats des calculs effectués avec le code à zones indiquent qu'un pourcentage minimal de 25% de surface d'ouverture sur 2 grandes façades d'un parc permet en cas d'incendie de maintenir les fumées à une hauteur supérieure à 2 mètres.

Les températures estimées pour la zone chaude sont de l'ordre de 250°C. Cependant cette valeur représente une valeur moyenne sur l'ensemble du parc. Grâce à un maillage, le calcul donne des températures de l'ordre de 400°C dans une zone aux alentours de 10 mètres du feu. Malgré tout, ces calculs méritent d'être confirmés par l'emploi d'un code CFD pour des valeurs plus précises.

9.3 ETUDE COMPLEMENTAIRE AVEC FDS

A la suite de l'étude avec CFAST, il a été réalisé un calcul CFD afin d'obtenir le champ de températures à l'intérieur du parc. Le cas étudié est le cas 5 correspondant au parc de 120 places avec des ouvertures sur les 2 grandes faces latérales de 25 %.

L'objectif de ces calculs était de pouvoir comparer les températures dans le hangar avec celles obtenues grâce au code à zone.

9.3.1 Géométrie et maillage

Les dimensions du hangar sont identiques à celles précédemment définies pour le cas 5.

Pour réduire le temps de calcul, un plan de symétrie a été utilisée (Figure 35). L'espace physique considéré a donc des dimensions de 35×32×3 mètres.

Le maillage est constitué d'environ 14 000 points avec un resserrement du pas de maillage au niveau des véhicules. La durée importante de la simulation (plus de 4 000 secondes) impose un nombre de points relativement faible en raison du temps de calcul.

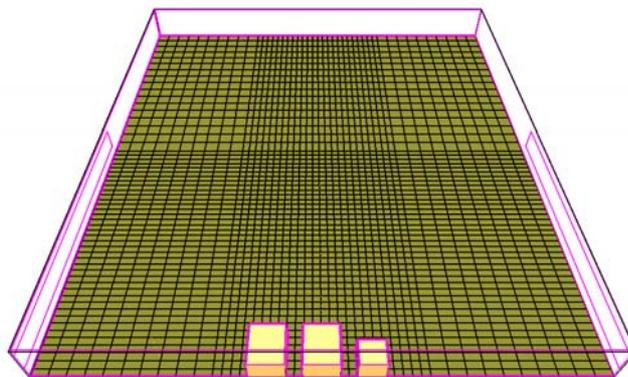


Figure 35 : maillage du parc de 120 places défini avec un plan de symétrie

9.3.2 Définitions des conditions aux limites et des sources

Les véhicules ont été positionnés au centre du parc, ce qui permet d'avoir le cas le plus défavorable au niveau du champ de températures à l'intérieur du parc.

La résolution du maillage ne permet pas de représenter de façon précise les voitures. Des blocs de dimensions approximativement conformes à la réalité ont donc été définis avec des sources de débit de particules lagrangiennes sur chacune des faces.

Sur la figure précédente, au centre se trouve le véhicule de classe 3 et à droite le véhicule de classe 1 qui s'enflamme au temps $t=0$. Le feu se propage ensuite au véhicule de classe 3 à gauche.

Les conditions de sortie au niveau des ouvertures sont définies par des sorties libres.

9.3.3 Résultats des calculs

Cinq arbres de thermocouples ont été disposés de manière à obtenir les températures à des distances proches des véhicules. Ces arbres comprennent chacun 5 thermocouples situés à 0.5, 1, 1.5, 2 et 2.5 mètres de hauteur. Ils sont positionnés :

- à 1, 5 et 10 mètres des voitures dans le plan longitudinal médian,
- à 1 et 5 mètres des voitures à 1 mètre du plan de symétrie.

Le temps de calcul a été d'environ de 80 heures.

Le champ de température déterminé est conforme à celui obtenu par les calculs de CFAST. En effet, des températures de l'ordre de 200°C sont atteintes sous le plafond. Ce résultat est mis en évidence sur la figure suivante.

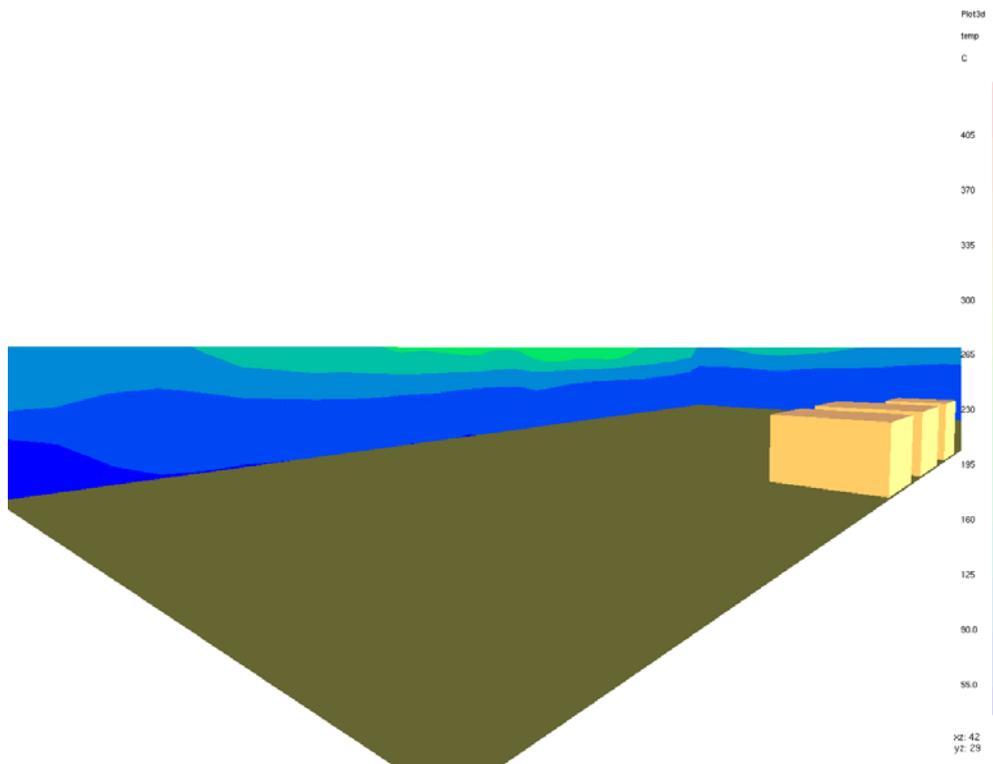


Figure 36 : champ de températures dans le parc à $t=30$ minutes

Le gradient de températures sous le plafond est important et ces températures dépendent fortement de la distance à la source comme le montre la représentation du champ de températures à 50 centimètres sous le plafond (Figure 37)

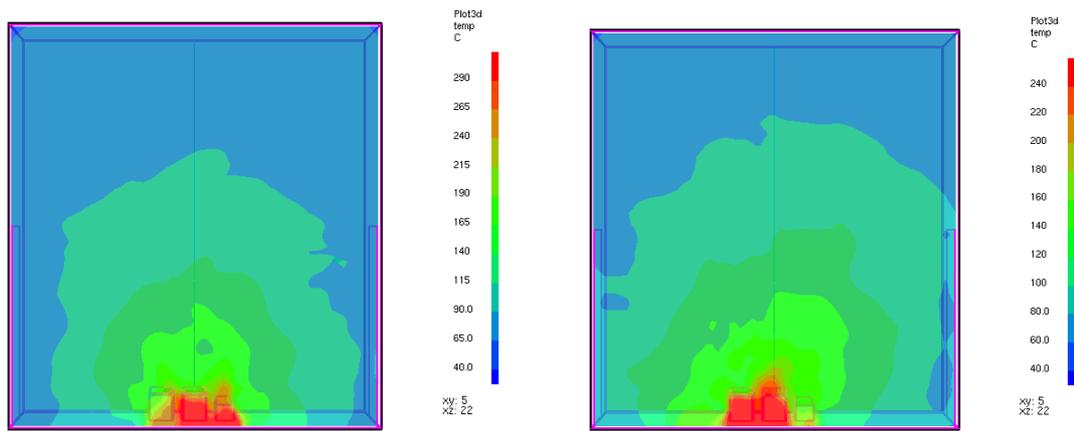


Figure 37 : températures à 2.5 mètres du sol à 20 minutes et 40 minutes

Au niveau des thermocouples, les températures calculées sous le plafond à 1 mètre des voitures sont de l'ordre de 300 à 350°C. Un très fort gradient conduit à des températures d'environ 70°C à 50 centimètres du sol (Figure 38).

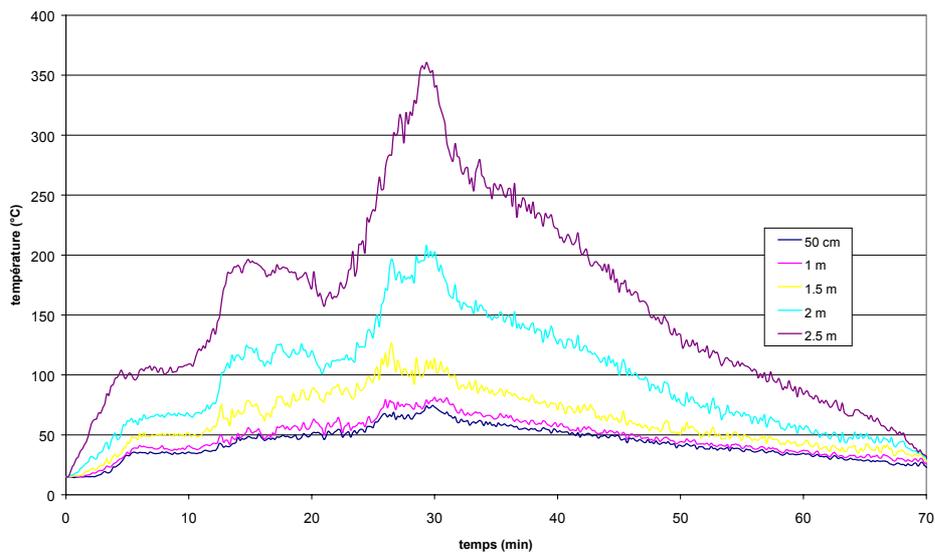


Figure 38 : températures à 1 mètre des voitures dans le plan médian

A une distance de 5 mètres des véhicules, une température de l'ordre de 200 à 250°C est obtenue sous le plafond, ce qui correspond à la température de la couche chaude calculée avec CFAST (Figure 39).

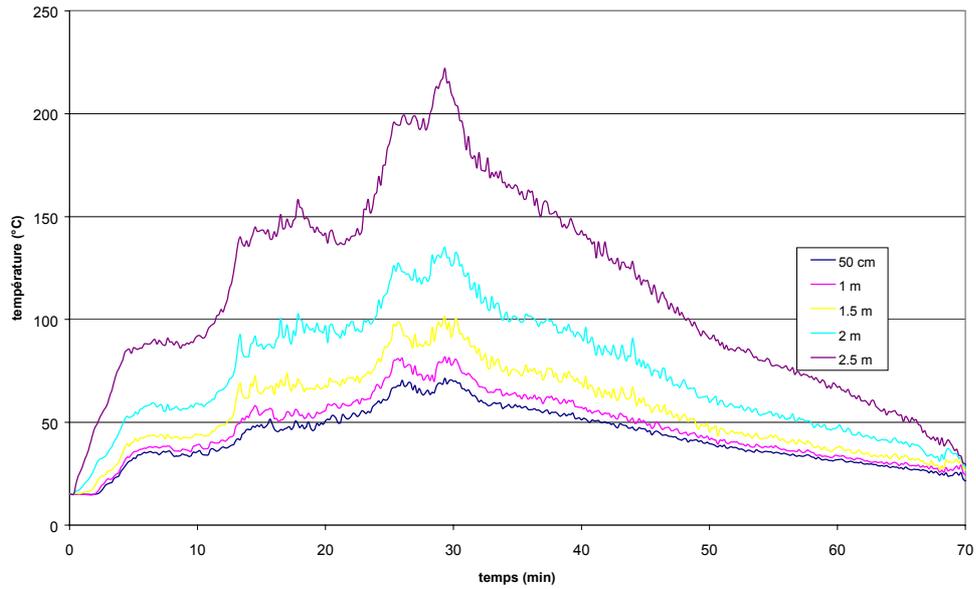


Figure 39 : températures à 5 mètres des voitures dans le plan médian

9.3.4 Conclusion de l'étude CFD

Ce premier calcul a permis de comparer les résultats obtenus avec les deux codes.

Il a été clairement mis en évidence que la température obtenue avec le code à zone est à la fois une température moyenne par rapport à la hauteur du parc mais également par rapport à la distance aux véhicules. Néanmoins, l'ordre de grandeur donné par CFAST semble correct et correspond à une valeur supérieure à la moyenne globale des températures sous le plafond dans le parc.

10. CONCLUSION

Cette étude montre l'intérêt de pouvoir disposer d'outils adaptés pour modéliser le développement d'un incendie en milieu confiné.

De l'étude du logiciel CFAST, il ressort principalement que :

- son utilisation s'avère simple et permet de pouvoir faire des études paramétriques rapides,
- la température calculée pour décrire la zone chaude est une température plutôt moyenne et non une température maximale,
- il convient d'utiliser avec prudence ce genre de modèle pour des domaines de taille grande (typiquement supérieure à 100 m). Les codes à zone ne sont pas spécialement adaptés à ce genre de modèle. Un premier moyen pour y pallier peut consister à compartimenter le domaine en différentes cellules.

Le code FDS permet quant à lui d'étudier finement l'incendie mais sa mise en œuvre est complexe et les temps de calcul sont importants. Toutefois, il s'agit d'un modèle très intéressant qui est en cours de développement et nécessite encore des travaux de validation.

Ces deux types de modèles sont toutefois complémentaires.

Un code à zone peut être utilisé en première approche. Il permet d'obtenir des bons ordres de grandeur et de ce fait permet de pouvoir effectuer une étude paramétrique. Un code tel que FDS est à utiliser lorsqu'on veut décrire finement les phénomènes.

Le travail de validation entrepris mérite d'être approfondi.

En ce qui concerne le code à zone, l'idée de diviser en cellules fictives permet d'envisager la possibilité de modéliser, en première approche, un incendie dans une grande structure telle qu'un entrepôt. Cette idée mérite d'être davantage creusée.

En ce qui concerne le code FDS, des travaux de validation sont envisagés. Il est également prévu de mener des travaux numériques afin d'adapter le code à nos besoins et de diminuer les temps de calcul. Ces travaux seront en particulier menés dans le cadre du programme BCRD intitulé "Caractérisation des incendies industriels". Il est prévu de mettre en place sur le sujet une collaboration avec le LCD de Poitiers et si possible avec le NIST.

A terme, ce type d'outil permettra d'étudier le développement d'incendie dans des entrepôts tout en prenant en compte des moyens de protection.

NOMENCLATURE

C	constante de Smagorinsky
$c_{p,e}$	chaleur spécifique de l'espèce e
D	coefficient de diffusion
E	énergie interne
\vec{g}	champ de gravité
H_c	enthalpie de combustion d'un produit
h	enthalpie d'une espèce chimique
H	pseudo-pression totale
k	conductivité thermique
M	masse
\dot{m}	débit massique
\dot{m}_p	débit massique dans le panache d'un feu
\dot{m}_e	débit massique d'entraînement d'air
P	pression
P_0	pression de référence
Pr	nombre de Prandtl
\dot{Q}	puissance thermique totale d'un feu ; $\dot{Q} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_r$
\dot{Q}_c	puissance thermique convectée
\dot{Q}_r	puissance thermique rayonnée
\dot{q}'''	flux de chaleur par unité de volume
\dot{q}''	flux de chaleur par unité de surface
R	constante universelle des gaz parfaits
Re	nombre de Reynolds
Sc	nombre de Schmidt
\dot{s}	enthalpie
T	température
$\vec{u} = (u, v, w) = (u_1, u_2, u_3)$	vecteur vitesse
V	volume
\dot{W}'''	taux de production de l'espèce i par unité de volume

Y_e	fraction massique de l'espèce e
$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$	$\gamma=1.4$ pour une molécule diatomique
ρ	masse volumique
ρ_∞	masse volumique de référence
χ_r	fraction de radiation ; $\chi_r + \chi_c = 1$
$\vec{\omega} = (w_1, w_2, w_3)$	vorticité
τ	tenseur des contraintes visqueuses
ν	viscosité cinématique
$\mu = \nu\rho$	viscosité dynamique
$\frac{d.}{dt} = \frac{\partial.}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}.$	dérivée particulaire

REFERENCES

- [1] R.D. Peacock, P.A. Reneke, W.W. Jones, R.W. Bukowski, G.P. Forney, “A User’s Guide for FAST : Engineering Tools for Estimating Fire Growth & Smoke Transport”. *Special Publication 921*, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899, January 2000.
- [2] R.D. Peacock, P.A. Reneke, W.W.Jones, G.P. Forney, “A Technical Reference for CFAST : A Engineering Tool for Estimating Fire & Smoke Transport”. *NIST TN 1431*, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899, January 2000.
- [3] S. Deal, “Technical Reference Guid for FPEtool Version 3.2”. *NISTIR 5486-1*, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899, April 1995.
- [4] W.W. Jones, H.R. Baum, *Modeleing Fire Growth & Smoke Transport in the United States*, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899.
- [5] G.P. Forney, W.F.Moss, “Analysing and exploiting Numerical Characteristics of Zone Models ”. *Fire Science & Technology Vol 14 N°1 & 2*, 1994, p 49 à 60.
- [6] Dougal Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics 2nd Edition*. Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [7] W.D. Davis, K.A. Notarianni, K.B. McGrattan, “Comparison of Fire Model Predictions with Experiments conducted in a Hangar with 15 meters Ceiling”. *NISTR 5927*, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899, December 1996.
- [8] F.W. Mowrer, D.W. Stroup, “Features, Limitations and Uncertainties in Enclosure Fire Hazard Analyses – Preliminary Review”. *NISTIR 6152*, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899, March 1998.
- [9] K.B. McGrattan, G.P. Forney, “Fire Dynamics Simulator – User’s Manual”. *NISTIR 6469*, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899, January 2000.
- [10] K.B. McGrattan, G.P. Forney, H.R. Baum, R.G. Rehm, A.Hamins, “Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide”. *NISTIR 6467*, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899, January 2000.
- [11] K.B. McGrattan, A. Hamins, D. Stroup, “Sprinkler, Smoke & Heat Vent, Draft Curtain Interaction – Large Scale Experiments & Model Development”. *NISTIR*

6196-1, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899, September 1998.

- [12] Jean-Michel d'HOOP, *Technique de l'ingénieur – Sécurité Incendie*, p. A 8 890-1 à A 8 890-16
- [13] J.P. Bertoglio, *Simulations numériques d'écoulements turbulents*. Ecole de Printemps, Mai 1993
- [14] I. Danaila, *Simulations numériques directes (DNS) et des grandes échelles (LES) des écoulements incompressibles en coordonnées cylindriques*. Collaboration INERIS-IRPHE, Novembre 1998, p 41 à 45
- [15] H.R. Baum, K.B. McGrattan, R.G. Rehm, *Three Dimensionnal Simulations of Fire Plume Dynamics*, National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg MD 20899

11. LISTE DES ANNEXES

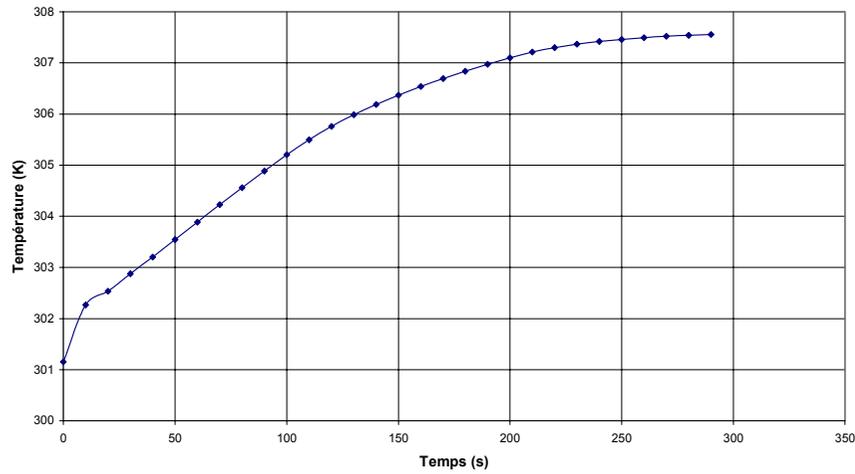
Repère	Désignation précise	Nb/N° pages
A	Simulation de feux dans un hangar avec CFAST	
B	Simulation de feux dans un hangar avec FDS	
C	Simulation des essais pyridine dans la chambre 80 m ³ avec CFAST	
D	Simulation des essais pyridine dans la chambre 80 m ³ avec FDS	

ANNEXE A

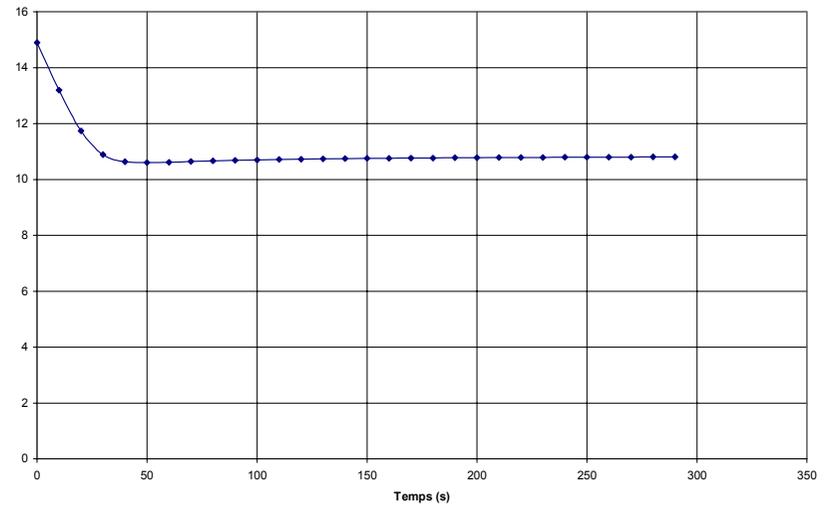
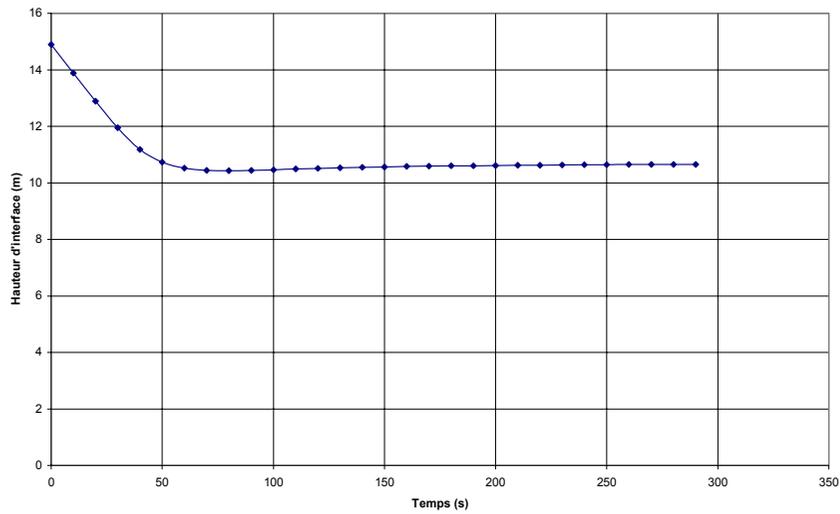
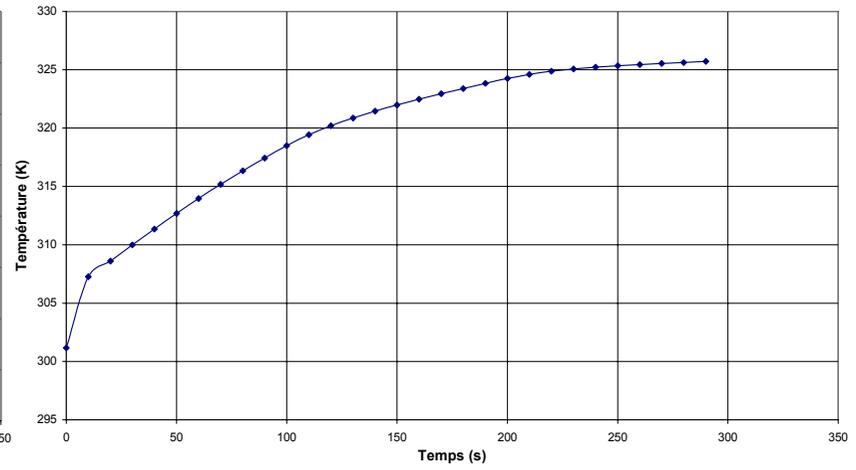
SIMULATION DE FEUX DANS UN HANGAR AVEC CFAST

ANNEXE A.1 : Zone de cantonnement seule

FEU 1



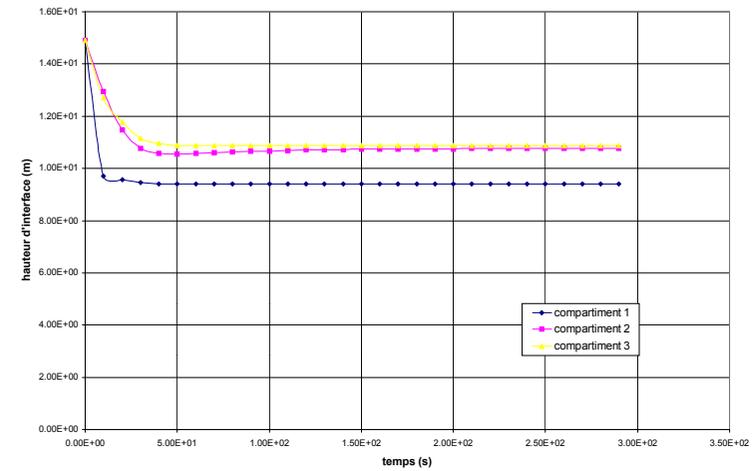
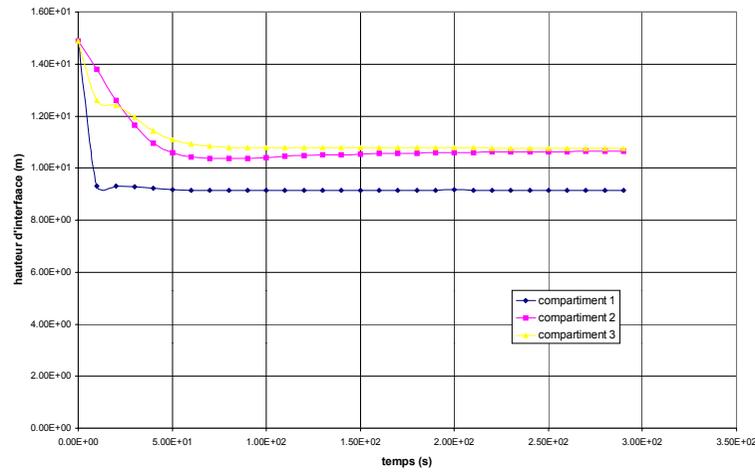
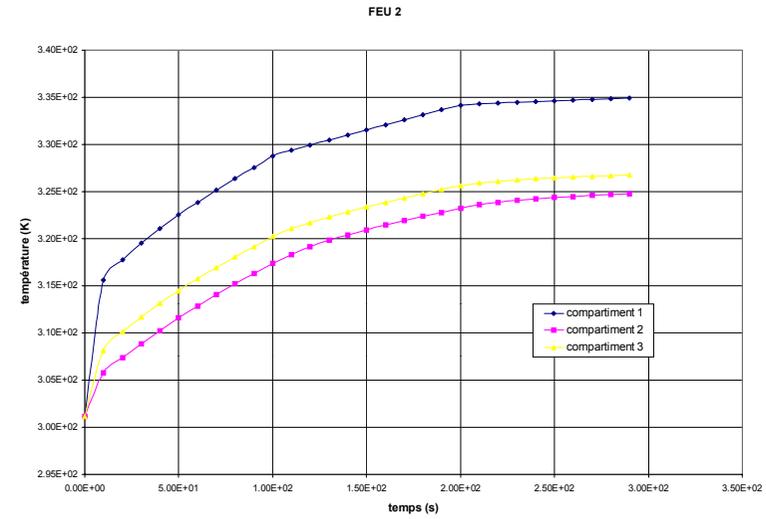
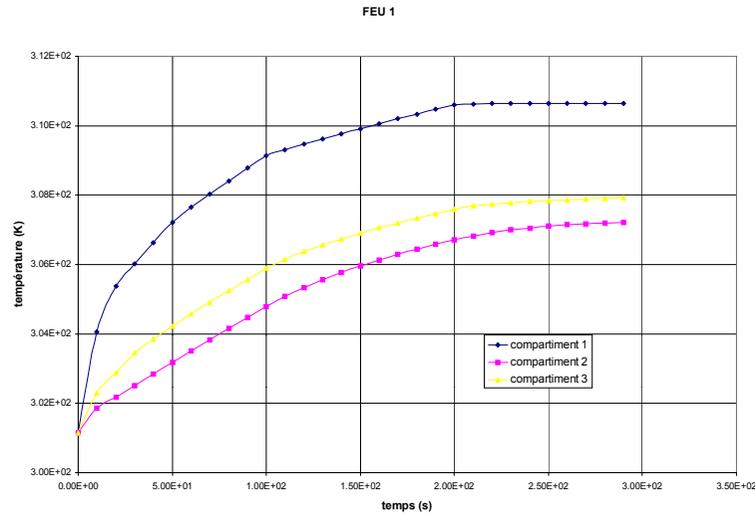
FEU 2



ANNEXE A.2 : Maillage de la zone de cantonnement

2 $8.15 \times 24.4 \times 14.9$		
3 $2 \times 11.2 \times 14.9$	1 $2 \times 2 \times 14.9$	5 $2 \times 11.2 \times 14.9$
4 $8.15 \times 24.4 \times 14.9$		

ANNEXE A.3 : Evolution de la température de la couche chaude et de la hauteur d'interface pour les 2 feux



ANNEXE A.4 : Maillage de la zone de cantonnement pour une comparaison avec les résultats expérimentaux

MAILLAGE 1

7	6	5	4	3	2	1	8
18.3×3.2×14.9	18.3×1×14.9	18.3×1×14.9	18.3×4×14.9	18.3×2×14.9	18.3×1×14.9	18.3×2×14.9	18.3×12.2×14.9

MAILLAGE 2

9	8	7	6	5	4	2	10
						8.15×2×14.9	
						1	
18.3×3.2×14.9	18.3×1×14.9	18.3×1×14.9	18.3×4×14.9	18.3×2×14.9	18.3×1×14.9	2×2×14.9	18.3×12.2×14.9
						3	
						8.15×2×14.9	

MAILLAGE 3

9	8	7	6	5	4	2	10,11,12, 13,14,15
						8.15×2×14.9	
						1	
18.3×3.2×14.9	18.3×1×14.9	18.3×1×14.9	18.3×4×14.9	18.3×2×14.9	18.3×1×14.9	2×2×14.9	18.3×12.2×14.9
						3	
						8.15×2×14.9	

ANNEXE A.5 : Résultats des 3 maillages pour les 2 feux

FEU 1

distance en mètres	1,5	3	6	8,5	9,5	11,6	compartiment équivalent	compartiment contenant la source
température exp à 225s (°C)	41	39	36	35	35	32		
résultats numériques publiés	X	41	41	41	41	41		
résultats du maillage 1								
température à 225s (°C)	35	34	34	33	33	32	34	35
hauteur de couche basse	10,7	10,7	10,7	10,7	10,6	10,5	10,5	10,7
résultats du maillage 2								
température à 225s (°C)	35	35	34	33	33	32	34	38
hauteur de couche basse	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7	10,5	10,6	9,12
résultats du maillage 3								
température à 225s (°C)	35	35	34	34	33	32	x	38
hauteur de couche basse	10,7	10,7	10,7	10,7	10,6	10,5	x	9,09

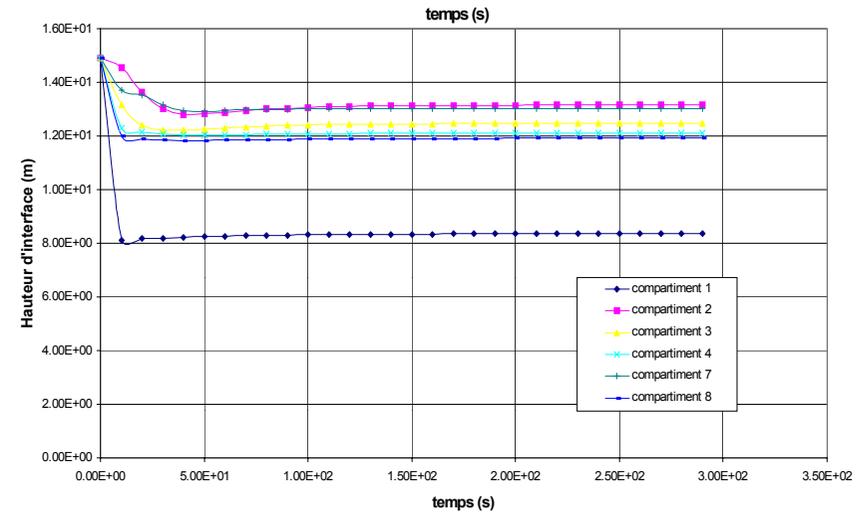
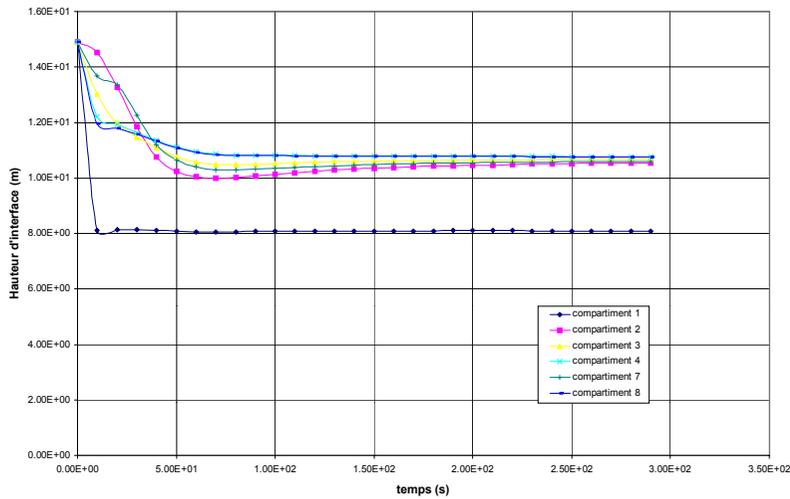
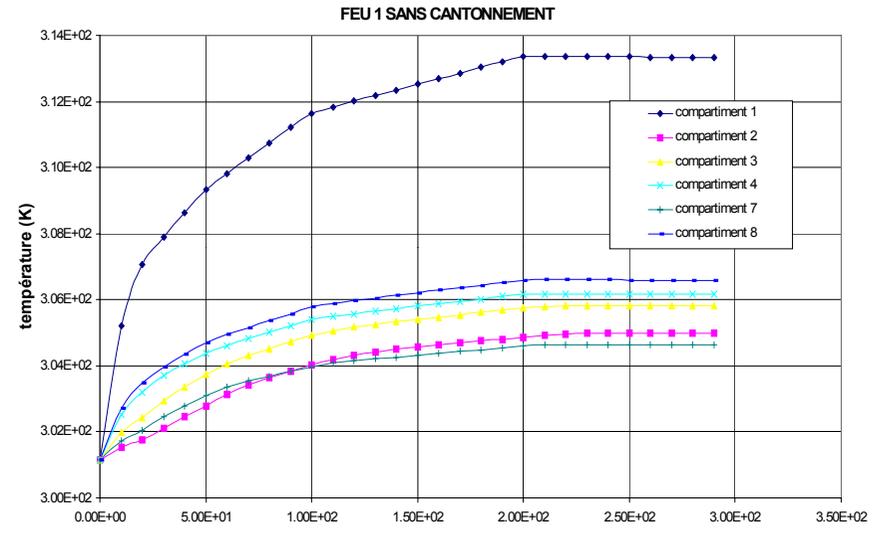
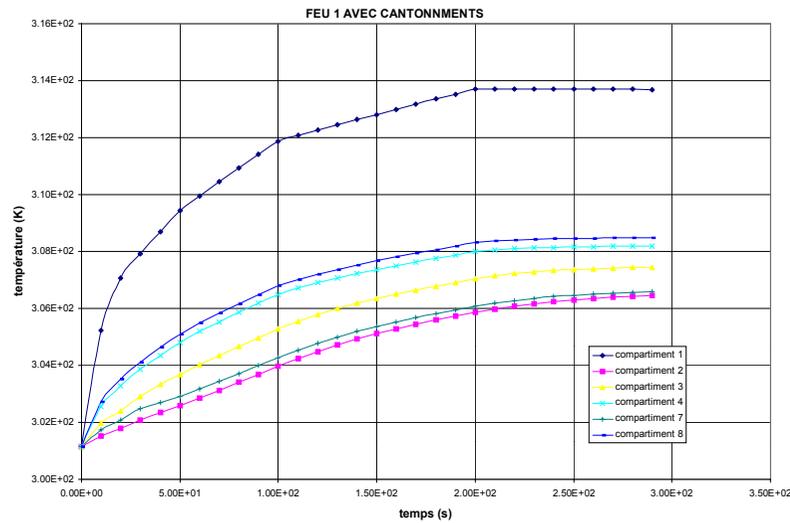
FEU 2

distance en mètres	1,5	3	6	8,5	9,1	11,6	compartiment équivalent	compartiment contenant la source
température exp à 225s (°C)	66	62	58	54	52	41		
Résultats numériques publiés	x	80	83	82	82	81		
résultats maillage 1								
température à 225s (°C)	53	52	50	49	47	46	51	54
hauteur de couche basse	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7	10,9
résultats maillage 2								
température à 225s (°C)	54	53	51	49	48	46	52	62
hauteur de couche basse	10,9	10,9	10,9	10,9	10,8	10,8	10,8	9,39
résultats maillage 3								
température à 225s (°C)	55	54	51	50	49	47	x	62
hauteur de couche basse	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,7	x	9,35

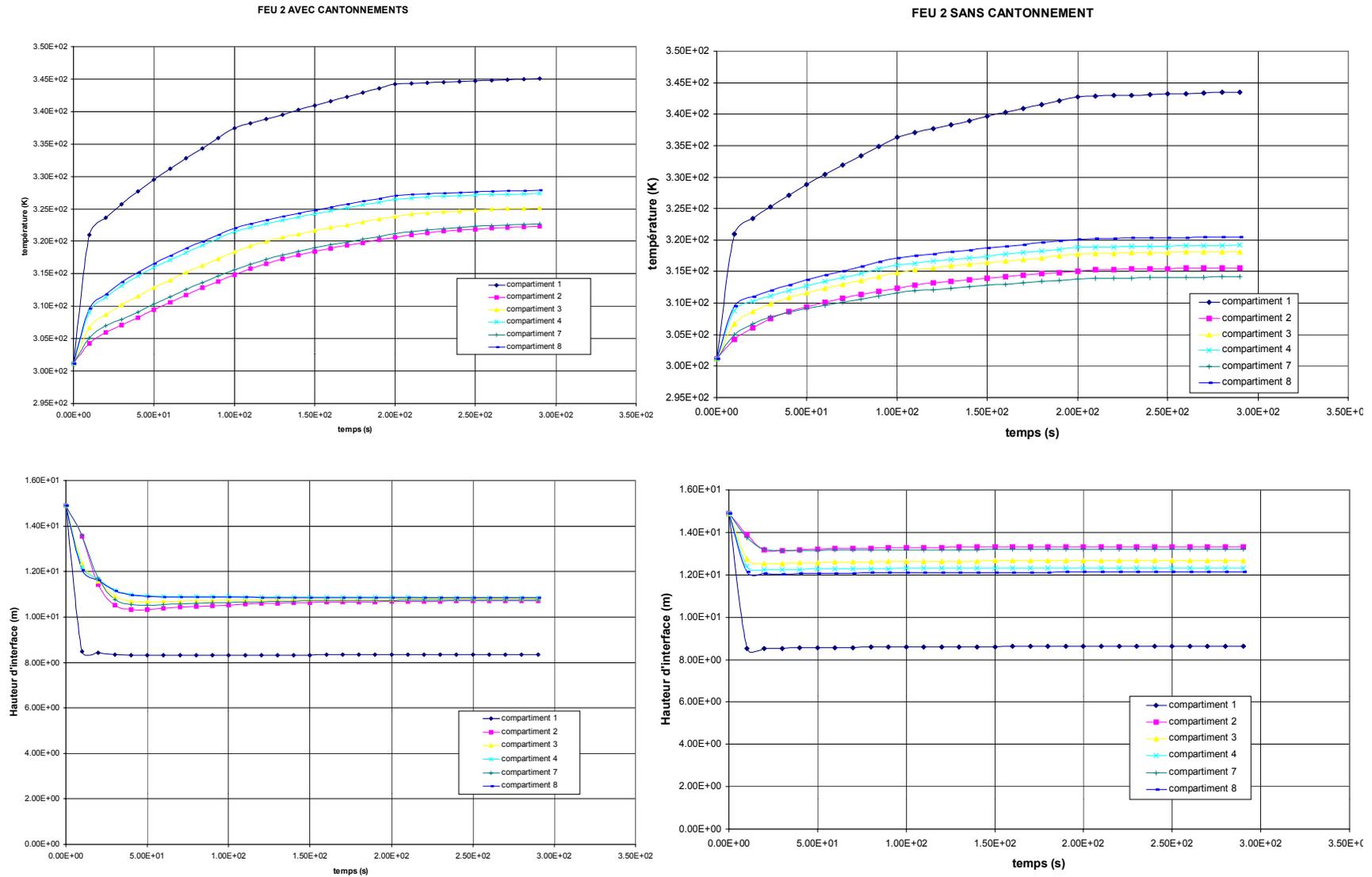
ANNEXE A.6 : INFLUENCE DU MAILLAGE ET DES CANTONNEMENTS SUR LES RESULTATS

2 8.615×5.85×14.9	3 8.615×5.85×14.9	4 1×5.85×14.9	5 8.615×5.85×14.9	6 8.615×5.85×14.9
7 1×5.85×14.9	8 1×5.85×14.9	1 1×1×14.9	9 1×5.85×14.9	10 1×5.85×14.9
11 8.615×5.85×14.9	12 8.615×5.85×14.9	13 1×5.85×14.9	14 8.615×5.85×14.9	15 8.615×5.85×14.9

ANNEXE A.7: Evolution de la température et de la hauteur d'interface avec et sans cantonnement pour le feu 1



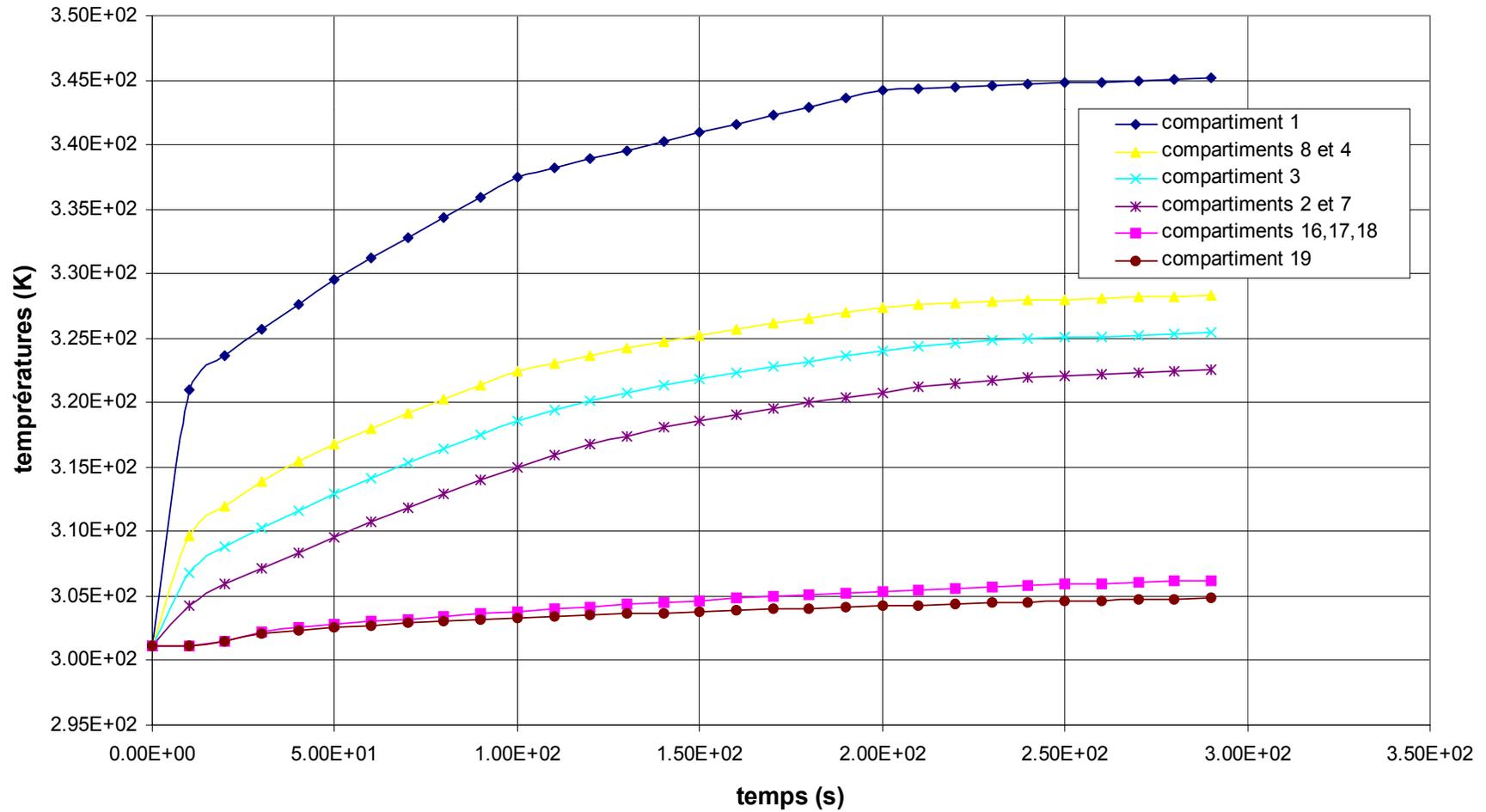
ANNEXE A.8 : Evolution de la température de la hauteur d'interface avec et sans cantonnement pour le feu 2



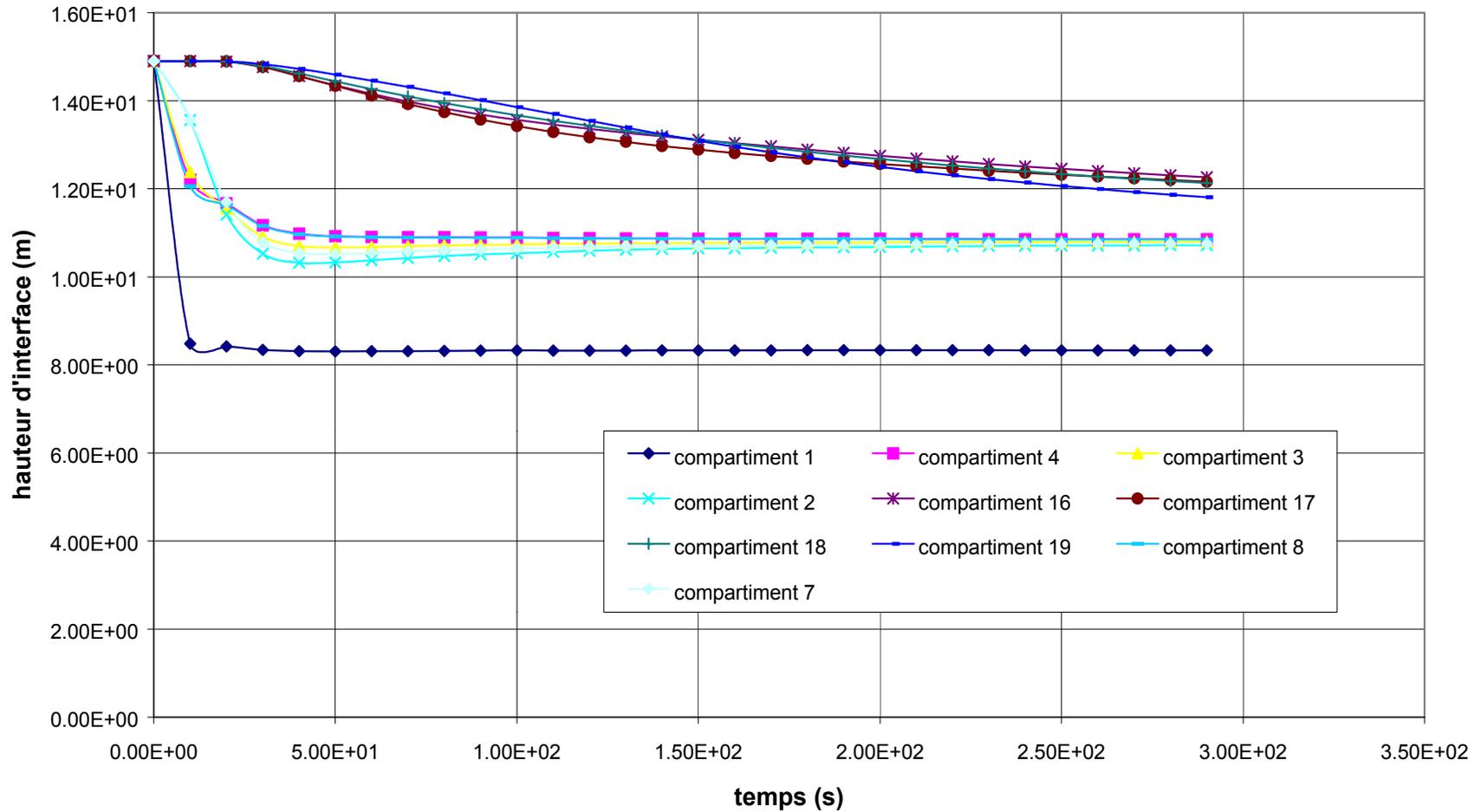
ANNEXE A.9 : INFLUENCE DES CANTONNEMENTS ET DES EXUTOIRES SUR LES TEMPERATURES ET LES HAUTEURS D'INTERFACE DANS L'ENSEMBLE DU HANGAR POUR LE FEU 2

16 24.75×97.8×14.9		
17 73.8×24.5×14.9	cantonnement	19 73.8×48.9×14.9
18 30.75×97.8×14.9		

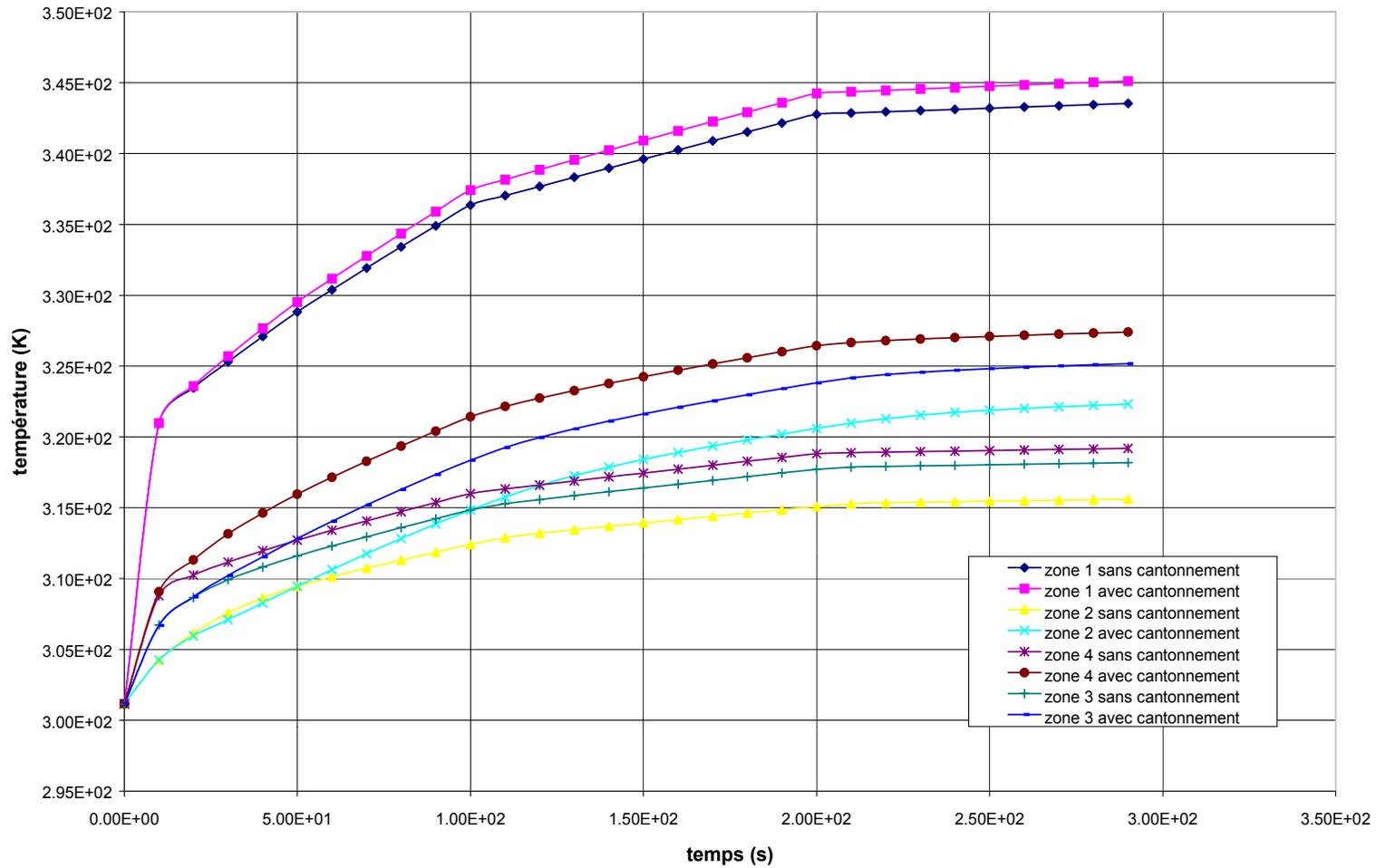
ANNEXE A.10 : Température des couches chaudes dans le hangar avec cantonnements



ANNEXE A.11 : Hauteur d'interface dans le hangar avec cantonnements

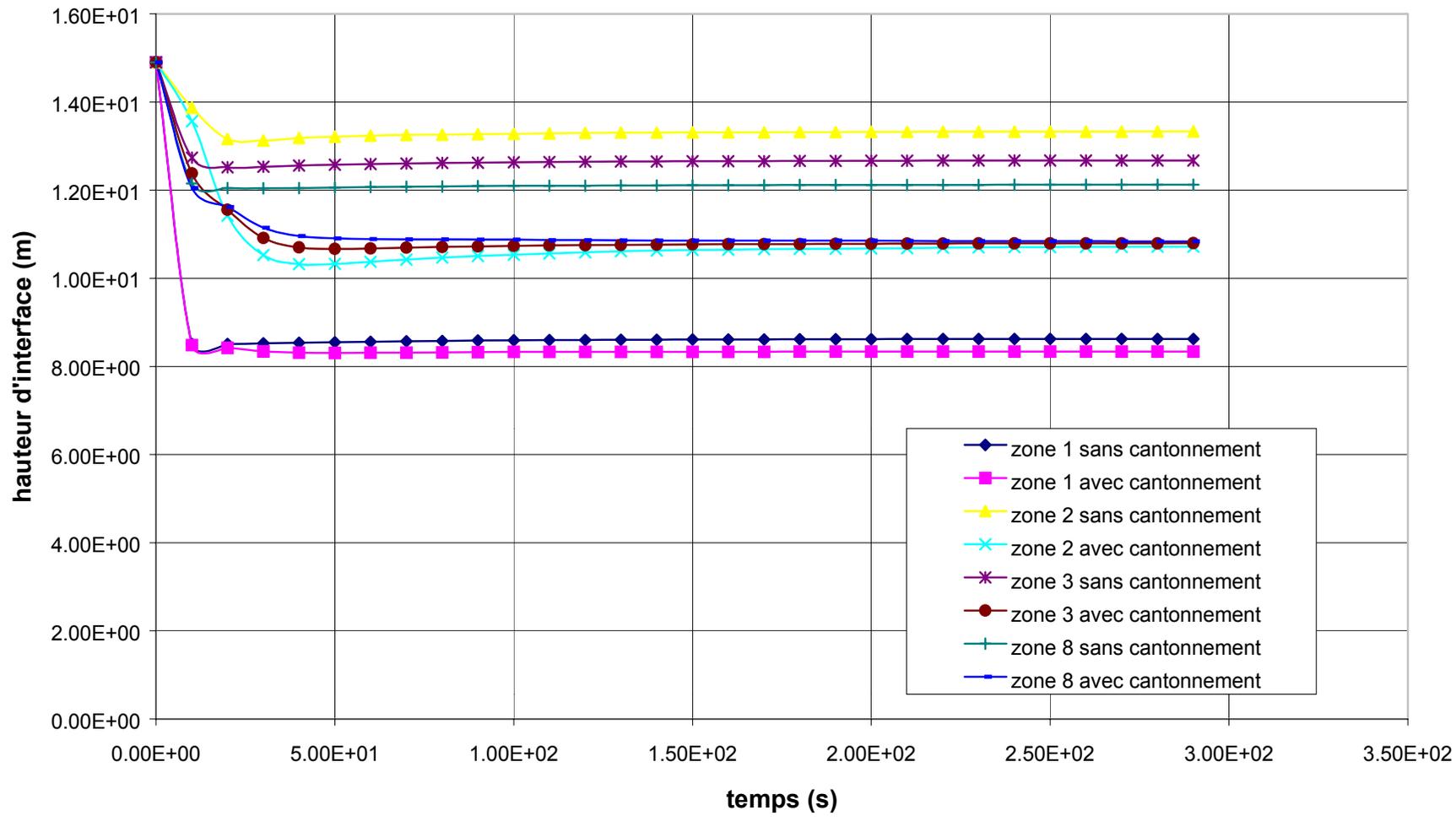


ANNEXE A.12 : Influence des cantonnements sur la température

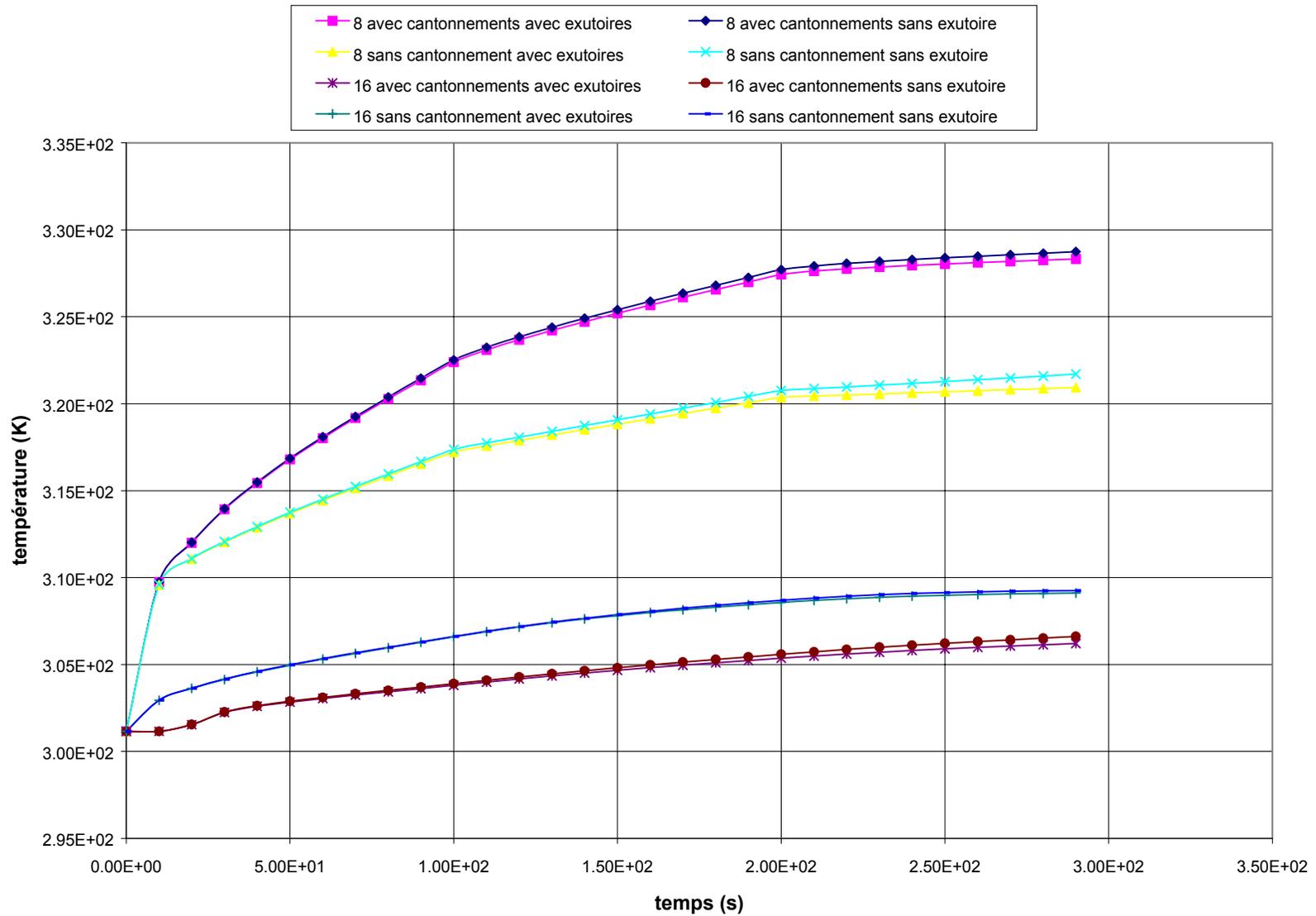


ANNEXE A.13 : Influence des cantonnements sur la hauteur d'interface

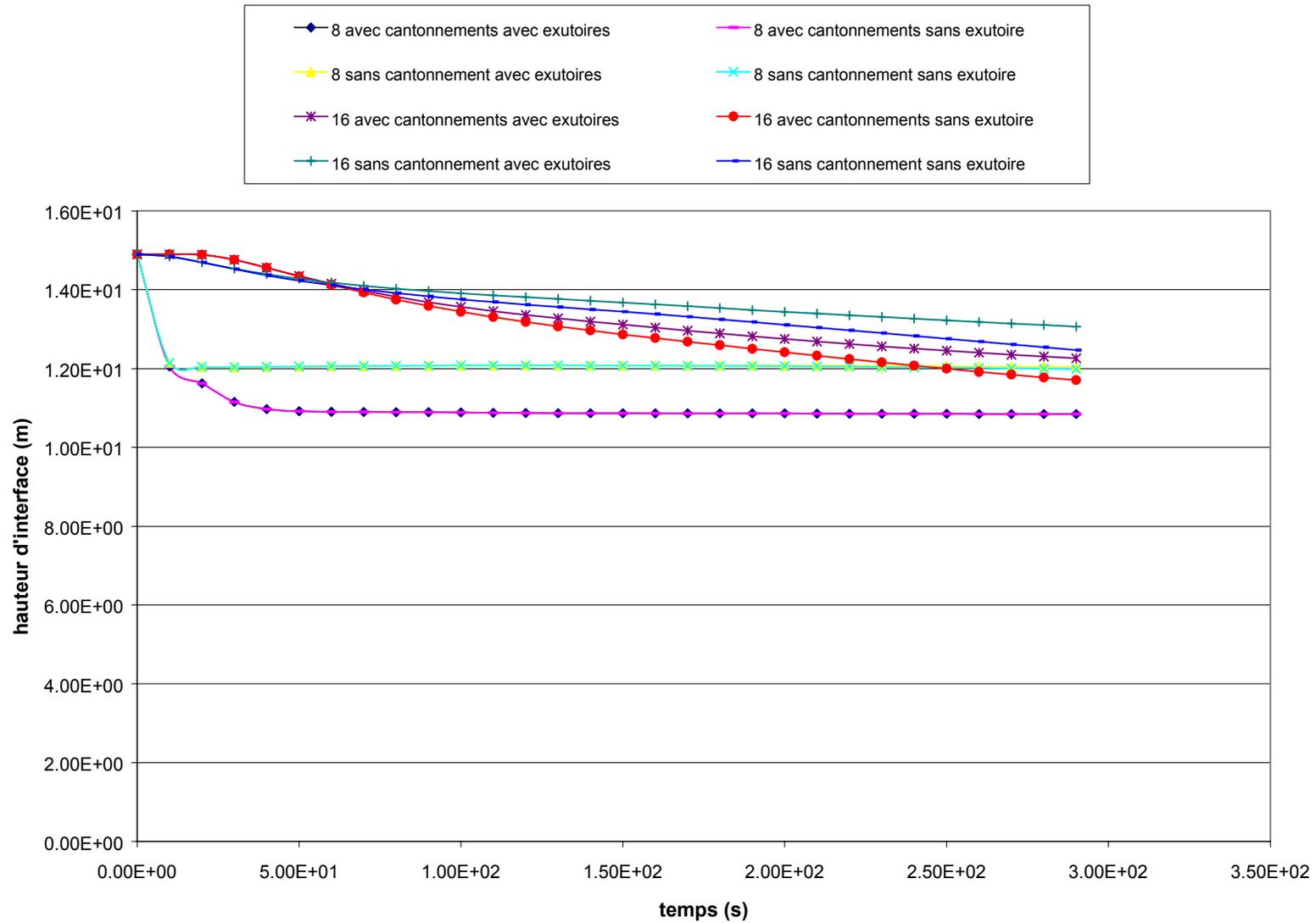
Le présent document forme un ensemble indissociable. Il ne peut être utilisé que de manière intégrale.



ANNEXE A.14 : Influence des exutoires et des cantonnements sur la température



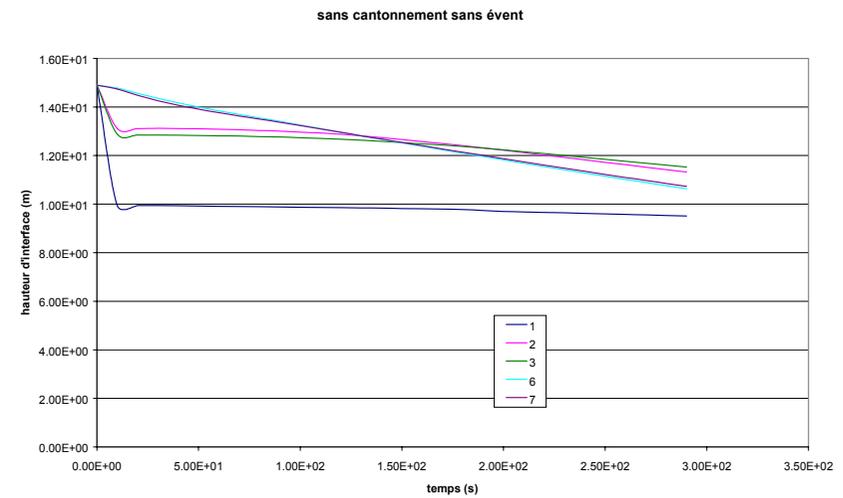
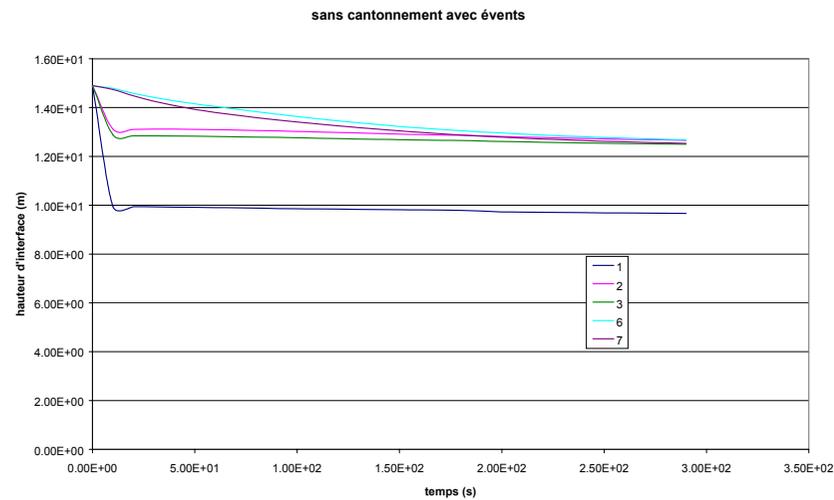
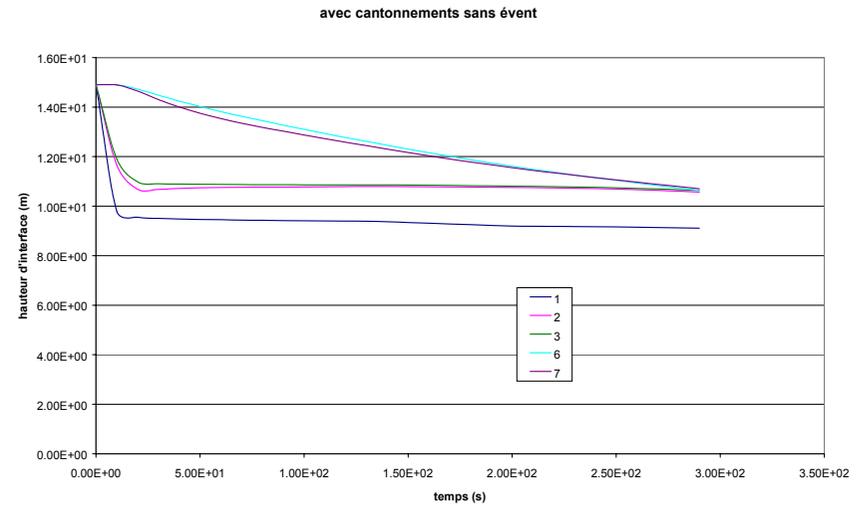
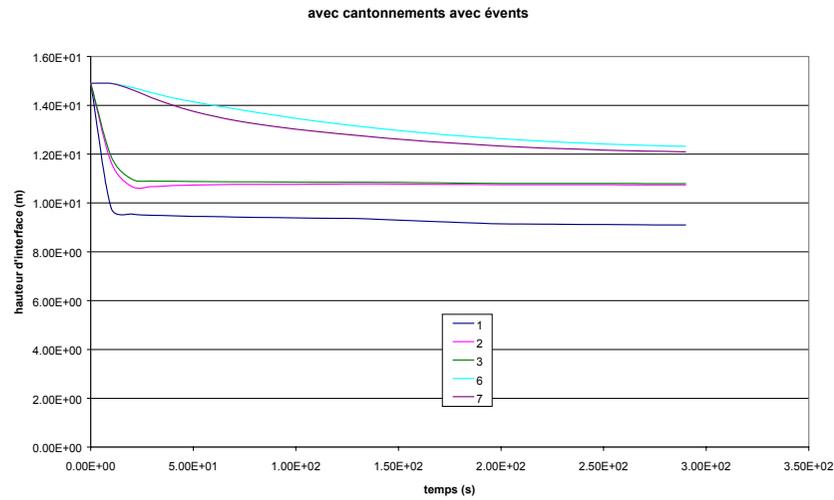
ANNEXE A.15 : Influence des exutoires et des cantonnements sur la hauteur d'interface



ANNEXE A.16 : CALCUL COMPLEMENTAIRE – INFLUENCE DE LA PUISSANCE DU FEU SUR LES RESULTATS

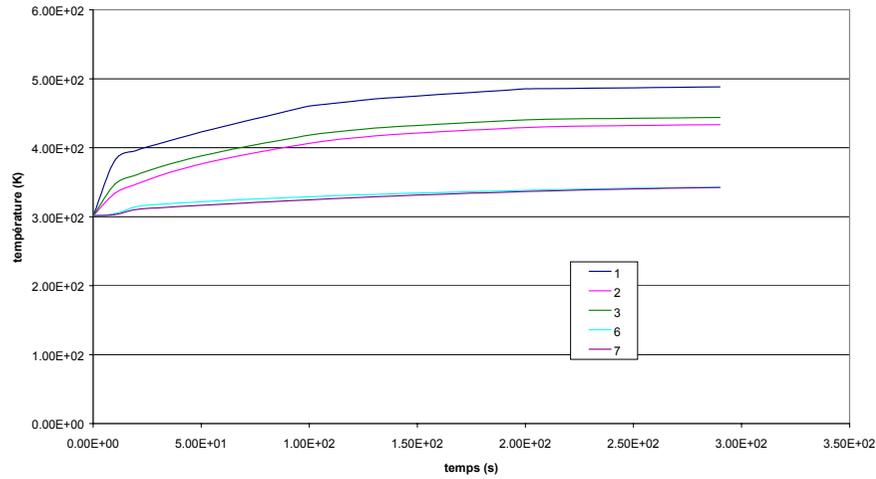
2 $8.15 \times 24.4 \times 14.9$		
3 $2 \times 11.2 \times 14.9$	1 $2 \times 2 \times 14.9$	5 $2 \times 11.2 \times 14.9$
4 $8.15 \times 24.4 \times 14.9$		

ANNEXE A.17 : Influence des exutoires et des cantonnements sur la hauteur d'interface

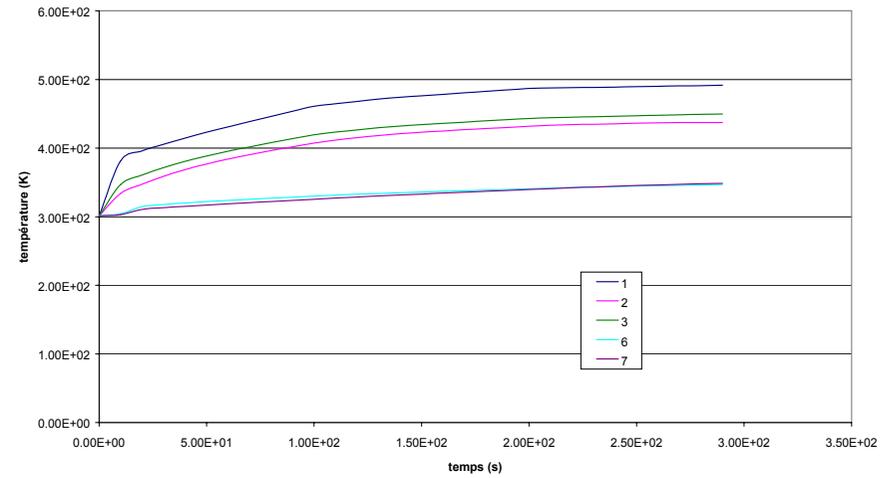


ANNEXE A.18 : Influence des exutoires et des cantonnements sur la température

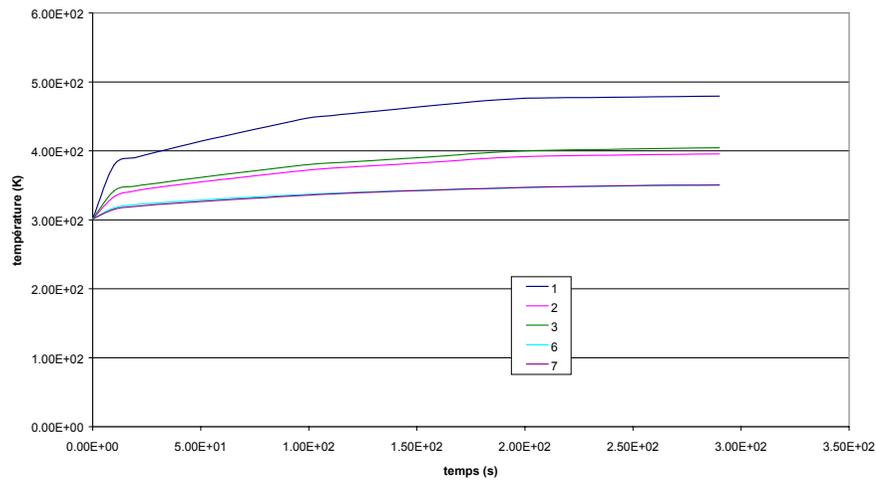
avec cantonnements avec événements



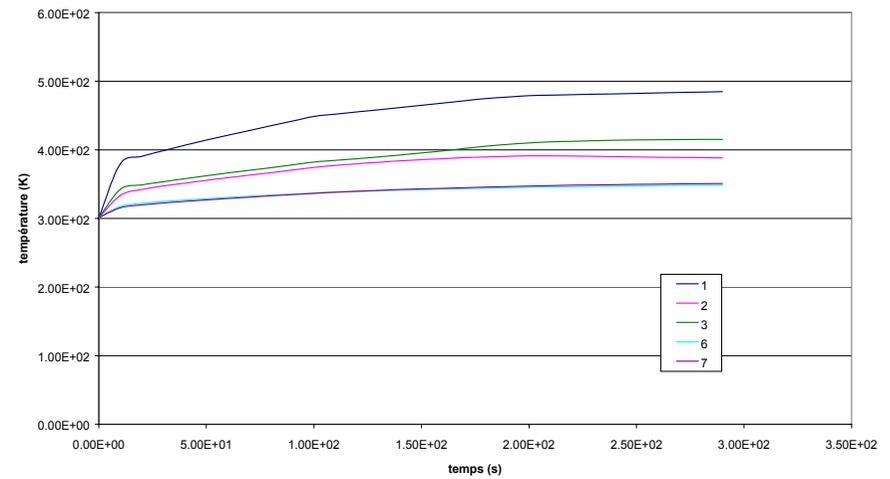
avec cantonnements sans événement



sans cantonnement avec événements



sans cantonnement sans événements



ANNEXE B

SIMULATION DE FEUX DANS UN HANGAR AVEC FDS

Températures du jet de plafond en fonction de la distance au plafond (°C) – feu 1

		Exp	FDS	Exp	FDS	Exp	FDS	Exp	FDS	Exp	FDS
temps (s)	distance au plafond (m)	Nord 6,1m		Sud 6,1m		Ouest 6,1m		Est 6,1m		Est 9,1m	
75	0,15	36±1	34	35±1	36,4	31±1	35,9	34±1	35,9	31±1	33,4
	0,3	36±1	33,6	34±1	35,9	33±1	35,7	34±1	35,5	32±1	33,3
	0,46	33±1	33,2	34±1	35,4	33±1	35,6	34±1	35,2	32±1	33,3
	0,61	34±1	32,5	34±1	34,7	33±1	35,3	34±1	34,8	32±1	33,2
	0,76	33±1	31,9	34±1	34	33±1	35	34±1	34,4	32±1	33,1
150	0,15	37±1	40,2	35±1	39,3	31±1	40	35±1	39,6	31±1	41,5
	0,3	37±1	39,9	34±1	38,8	33±1	39,4	36±1	39,7	32±1	41,3
	0,46	35±1	39,5	34±1	38,1	33±1	38,7	36±1	39,8	32±1	40,9
	0,61	36±1	39	34±1	37,3	33±1	38,1	36±1	39,6	32±1	40,4
	0,76	37±1	38,6	34±1	36,5	33±1	37,4	36±1	39,4	32±1	39,9
225	0,15	37±1	40,5	37±1	43,8	35±1	42,5	36±1	42,2	35±1	40,7
	0,3	37±1	40,4	37±1	43,5	37±1	42,3	37±1	41,9	34±1	40,4
	0,46	35±1	40,4	37±1	43,1	38±1	42	37±1	41,6	35±1	40,1
	0,61	37±1	40,1	37±1	42,4	37±1	41,6	37±1	41,1	36±1	39,6
	0,76	36±1	39,9	37±1	41,8	37±1	41,1	37±1	40,6	36±1	39,1

Températures radiales (°C) - feu 1

Températures radiales à 75secondes

distance au centre de la source (m)	1,5	3	6,1	8,5	9,1	11,6
Expérience Nord-Sud	38±2	37±2	36±2	33±2	x	x
Expérience Est-Ouest	37±2	35±2	32±2	31±2	31±2	30±2
FDS Nord-Sud	37,5	38,8	33,6	31,2	x	X
FDS Est-Ouest	40	40,6	35,5	32,3	32,2	32,6

Températures radiales à 150 secondes

distance au centre de la source (m)	1,5	3	6,1	8,5	9,1	11,6
Expérience Nord-Sud	38±2	38±2	36±2	36±2	x	x
Expérience Est-Ouest	39±2	38±	34±2	33±2	33±2	30±2
FDS Nord-Sud	44,5	41,9	39,9	35,6	x	X
FDS Est-Ouest	45,6	43,4	39,7	37,4	37,2	36,9

Températures radiales à 225 secondes

distance au centre de la source (m)	1,5	3	6,1	8,5	9,1	11,6
Expérience Nord-Sud	40±2	40±2	37±2	36±2	x	x
Expérience Est-Ouest	41±2	39±2	36±2	35±2	35±2	32±2
FDS Nord-Sud	44,2	39,4	40,4	34,6	x	x
FDS Est-Ouest	47,6	42,7	41,9	37,3	37,3	37,3

Températures du jet de plafond en fonction de la distance au plafond (°C) – feu 2

		Exp	FDS	Exp	FDS	Exp	FDS	Exp	FDS	Exp	FDS
temps (s)	distance au plafond (m)	Nord 6,1m		Sud 6,1m		Ouest 6,1m		Est 6,1m		Est 9,1m	
75	0.15	43±1	51.9	46±1	54.4	39±1	54.4	52±1	50.2	41±1	54.6
	0.3	44±1	52.2	49±1	53.9	45±1	54.2	51±1	50.2	42±1	53.8
	0.46	44±1	52.4	49±1	53.2	46±1	53.9	52±1	50.2	43±1	53.0
	0.61	46±1	51.6	49±1	51.6	45±1	53.1	54±1	50.1	43±1	52.3
	0.76	47±1	50.7	47±1	50.0	46±1	52.3	54±1	50.0	42±1	51.6
150	0.15	51±1	66.3	51±1	61.6	47±1	69.8	61±1	59.4	52±1	61.9
	0.3	50±1	64.2	57±1	60.8	53±1	67.6	61±1	58.6	51±1	61.3
	0.46	50±1	61.8	58±1	60.0	54±1	65.3	60±1	57.5	52±1	60.7
	0.61	52±1	58.5	57±1	59.3	55±1	62.5	59±1	55.6	54±1	59.9
	0.76	56±1	55.3	57±1	58.6	54±1	59.7	57±1	53.7	54±1	59.2
225	0.15	52±1	61.8	56±1	61.0	50±1	62.7	63±1	64.2	55±1	64.8
	0.3	52±1	60.5	62±1	61.2	57±1	61.7	63±1	63.1	55±1	63.7
	0.46	52±1	59.1	63±1	61.2	58±1	60.6	61±1	61.9	57±1	62.4
	0.61	55±1	57.5	63±1	59.5	58±1	59.0	60±1	60.1	57±1	61.8
	0.76	58±1	55.9	62±1	57.8	59±1	57.5	58±1	58.3	55±1	61.0

Températures radiales (°C) – feu 2

Températures radiales à 75 secondes

distance au centre de la source (m)	1.5	3	6.1	8.5	9.1	11.6
Expérience Nord-Sud	62±2	56±2	44±2	44±2	x	x
Expérience Est-Ouest	64±2	56±3	44±4	40±2	38±2	30±2
FDS Nord-Sud	76.4	60.2	52.2	41.5	x	x
FDS Est-Ouest	61.9	52.7	50.2	49.8	47.2	48.2

Températures radiales à 150 secondes

distance au centre de la source (m)	1.5	3	6.1	8.5	9.1	11.6
Expérience Nord-Sud	68±3	64±2	55±2	52±2	x	x
Expérience Est-Ouest	67±4	63±4	54±5	50±2	49±2	40±2
FDS Nord-Sud	72.2	65.4	64.1	45.0	x	x
FDS Est-Ouest	65.4	61.6	58.5	54.8	56.6	55.3

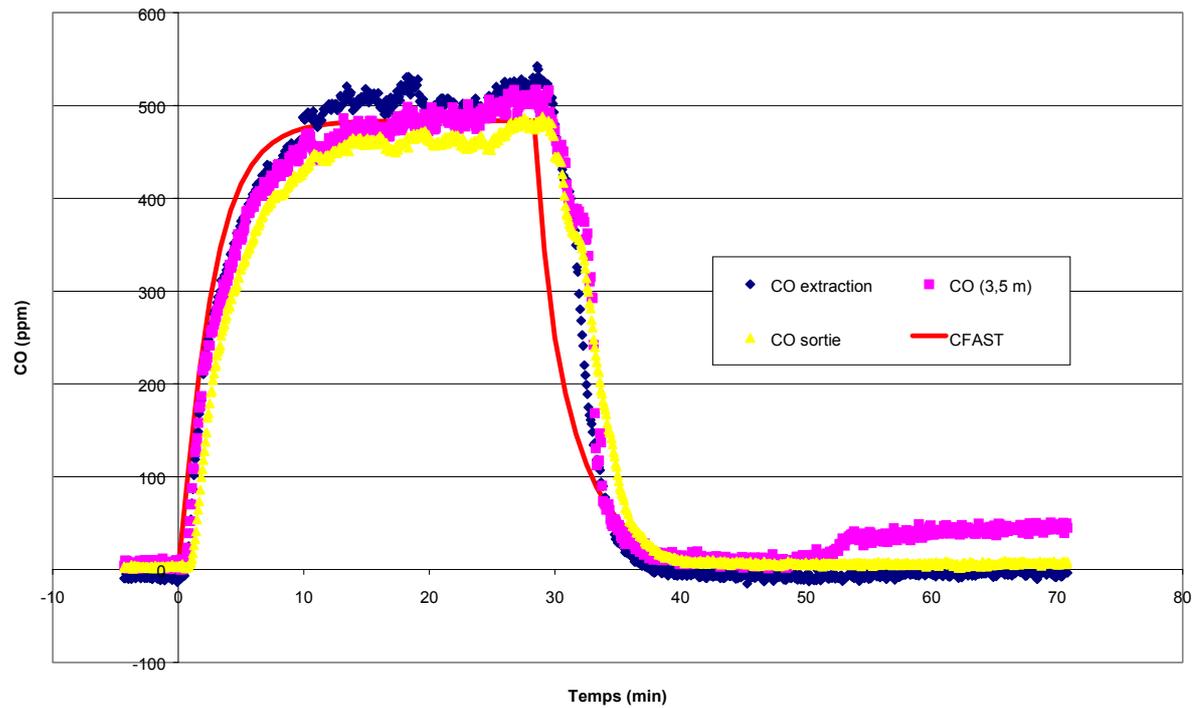
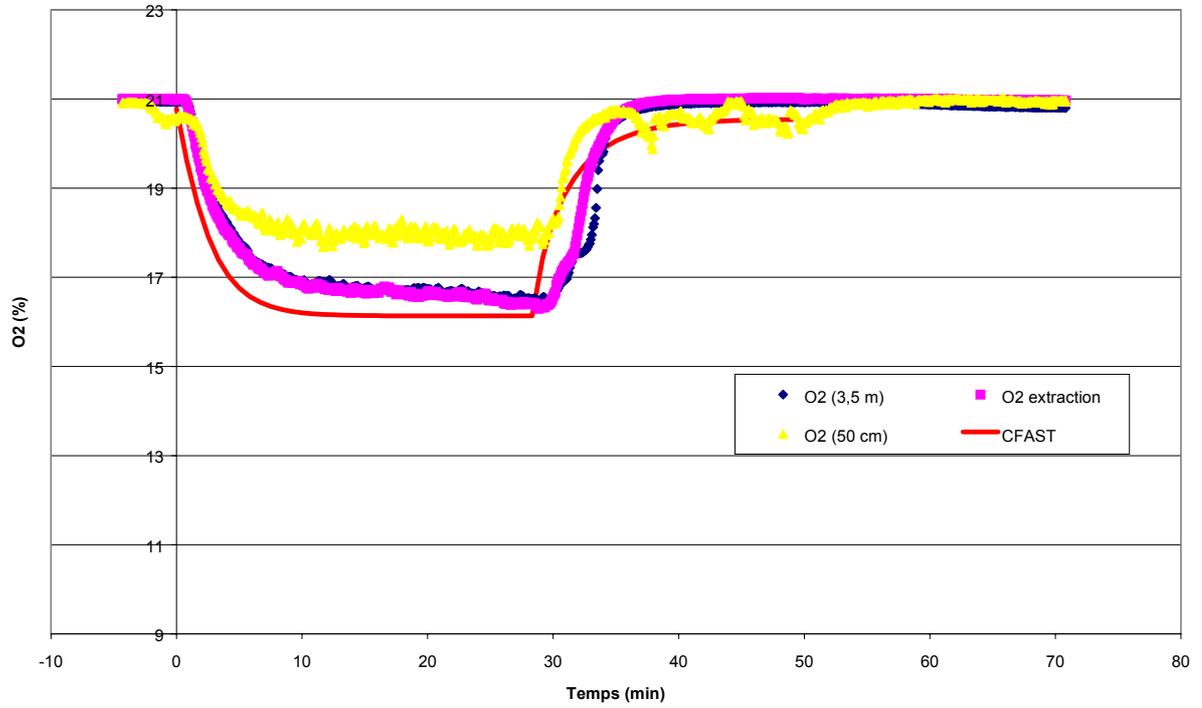
Températures radiales à 225 secondes

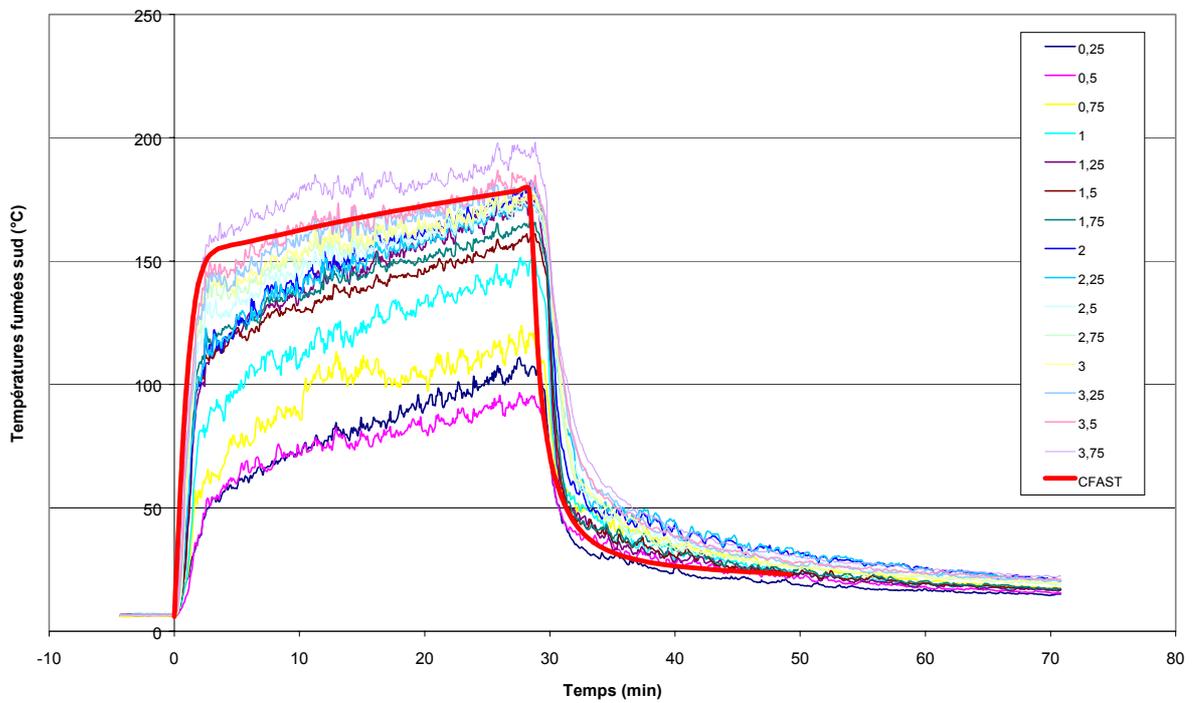
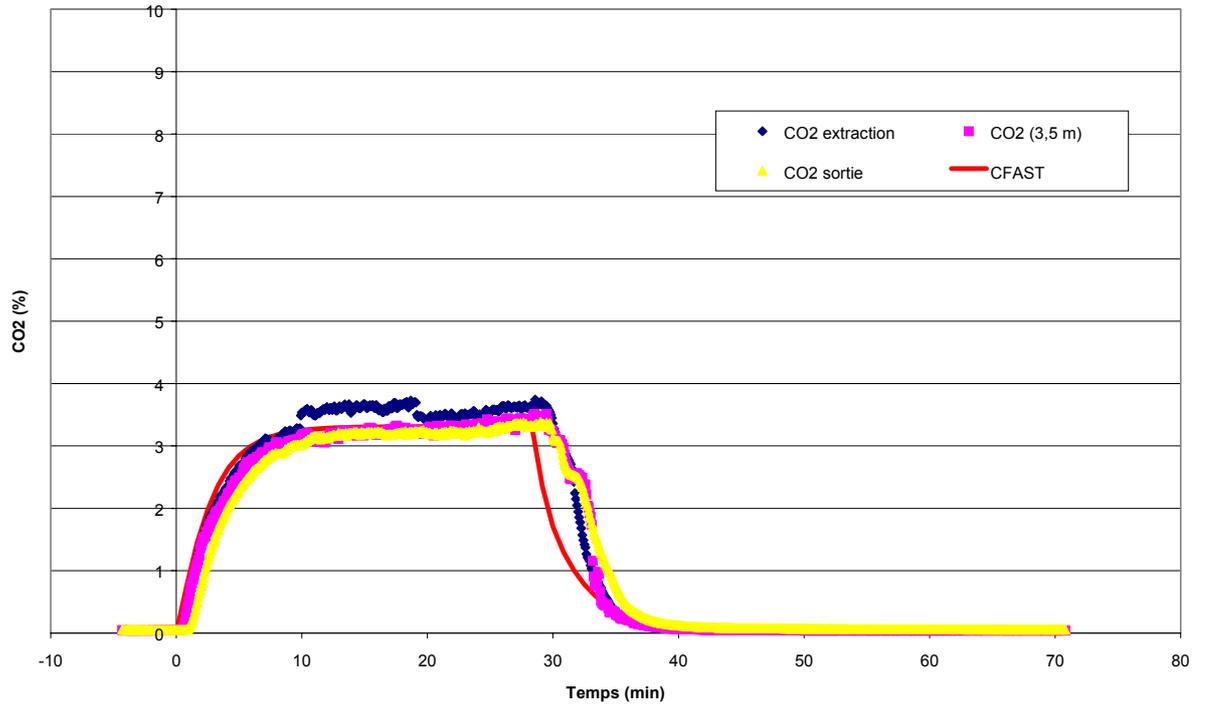
distance au centre de la source (m)	1.5	3	6.1	8.5	9.1	11.6
Expérience Nord-Sud	67±4	64±2	56±2	54±2	x	x
Expérience Est-Ouest	66±2	62±3	58±2	54±2	52±2	41±3
FDS Nord-Sud	69.9	66.4	60.4	44.4	x	x
FDS Est-Ouest	84.9	67.3	63.0	56.4	56.4	57.2

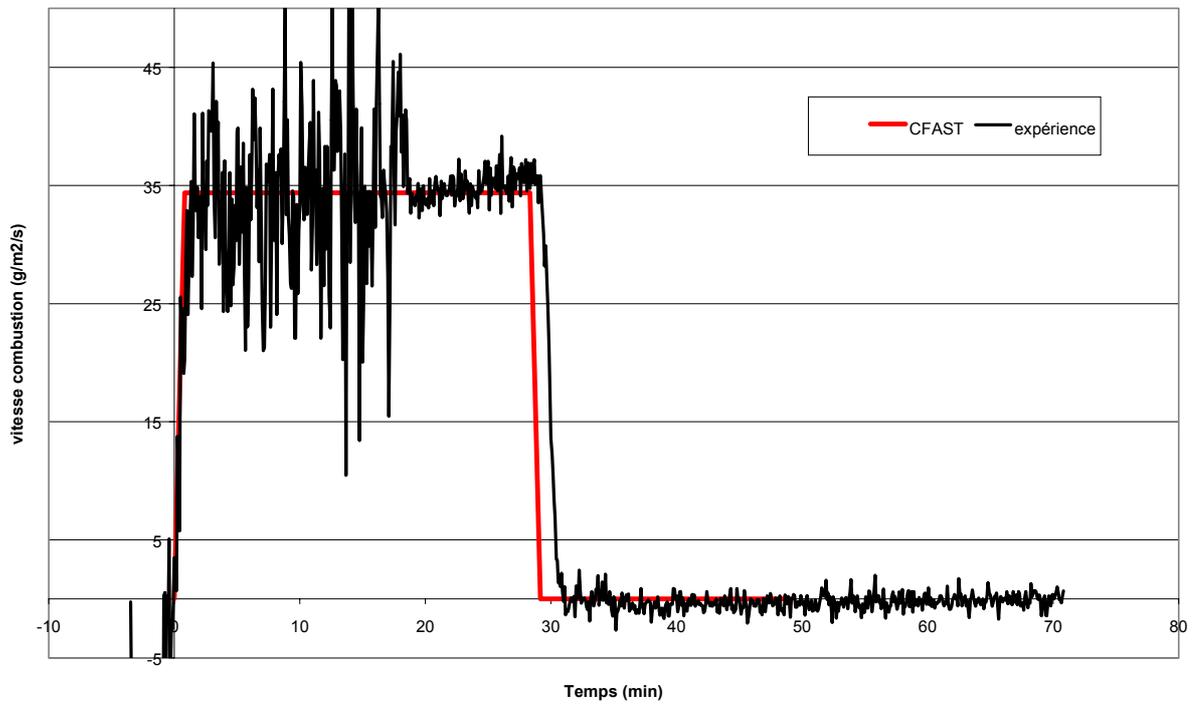
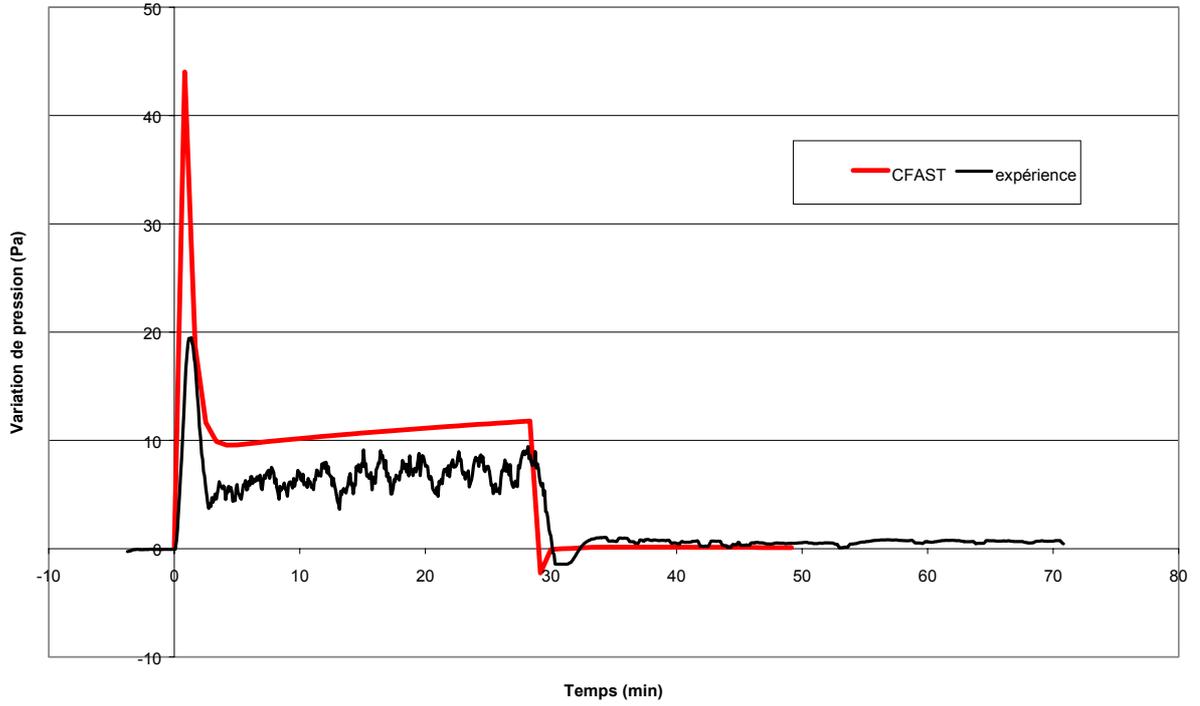
ANNEXE C

SIMULATION DE ESSAIS PYRIDINE DANS LA CHAMBRE 80 m³ avec CFAST

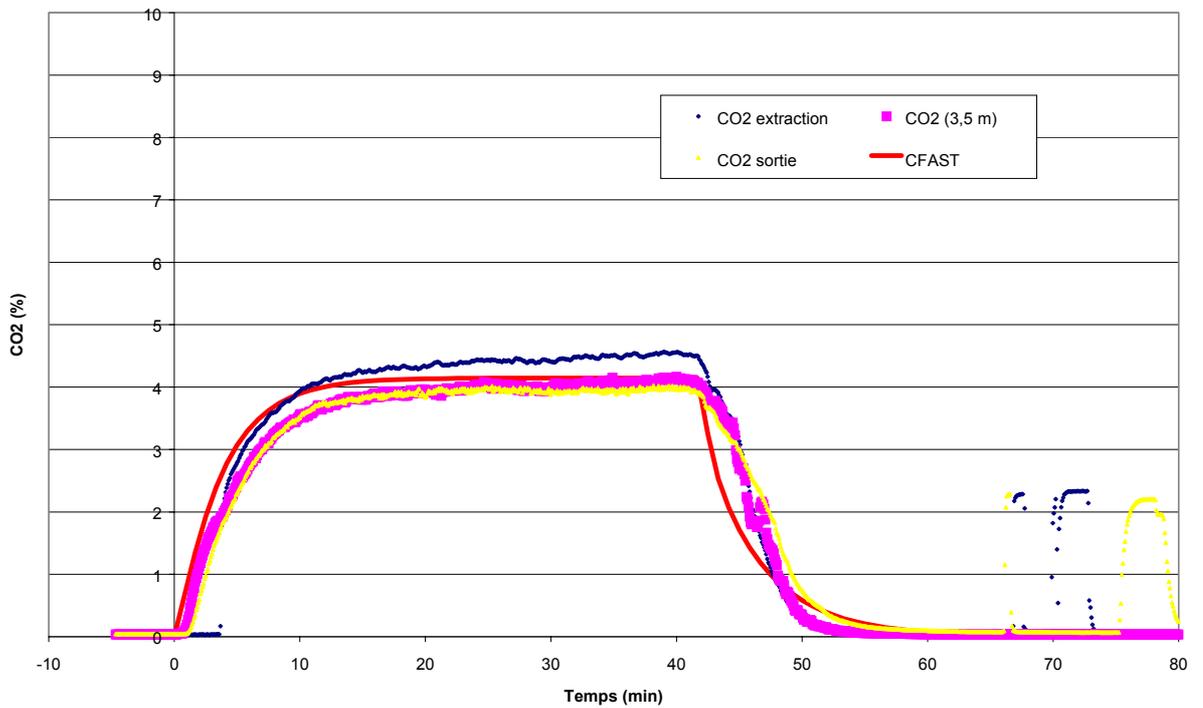
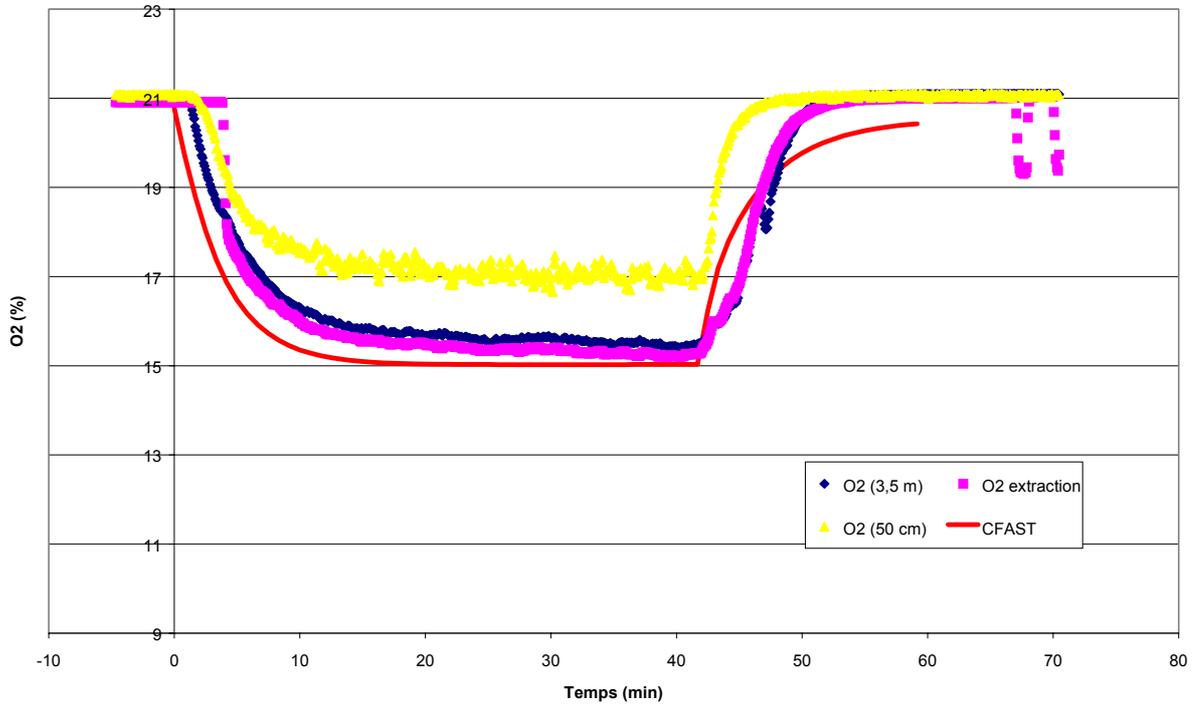
DEBIT DE VENTILATION 1300 Nm³/h

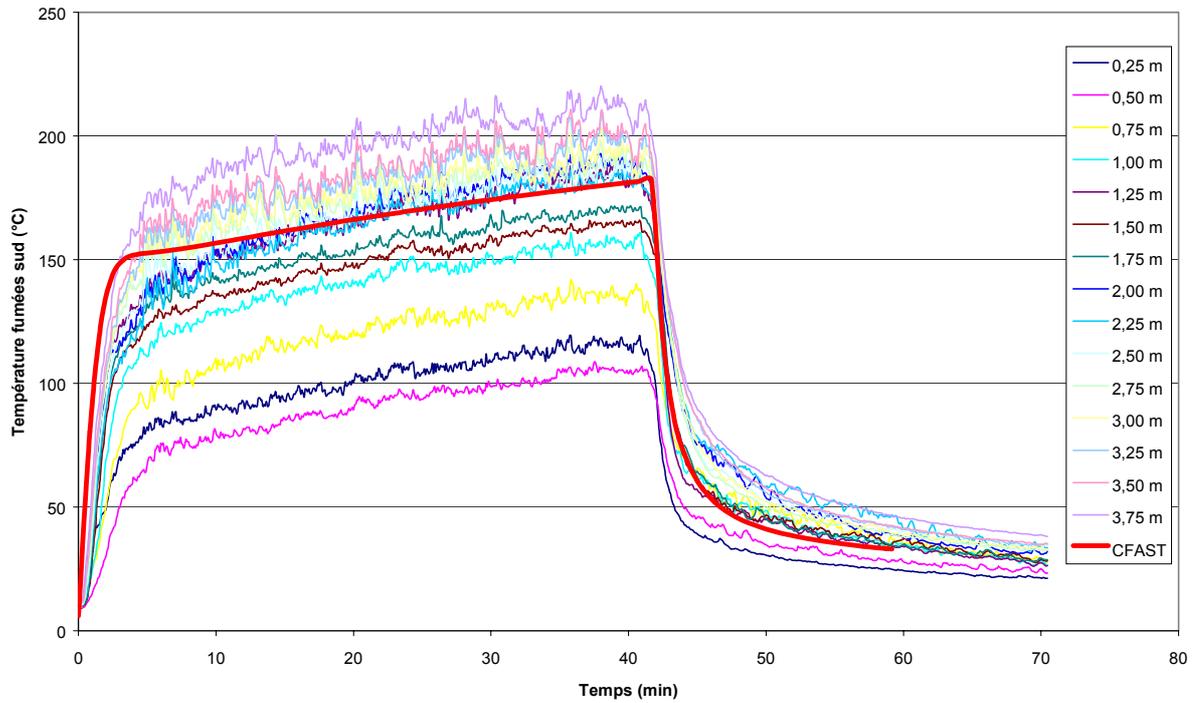
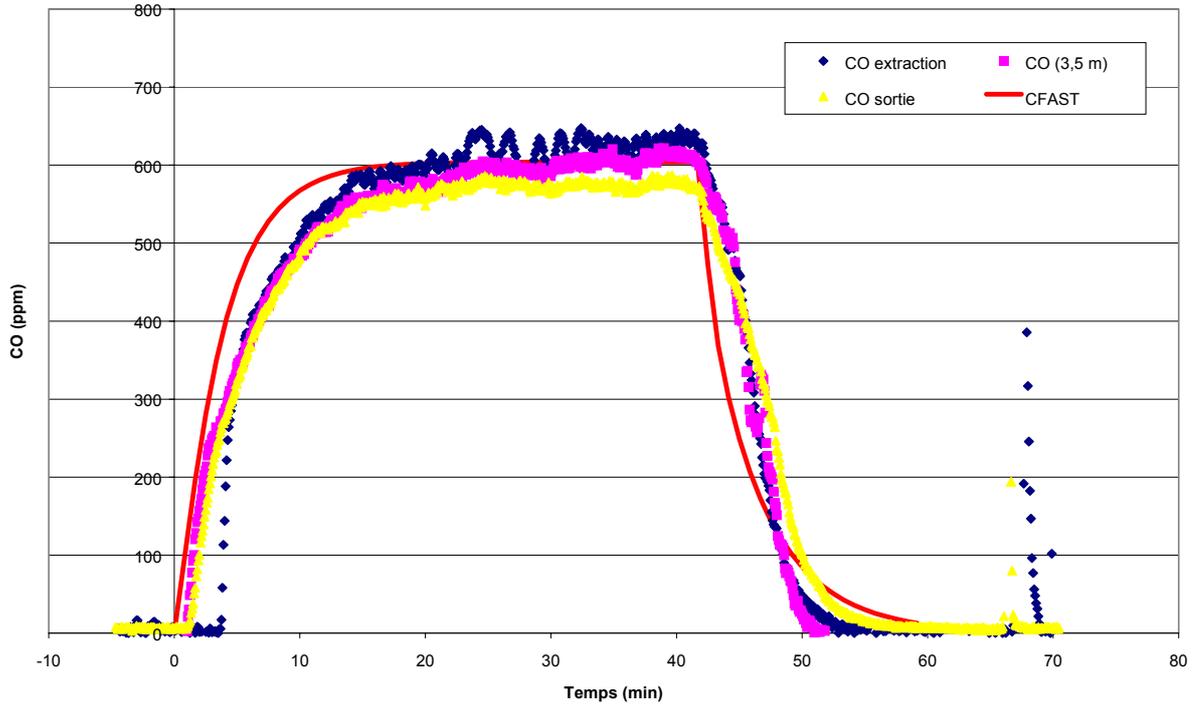


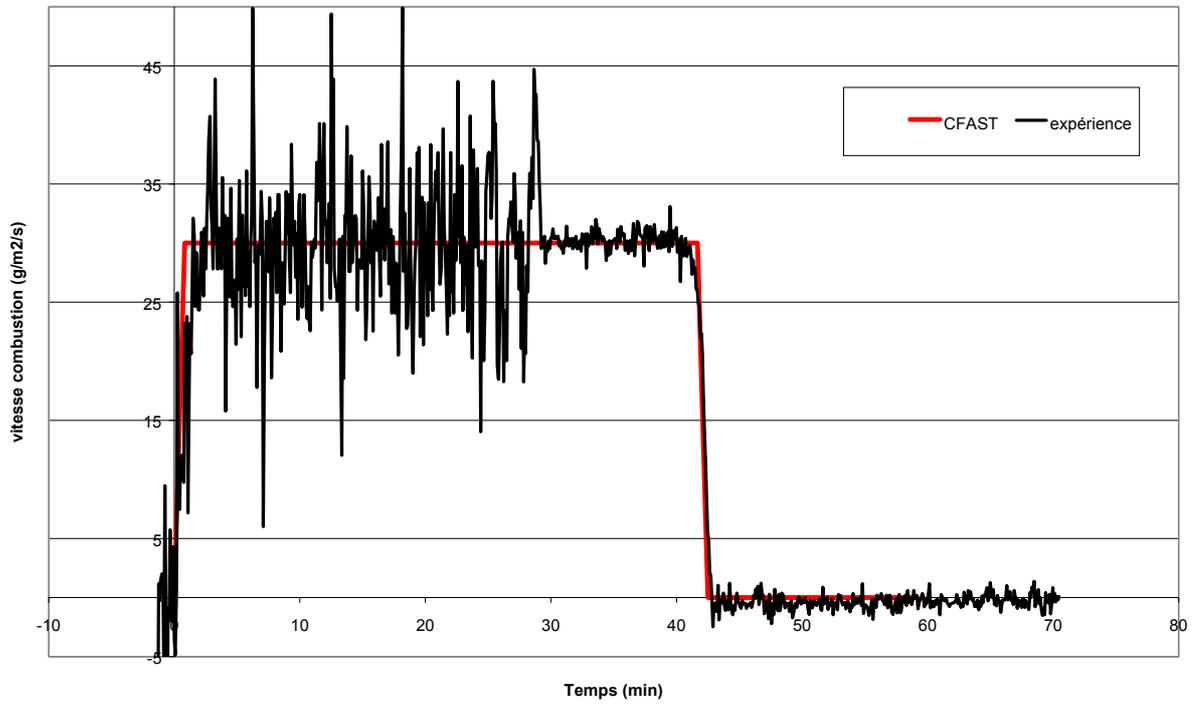
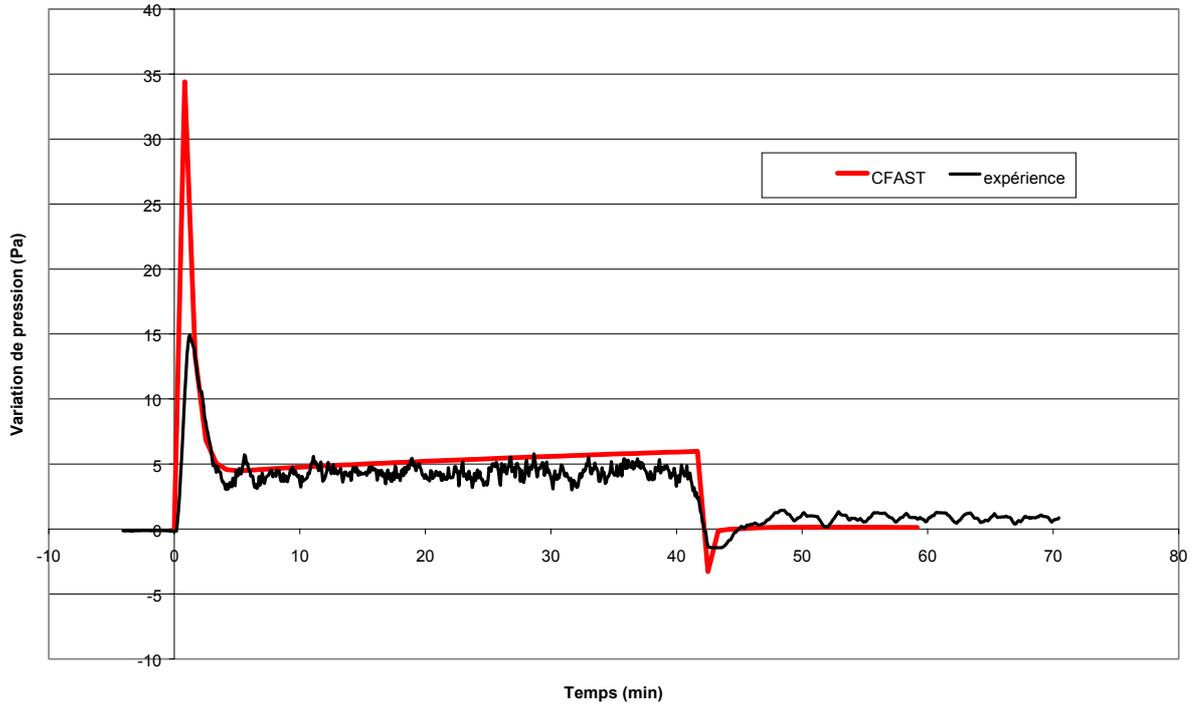




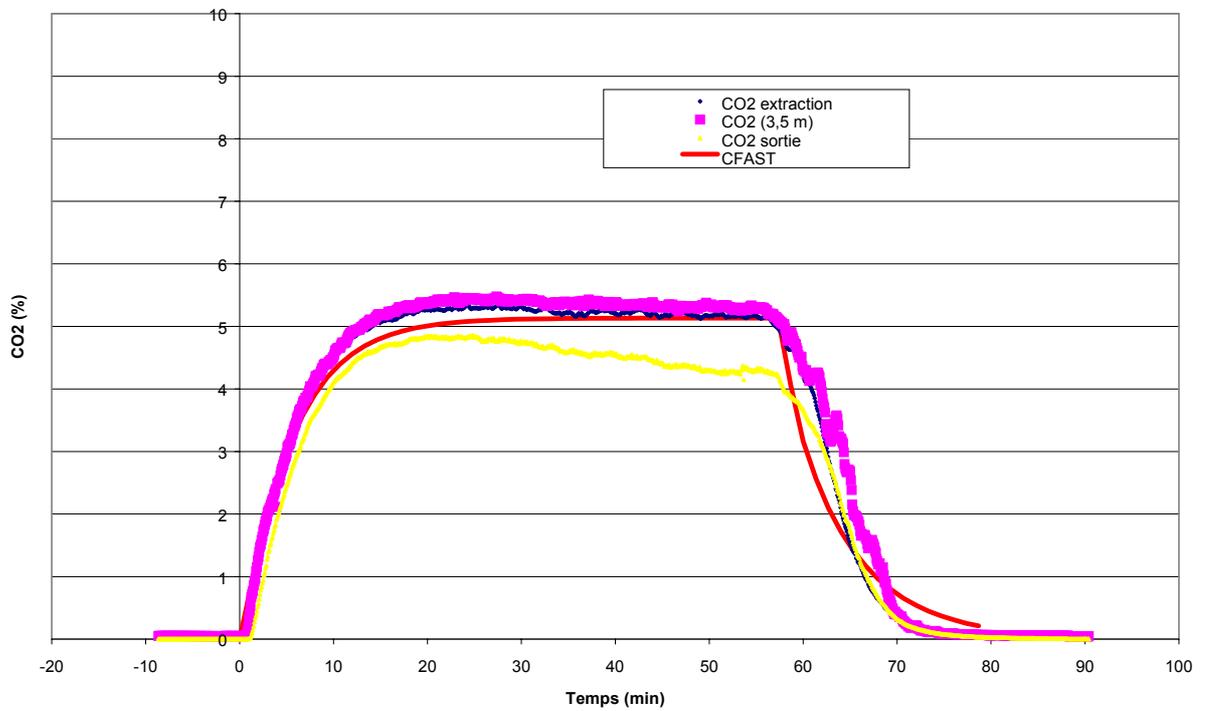
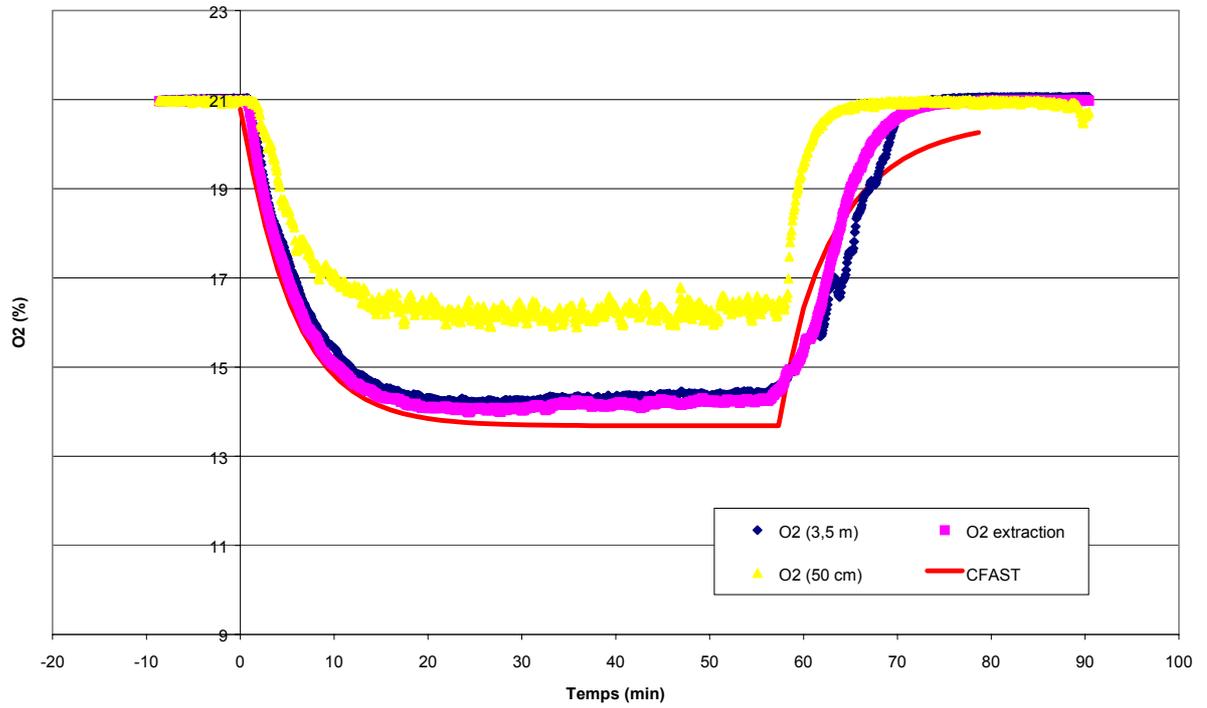
DEBIT DE VENTILATION 900 Nm³/h

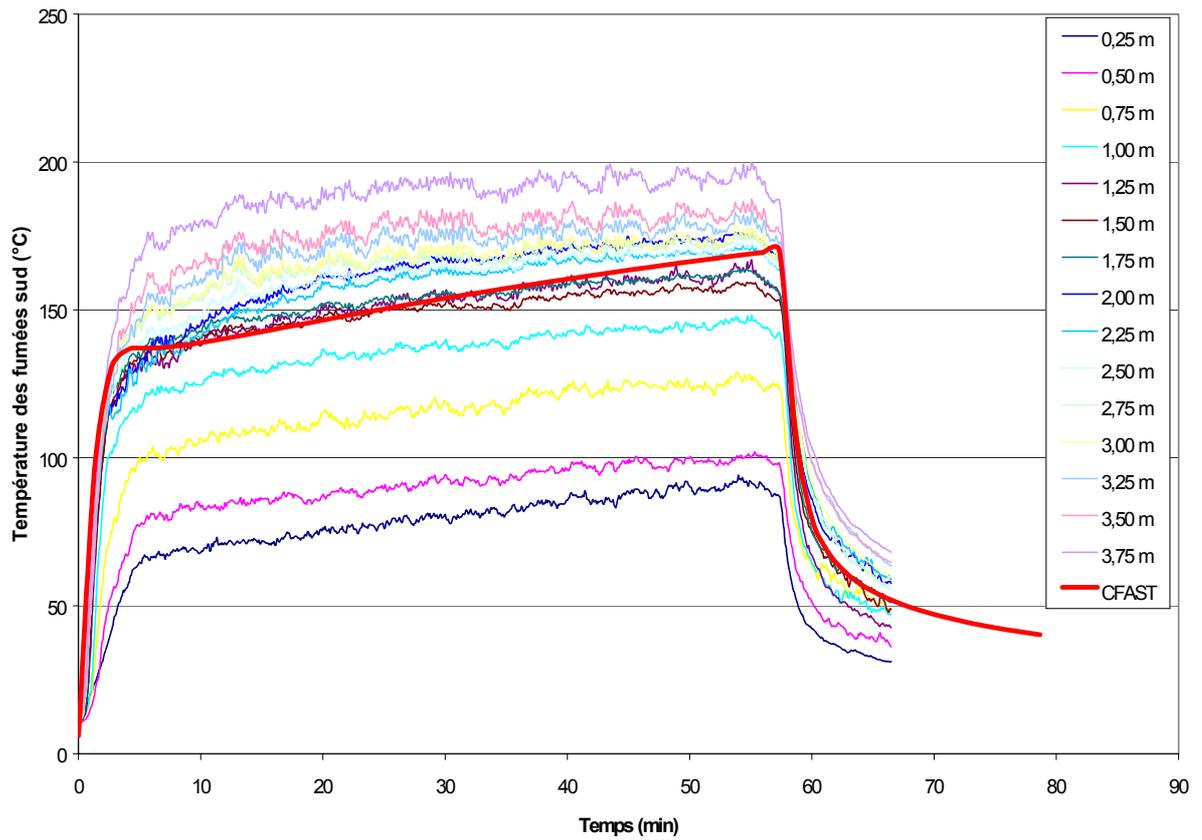
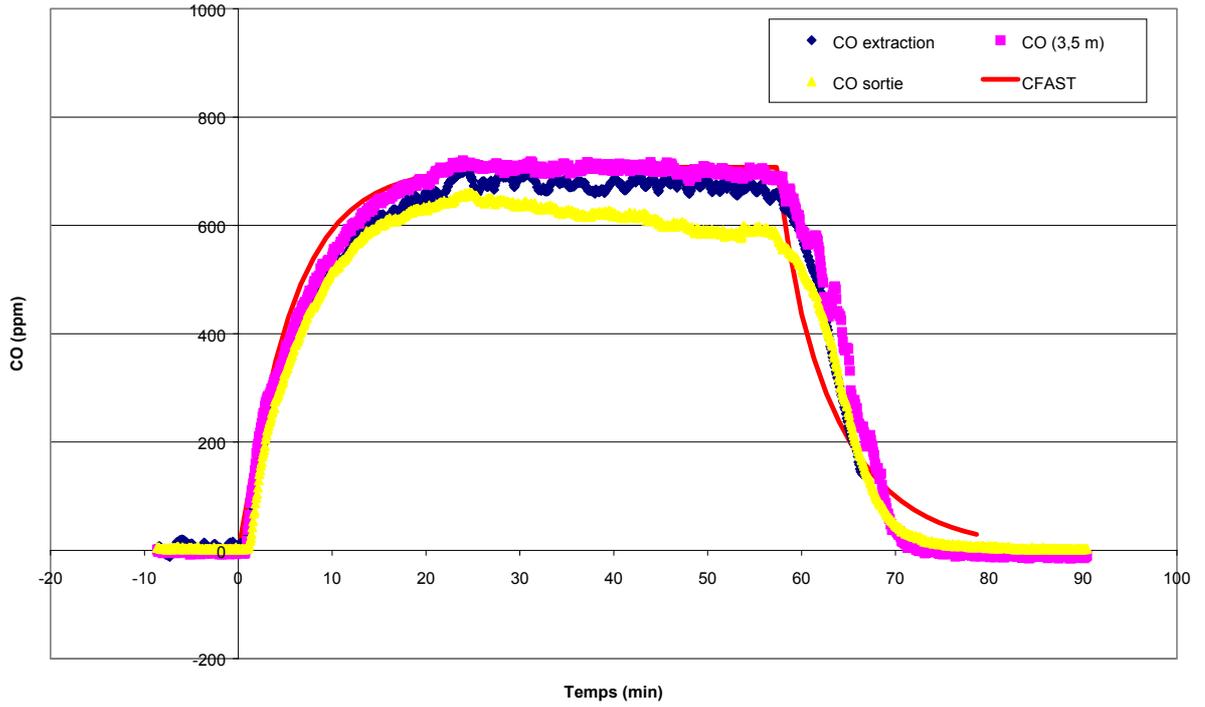


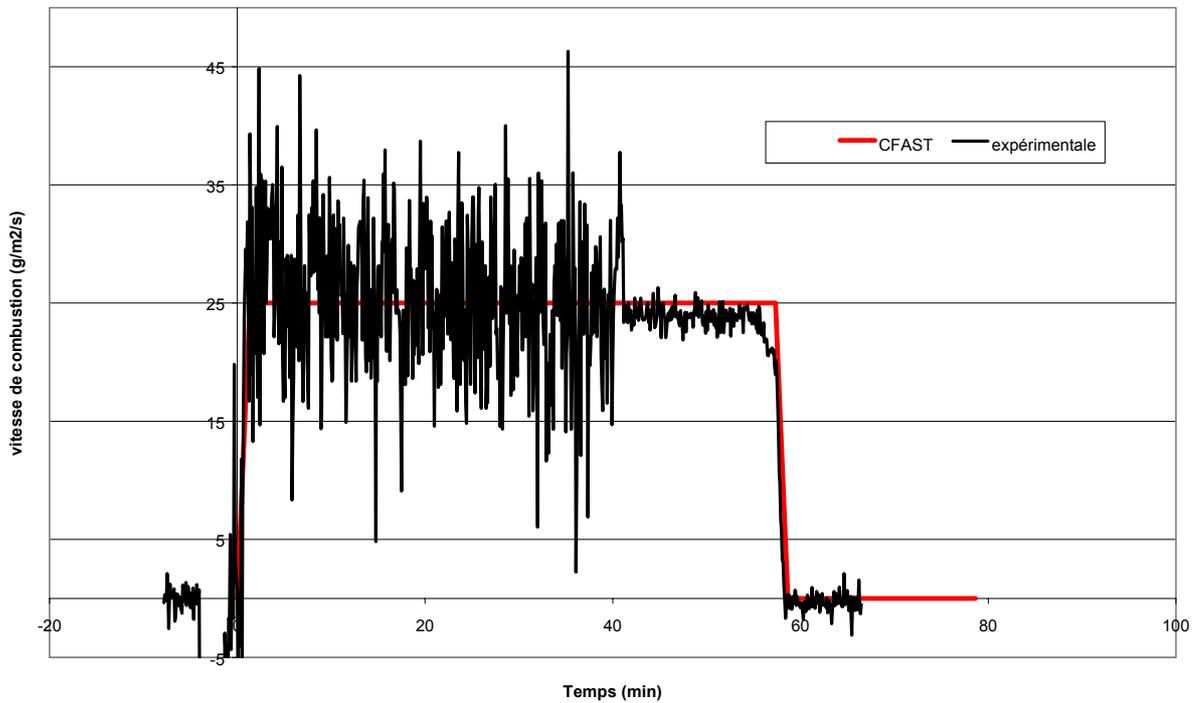
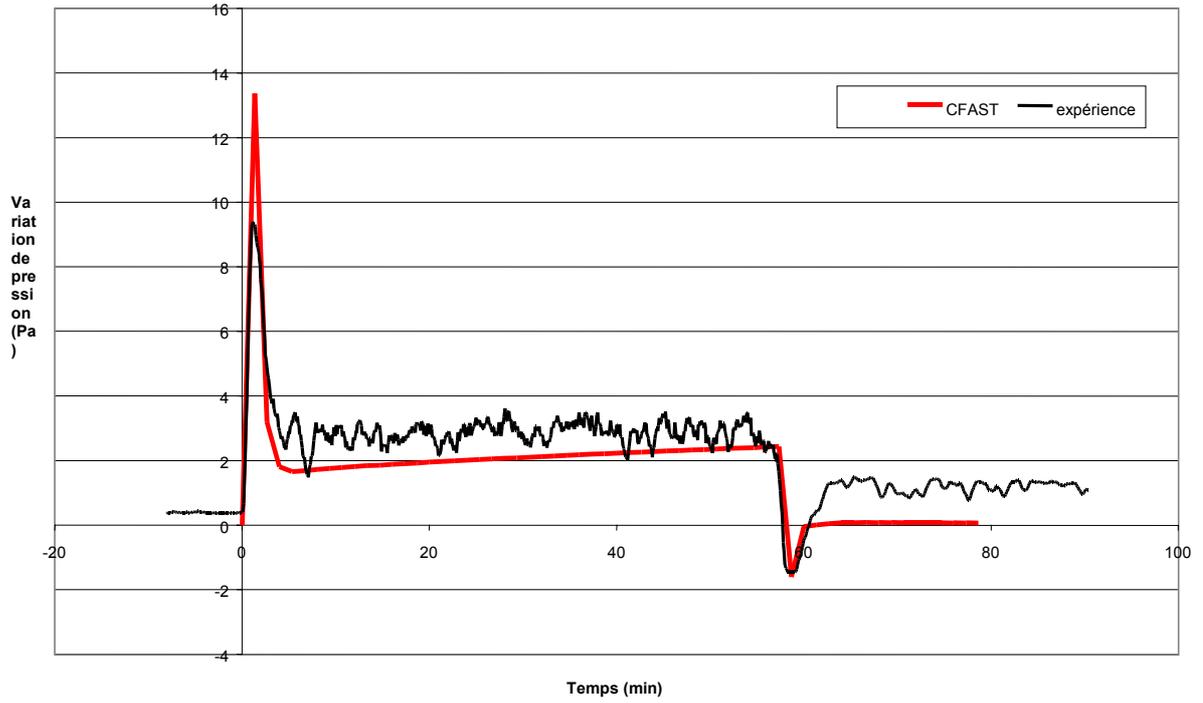




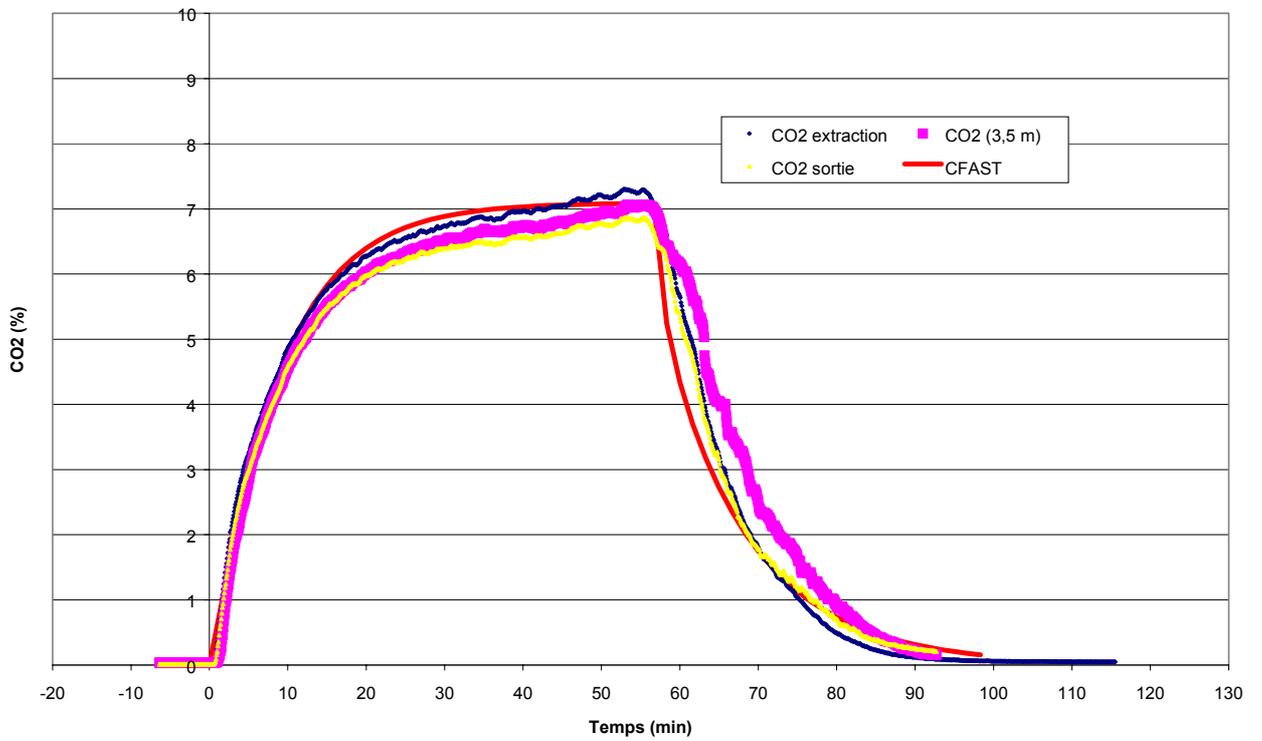
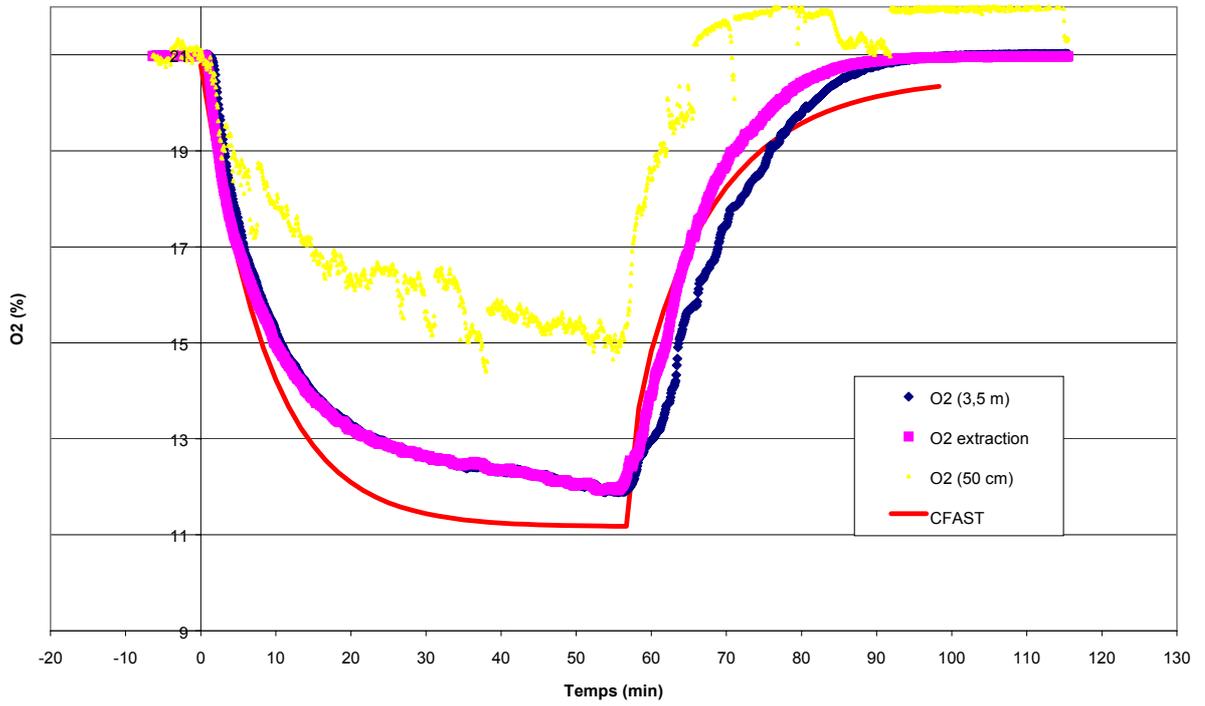
DEBIT DE VENTILATION 600 Nm³/h

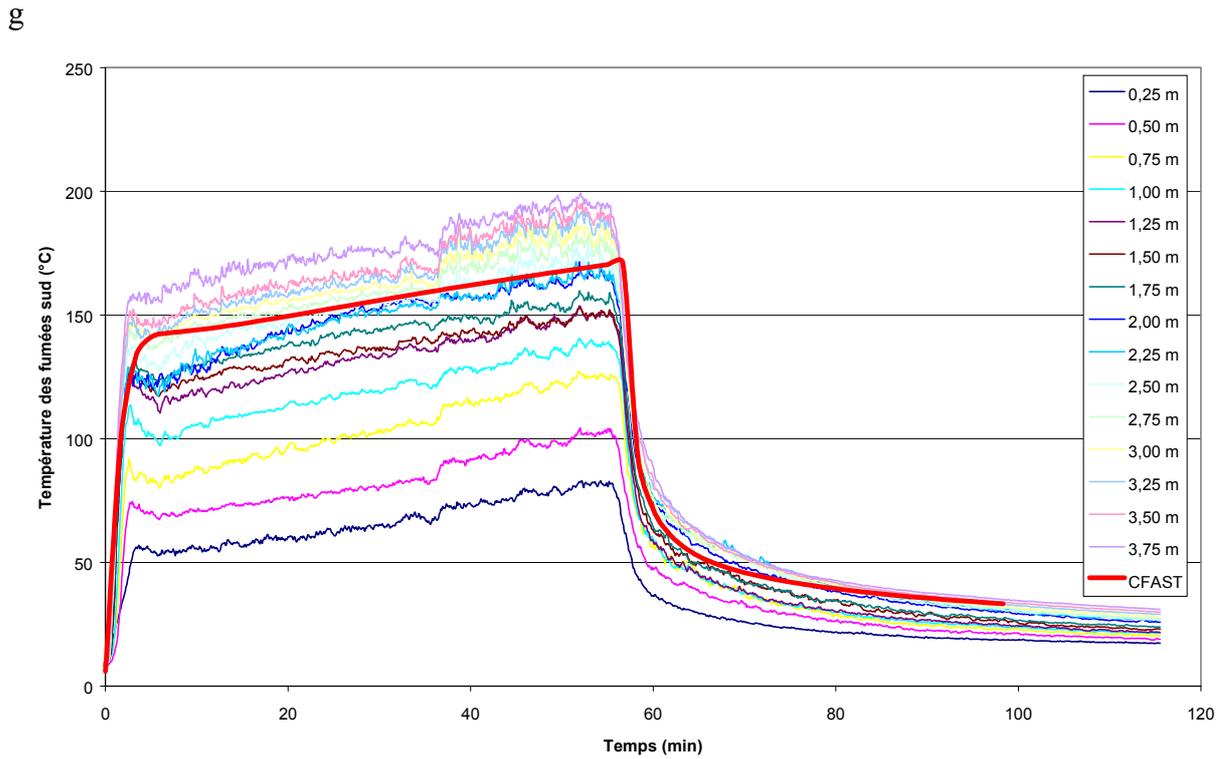
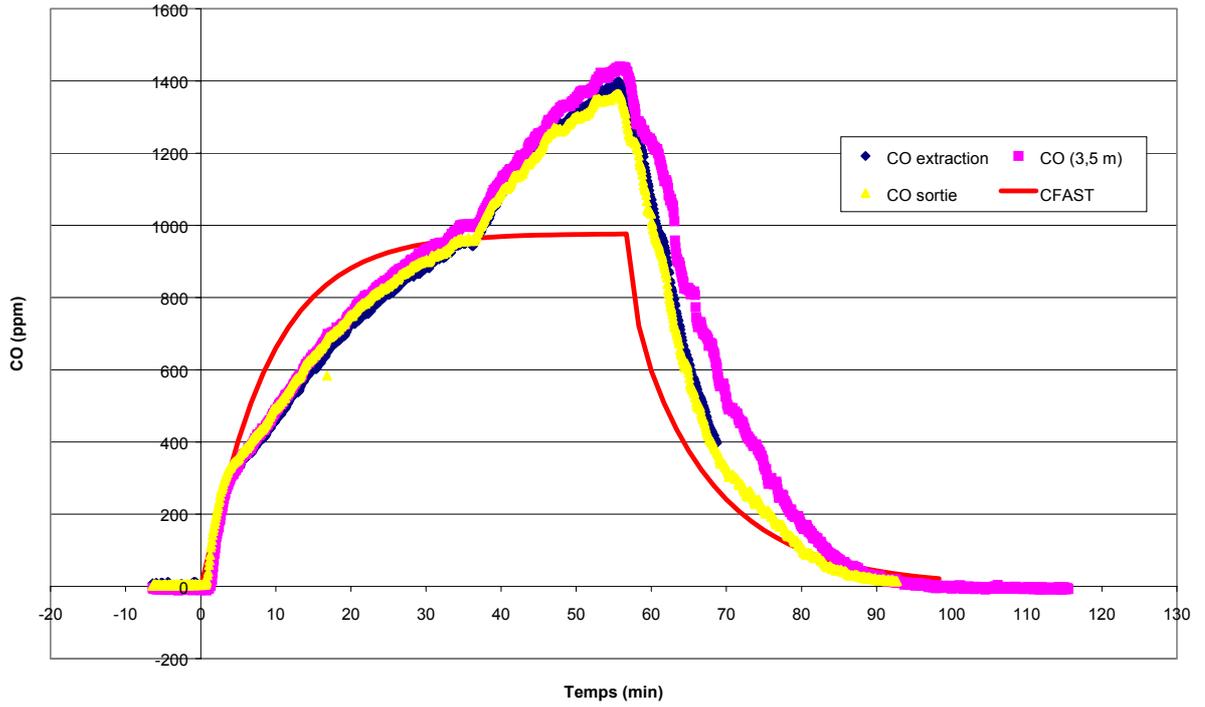


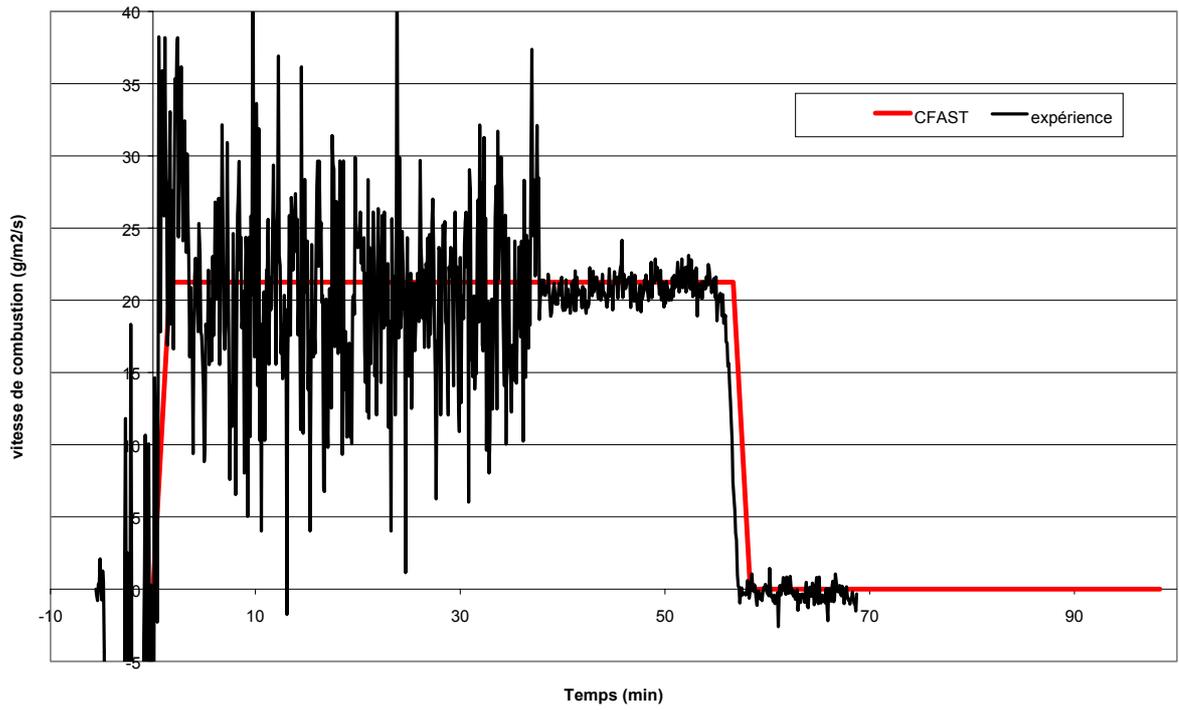
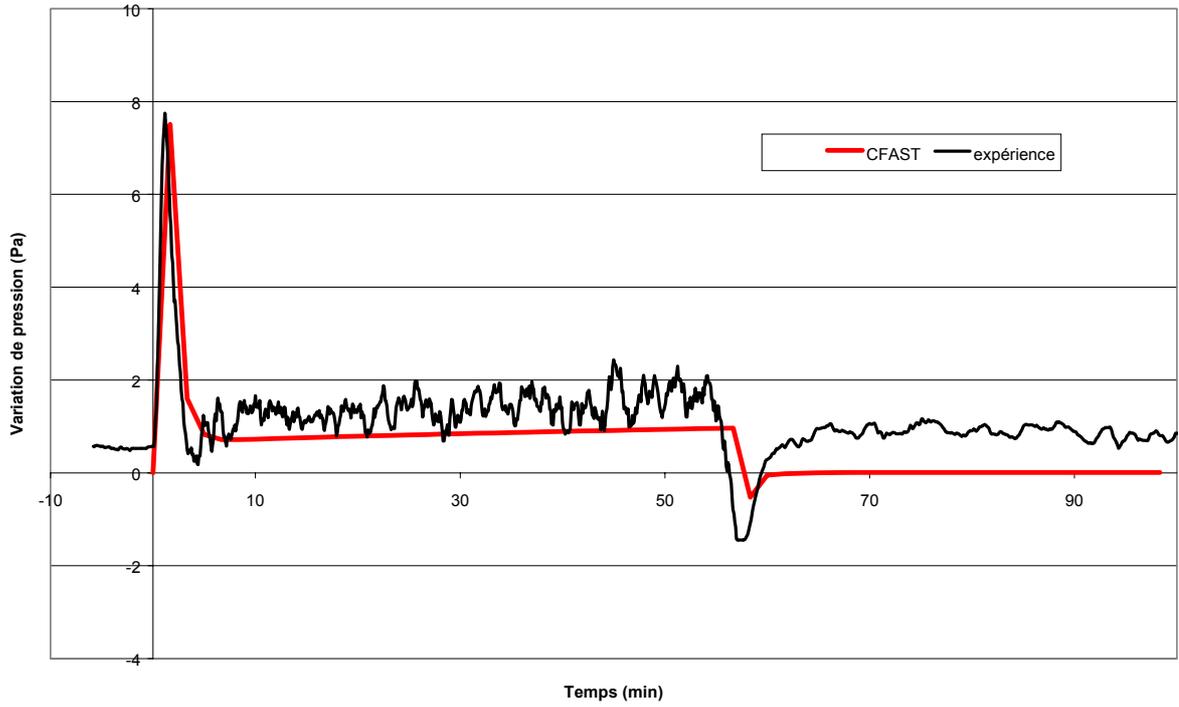




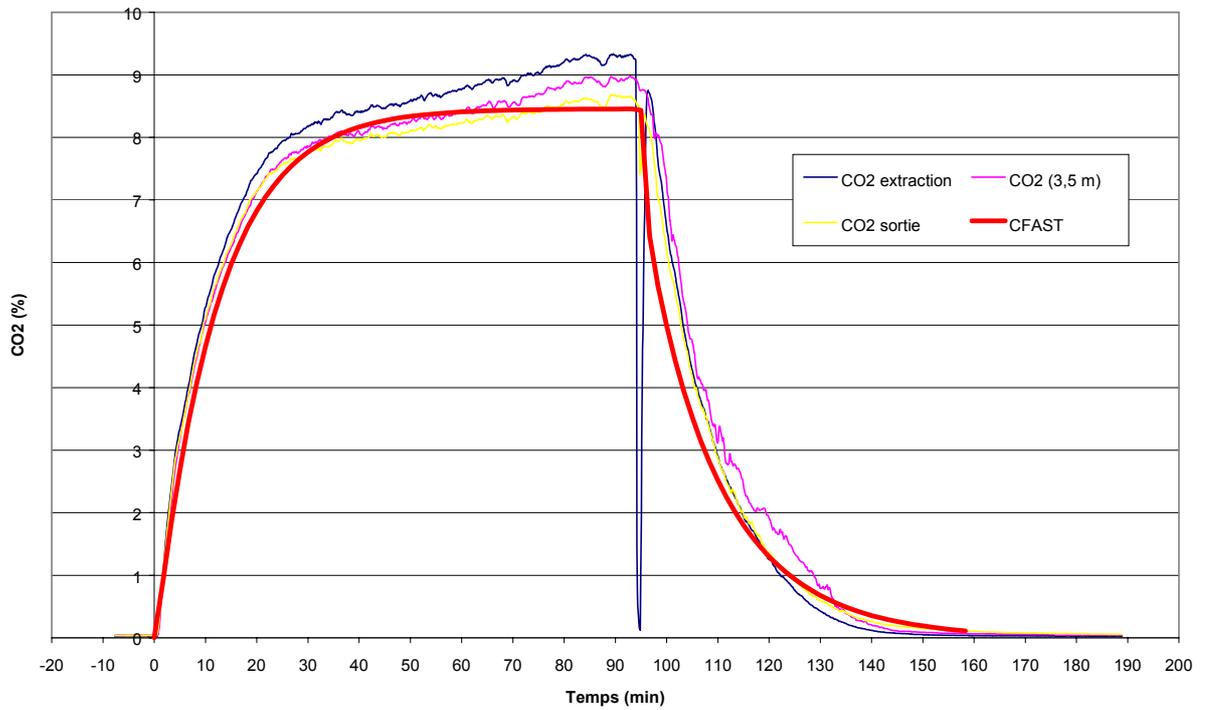
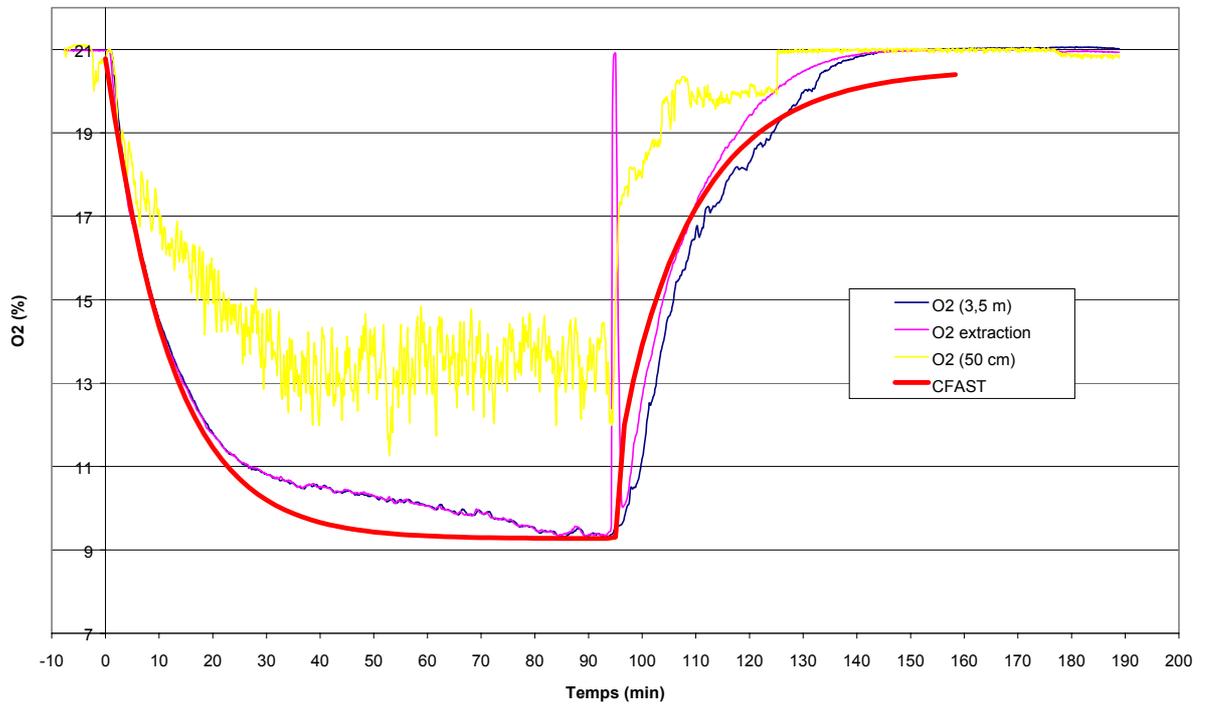
DEBIT DE VENTILATION 370 Nm³/h

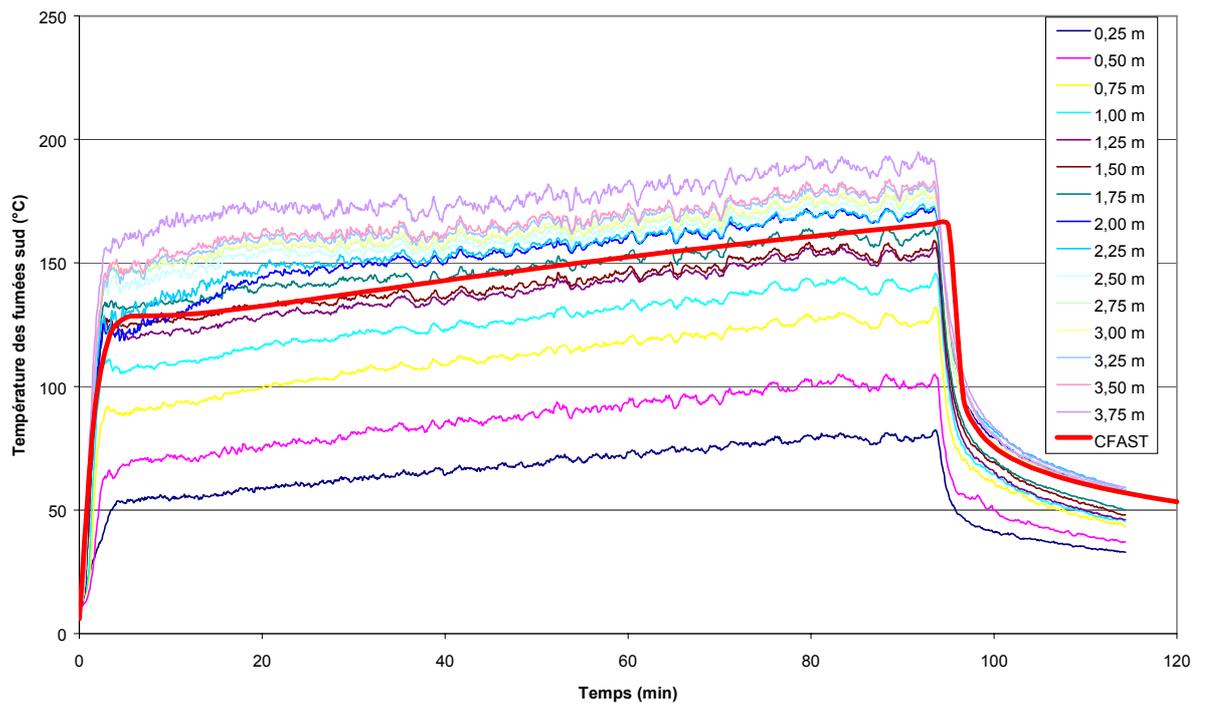
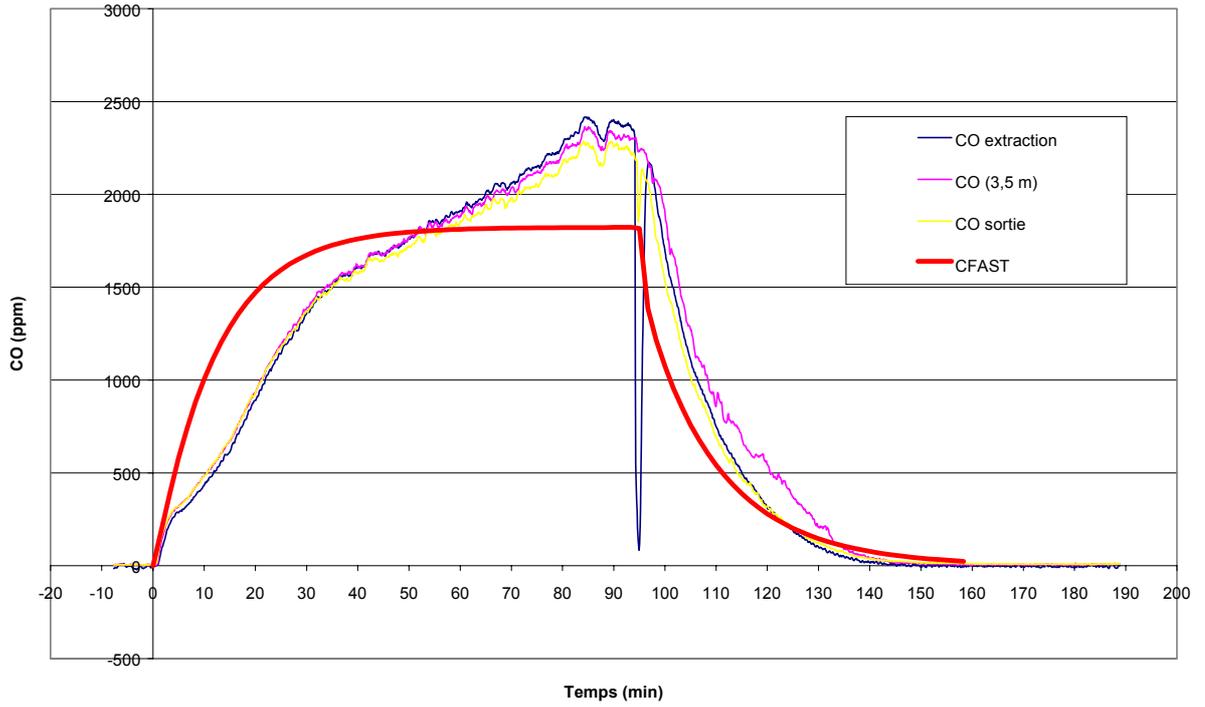


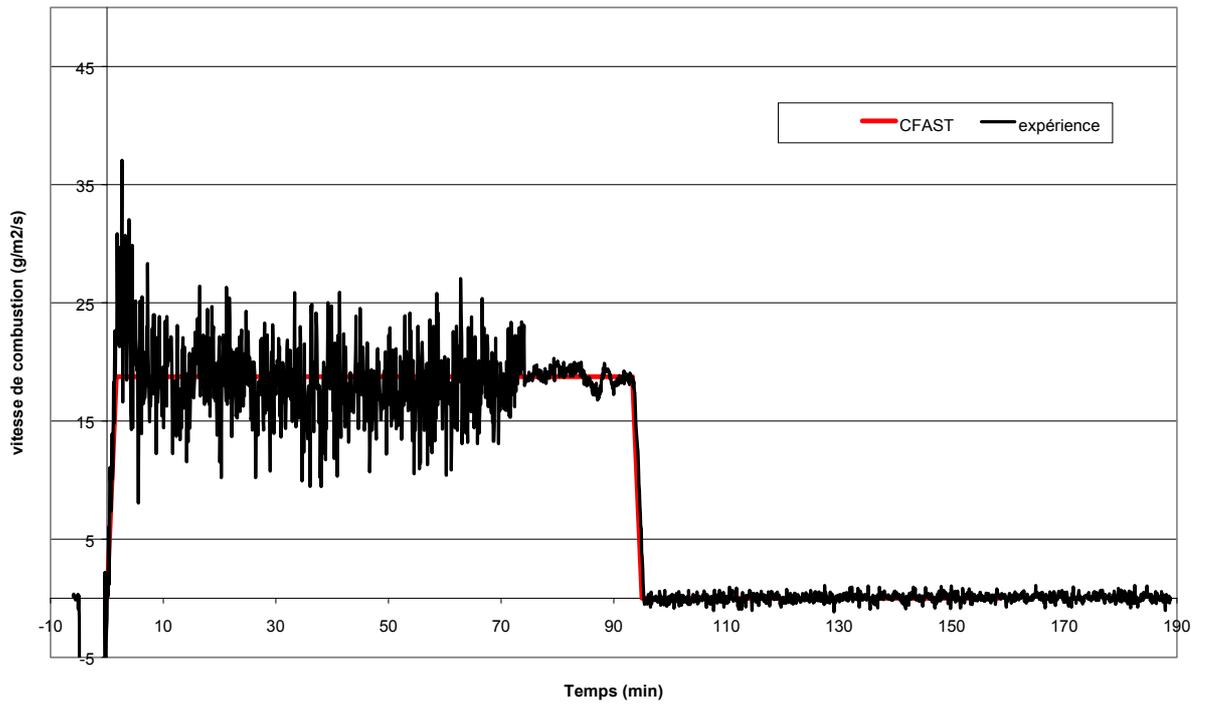
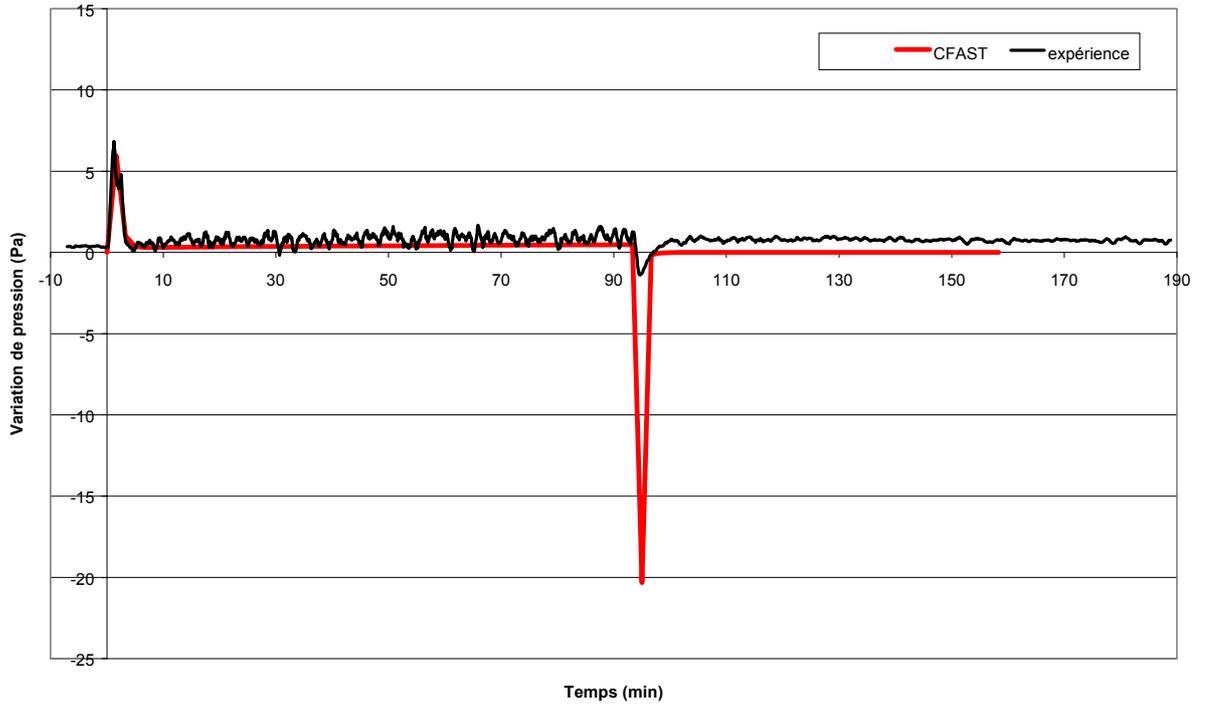




DEBIT DE VENTILATION 270 Nm³/h





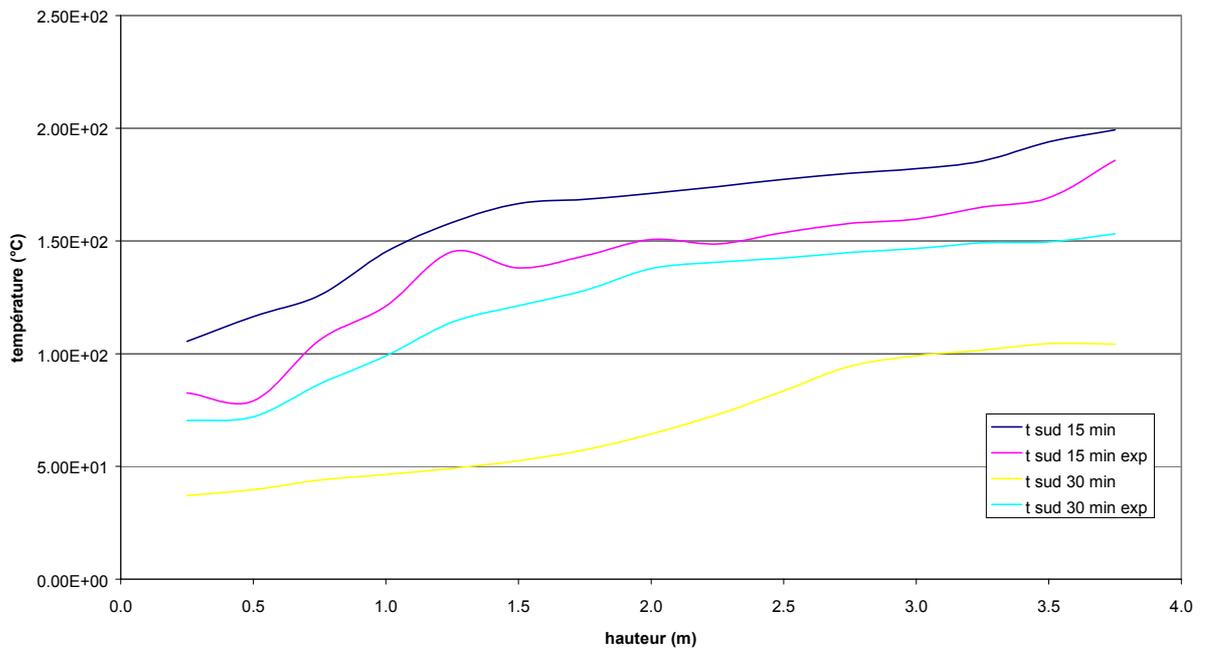


ANNEXE D

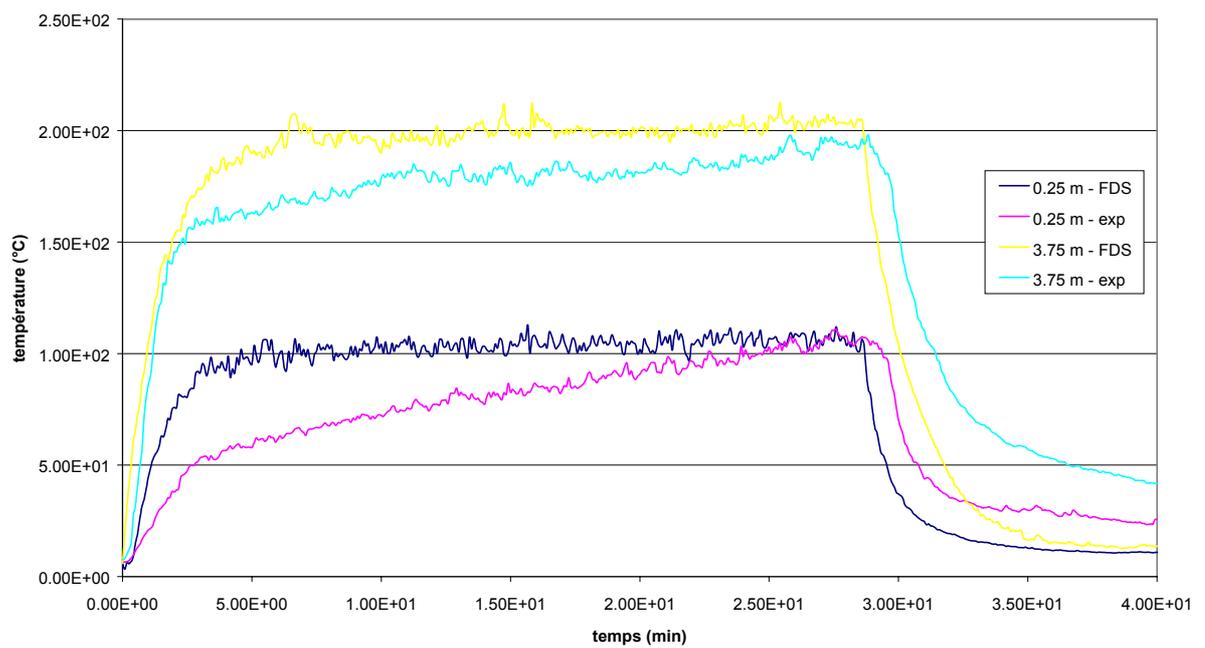
SIMULATION DE ESSAIS PYRIDINE DANS LA CHAMBRE 80 m³ avec FDS

TEMPERATURE DANS LA CHAMBRE AVEC UN PAS DE MAILLAGE "GROSSIER"

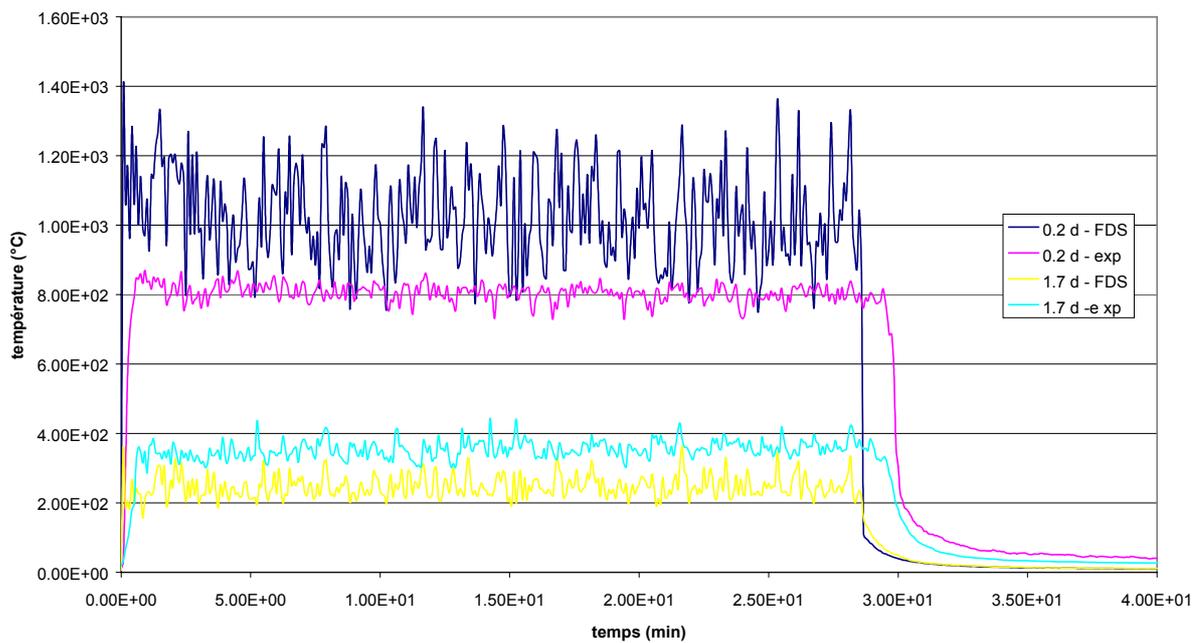
Evolution de la température suivant la hauteur



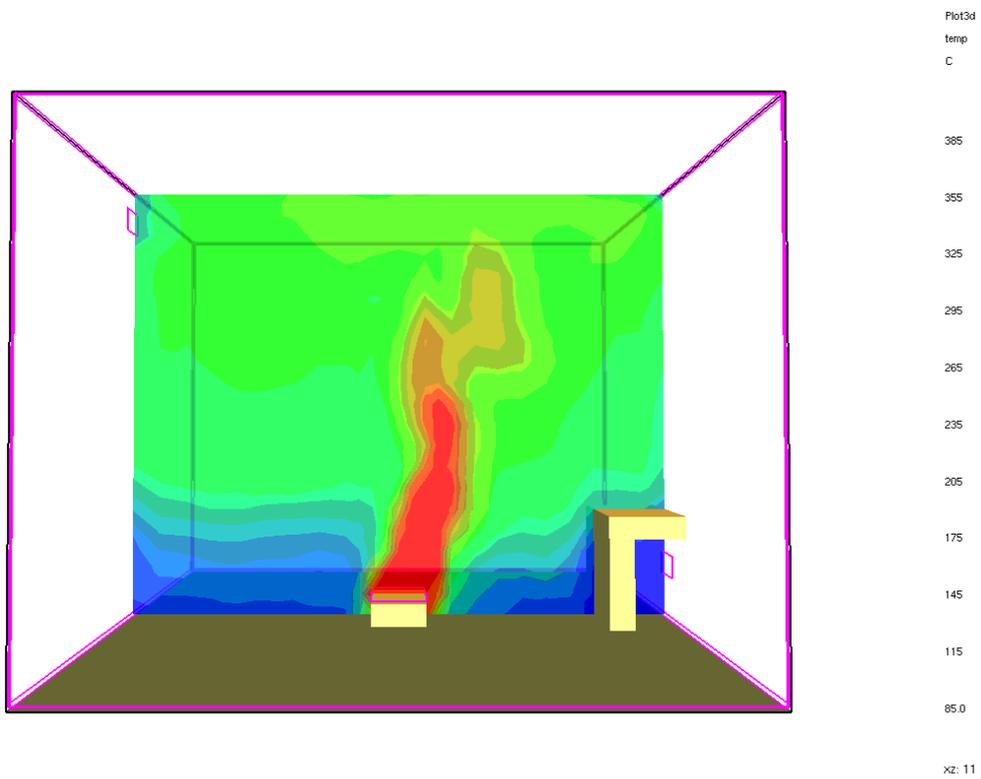
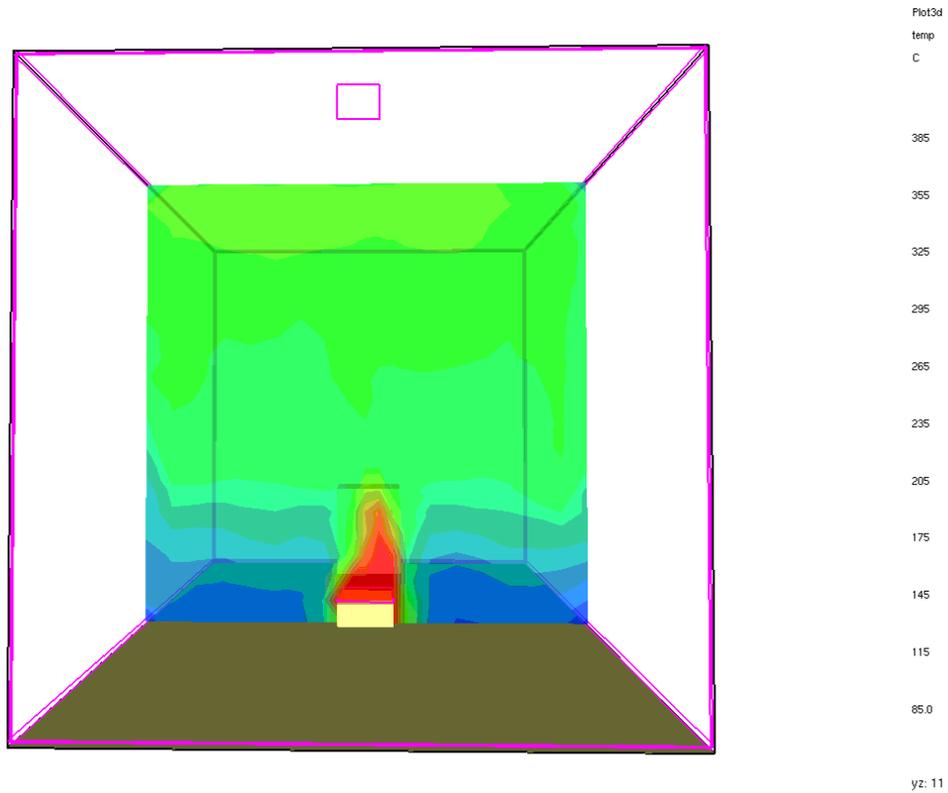
températures fumées sud



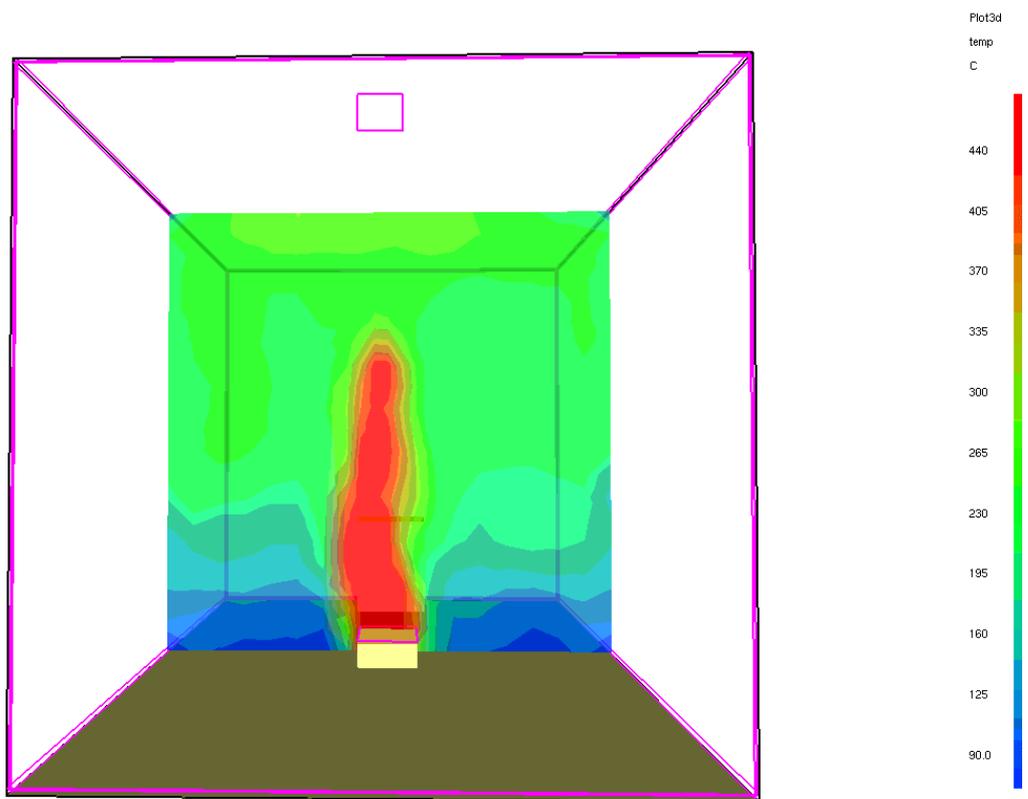
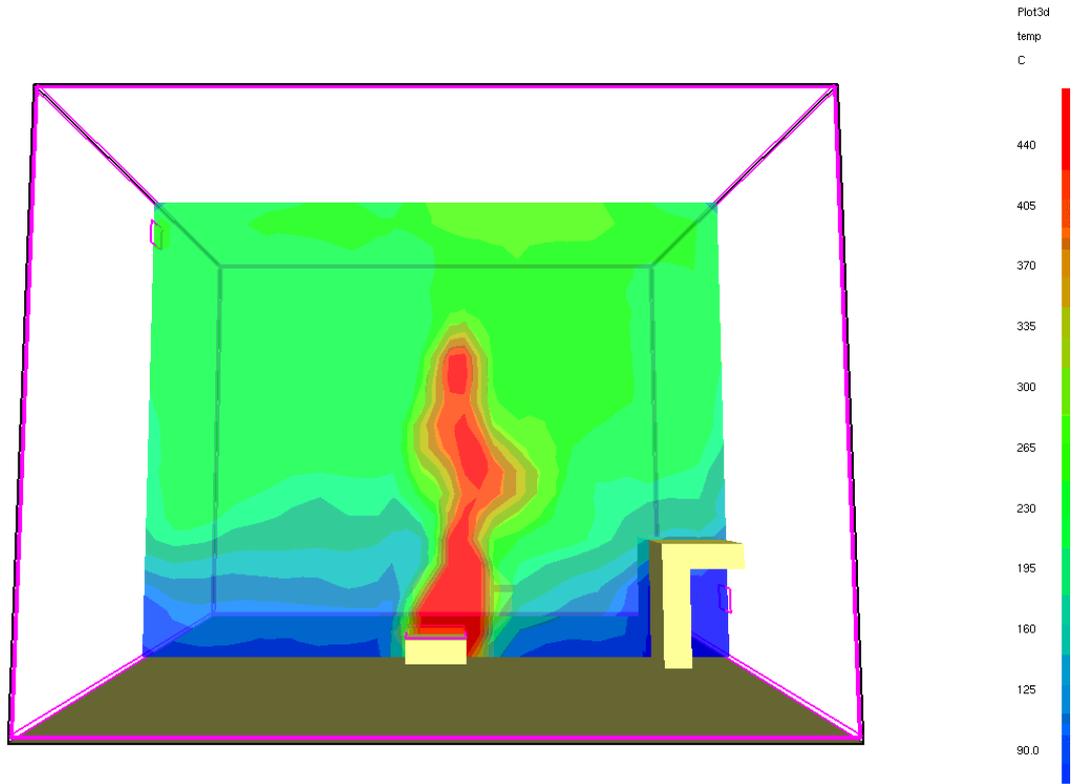
températures de flamme



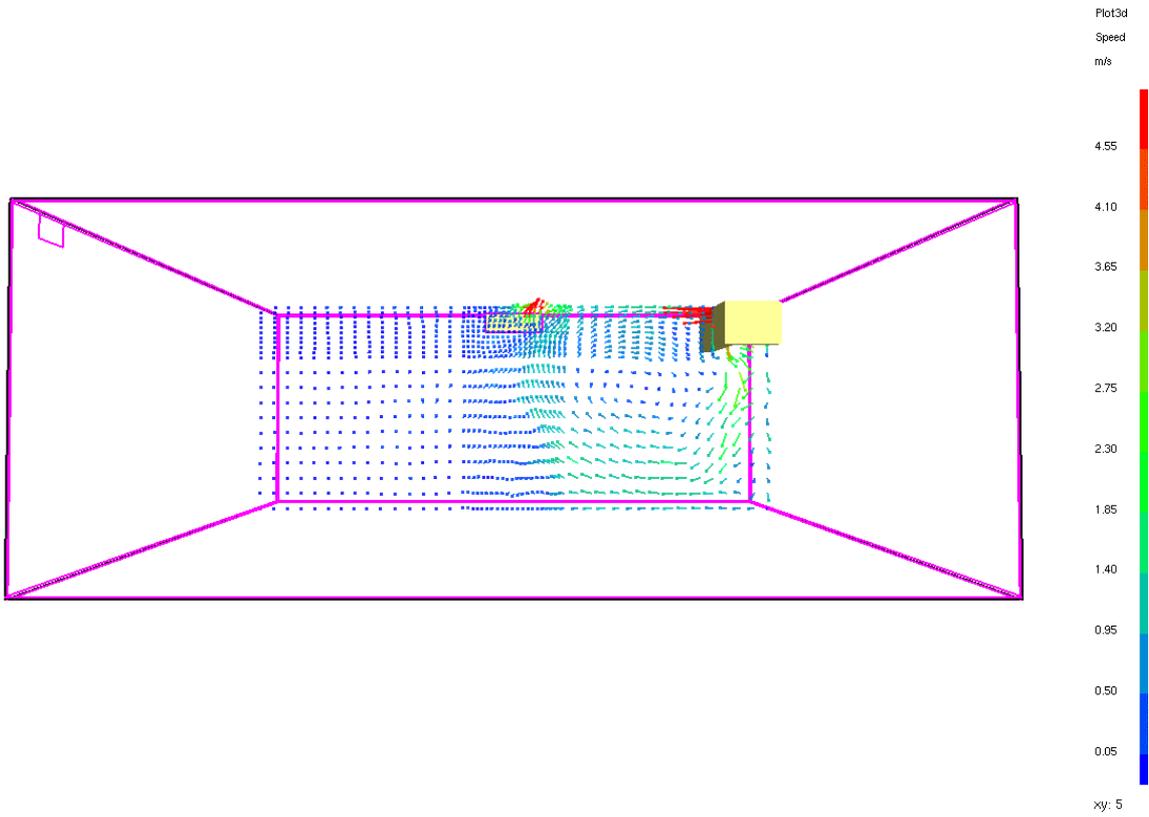
CHAMP DE TEMPERATURES DANS LA CHAMBRE A $T=300$ S



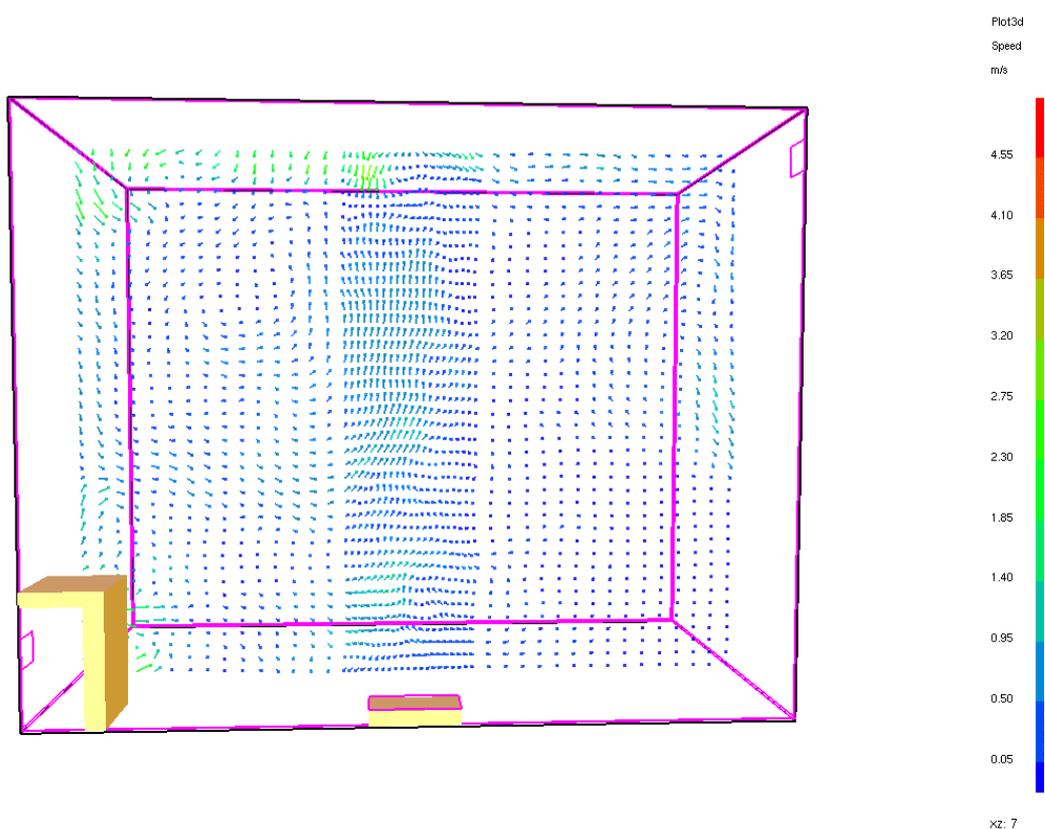
CHAMP DE TEMPERATURES DANS LA CHAMBRE A $T=1500$ S



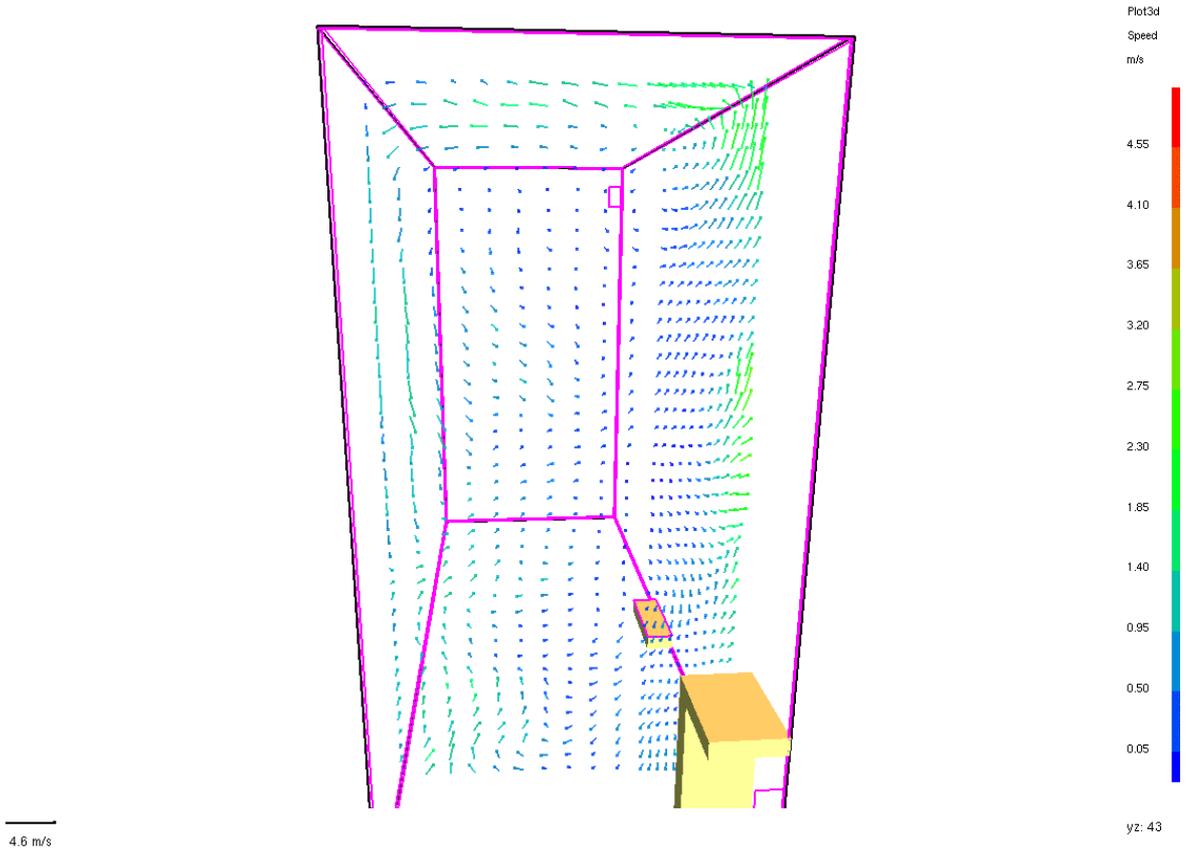
VUE DE L'ECOULEMENT DANS LA CHAMBRE AVEC UN PAS DE MAILLAGE "PETIT" A $T=300$ S



4.6 m/s



4.6 m/s



VUE DE L'ECOULEMENT DANS LA CHAMBRE AVEC UN PAS DE
MAILLAGE "GROSSIER" A $T=1500$ S

