

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en génie mécanique
Option: Installation Énergétique et Turbomachines

Prédiction numérique de la dispersion du monoxyde de carbone (CO) dans un local à usage d'habitation

Promoteur

Pr. BENAROUS A.

Co-Promotrice

HACHANA R.

Réalisé par

ALLAL Mohammed Aniss

BELLAOUI Mohamed Walid

Promotion : 2022/2023

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer ma profonde gratitude envers notre promoteur BENAROUS Abdallah et notre co-promotrice HACHANA Romaissa pour leur soutien inconditionnel, leur expertise et leur dévouement tout au long de notre projet de recherche. Leur mentorat précieux, leurs conseils éclairés et leur disponibilité constante ont été essentiels pour mener à bien notre travail.

Nous aimerions également remercier chaleureusement les membres du jury, pour leur temps, leur évaluation approfondie et leurs suggestions constructives qui ont enrichi notre recherche. Leurs commentaires avisés ont contribué à améliorer la qualité de notre travail.

Nous sommes également reconnaissants envers les professeurs du département de mécanique pour leur enseignement de qualité et leur partage de connaissances approfondies tout au long de notre parcours académique. Leur expertise a été une source d'inspiration pour nous, et nous les remercions pour leur contribution précieuse à notre développement en tant que futurs ingénieurs.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance envers nos collègues et camarades de classe pour leur soutien, leur collaboration et leurs discussions stimulantes qui ont enrichi notre expérience d'apprentissage.

DÉDICACE

A mes chers parents

Quoi que je dise ou que je fasse, je n'arrivai jamais à vous remercier comme il se doit. C'est grâce à vos encouragements, vos bienveillances et votre présence à mes côtés, que j'ai réussi ce respectueux parcours.

Je souhaite que vous soyez fière de moi, et que j'ai pu répondre aux espoirs que vous avez fondé en moi.

A mon frère et ma sœur,

Merci pour vos soutiens moral, vos confiances et vos conseils précieux, qui m'ont aidé dans les moments difficiles.

Je vous souhaite le bonheur et la réussite dans vos vies.

À mon chère binôme « Aniss »

A toute ma famille et mes amis,

À travers ses lignes je ne peux pas vous décrire tous mes sentiments d'amour, le seul mot que je peux dire est merci, vraiment merci beaucoup à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce mémoire.

DÉDICACE

A mes chers parents

Quoi que je dise ou que je fasse, je n'arrivai jamais à vous remercier comme il se doit. C'est grâce à vos encouragements, vos bienveillances et votre présence à mes côtés, que j'ai réussi ce respectueux parcours.

Je souhaite que vous soyez fière de moi, et que j'ai pu répondre aux espoirs que vous avez fondé en moi.

A mes chères sœurs,

Merci pour vos soutiens moral, vos confiances et vos conseils précieux, qui m'ont aidé dans les moments difficiles.

Je vous souhaite le bonheur et la réussite dans vos vies.

À mon chère binôme «Walid »

A toute ma famille et mes amis,

À travers ses lignes je ne peux pas vous décrire tous mes sentiments d'amour, le seul mot que je peux dire est merci, vraiment merci beaucoup à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Notre projet de fin d'études porte sur la prédiction numérique de la dispersion du monoxyde de carbone dans un local résidentiel. L'objectif principal est d'utiliser des techniques de modélisation et de simulation pour évaluer la propagation de ce gaz potentiellement dangereux. Le processus d'investigation comprend plusieurs étapes clés. Tout d'abord, des données pertinentes sur le local à usage d'habitation sont collectées, telles que les dimensions, les ouvertures et les mécanismes chimiques potentielles de génération du monoxyde de carbone. Ensuite, un modèle en 3D du local est créé à l'aide d'un logiciel de modélisation (FDS), en prenant en compte la physique de l'écoulement.

Les conditions initiales du système sont définies, y compris la concentration initiale à la source de monoxyde de carbone, les températures (air, parois, fumée) et les flux d'air entrants. En utilisant les équations de transport en MDF, la dispersion du monoxyde de carbone dans le local est modélisée.

Ce projet contribue à une meilleure compréhension de la dispersion du monoxyde de carbone dans les locaux résidentiels et offre des informations pour la mise en place de mesures de sécurité adéquates, visant à protéger les habitants contre les risques associés à ce gaz toxique.

Mots clés : Ingénierie des incendies ; Monoxyde de carbone ; Compartiment ventilé ; Simulation numérique.

Abstract

The present project focuses on the numerical prediction of carbon monoxide dispersion in a residential space. The main objective is to deal with modeling and simulation techniques to assess the spread of this potentially dangerous gas. The research process involves several key steps. Firstly, relevant data regarding the residential space is collected, including dimensions, ventilation, openings, and potential sources of carbon monoxide. Subsequently, a 3D model of the space is created using suitable modeling software FDS, taking into account all important details of the environment. The initial conditions of the system are defined, including the initial concentration of carbon monoxide, temperatures, and incoming airflow rates.

This research project contributes to a better understanding of carbon monoxide dispersion in residential spaces and provides valuable insights for implementing adequate safety measures to protect occupants from the risks associated with this toxic gas.

Keywords: Fire engineering; Carbon monoxide; Ventilated compartment; Numerical simulation.

ملخص

المشروع يركز على التنبؤ الرقمي لانتشار أحادي أكسيد الكربون في مساحة سكنية. الهدف الرئيسي هو استخدام تقنيات النمذجة والمحاكاة لتقييم انتشار هذا الغاز الخطير. يتضمن عملية البحث العديد من الخطوات الرئيسية. أولاً، يتم جمع البيانات ذات الصلة بالمساحة السكنية مثل الأبعاد والتهوية والفتحات ومصادر أكسيد الكربون المحتملة. بعد ذلك، يتم إنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد للمساحة باستخدام برنامج النمذجة FDS مع مراعاة جميع التفاصيل الهامة للمكان.

يتم تحديد الظروف الابتدائية للنظام بما في ذلك تركيز أولي لأكسيد الكربون ودرجات الحرارة ومعدلات تدفق الهواء الوارد. باستخدام معادلات النقل، يتم نمذجة انتشار أكسيد الكربون في المكان.

يساهم هذا المشروع في فهم أفضل لانتشار أكسيد الكربون في المباني السكنية، ويوفر معلومات قيمة لتطبيق التدابير الأمنية المناسبة لحماية السكان من المخاطر المرتبطة بهذا الغاز السام.

كلمات المفاتيح: هندسة الحرائق؛ أحادي أكسيد الكربون؛ مساحة سكنية مع تهوية؛ محاكاة علمية.

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Nomenclature	
Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : Ingénierie de la sécurité incendie	
Introduction.....	4
1.1 Phénoménologie du feu.....	4
1.2 Impact du feu sur les structures.....	6
1.3 Impact du feu sur les personnes.....	6
1.4 Le monoxyde de carbone	8
1.4.1 Effets d'inhalation de monoxyde de carbone.....	8
1.5 Les combustions incomplètes.....	10
1.6 Solutions technologiques de type actives.....	11
1.6.1 Le contrôle continu.....	11
1.6.2 Atténuer la dispersion de monoxyde de carbone.....	12
a/Le désenfumage.....	12
b/La hiérarchie des pressions.....	13
c/L'efficacité.....	14
1.7 Les détecteurs de monoxyde de carbone.....	14
1.7.1 Définition.....	14
1.7.2 Technologies de détection.....	15
1.8 L'entretien.....	16
Conclusion.....	19

Chapitre 02 : Formulation mathématique

Introduction.....	22
2.1. La modélisation aéro-thermochimique.....	22
2.1.1 Le facteur d'ouverture.....	22
2.1.2 La hauteur d'ouverture.....	23
2.1.3. Le débit d'air.....	23
2.1.4. La combustion complète du propane C_3H_8	23
2.1.5. La richesse.....	24
2.1.6. Le taux de production du CO (CO Yield).....	25
2.1.7 Les limites d'inflammabilité.....	27
2.1.8 La hauteur de flamme	27
2.1.9 Les corrélations.....	28
2.2 Le Fire Dynamic Simulator (FDS).....	28
2.2.1Principe de la méthode de résolution sous FDS.....	29
2.2.2 Utilisation de la simulation aux grandes échelles (LES) de la turbulence.....	30
2.2.3 Utilisation de la LES dans le solveur FDS.....	30
Conclusion.....	32

Chapitre 03 : Calcul par simulation

Introduction.....	34
3.1 Présentation du module de chauffage.....	34
3.2 Présentation du compartiment	38
3.3 Estimation des tailles caractéristiques des cellules.....	40
3.4 Autre critère de maillage.....	43
3.5 Coût des calculs.....	46
3.6 Le calcul de débit d'air, richesse, CO Yield.....	47
3.7 Modalisations du cas d'étude.....	47
3.7.1 Emplacement des capteurs de monoxyde de carbone.....	48
3.7.2 : Divers configurations de ventilation naturelle.....	49
3.7.3 Analyse des résultats	62

3.7.4 Diverses configurations du CO Yield à la source	63
Conclusion	70
Conclusion générale	72

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les symptômes causés par l'inhalation de monoxyde de carbone.....	9
Tableau 3.1 : Caractéristiques de l'élément de chauffage.....	36
Tableau 3.2 : Dimentions principales des éléments de ventilation naturelle.....	40
Tableau 3.3 : Facteurs d'ouvertures pour divers configurations.....	40
Tableau 3.4 : Valeurs des pas Δx LES pour les différents types de maillage.....	41
Tableau 3.5 : Valeurs du nombre de cellules pour chaque maillage.....	42
Tableau 3.6 : Données relatives au temps-CPU.....	46
Tableau 3.7 : Tableau des résultats de débit d'air, richesse, CO Yield.....	47

Liste des figures

Figure 1.1 : Représentation schématique de l'émission de polluants engendrés par un incendie de stockage de combustibles.....	4
Figure 1.2 : Le tétraèdre du feu.....	5
Figure 1.3 : Phases de développement de feu.....	6
Figure 1.4 : Schématisation de la production de CO ₂ et du CO.....	10
Figure 1.5 : Les sources de monoxyde dans l'usage d'habitation.....	11
Figure 1.6 : Désenfumage par balayage.....	13
Figure 1.7 : Désenfumage par la hiérarchie des pressions.....	14
Figure 1.8 : Principes de désenfumage : a) mécanique, b) naturel.....	14
Figure 1.9 : L'emplacement des détecteurs de monoxyde de carbone dans une maison.....	17
Figure 1.10.A : Les composants d'un détecteur de monoxyde de carbone	18
Figure 1.10.B : Afficheur de détecteur de monoxyde de carbone.....	19
Figure 3.1 : Image du chauffage étudié.....	34
Figure 3.2 : Dimensions globales de l'élément du chauffage.....	35
Figure 3.3.A.B : Prises des mesures pour les orifices de gaz.....	37
Figure 3.4 : Plan 3D du compartiment (deux angles de vue).....	38
Figure 3.5 : Schématisation des dimensions (Solidworks) de compartiment et du bac de chauffage	39
Figure 3.6.A : Image instantanée (FDS) montrant la hauteur maximale de la flamme $\Delta x=0.15$	43
Figure 3.6.B : Image instantanée (FDS) montrant la hauteur minimale de la flamme $\Delta x=0.15$	44
Figure 3.7.A : Image montrant la hauteur maximale de la flamme $\Delta x=0.1$	45
Figure 3.7.B : Image montrant la hauteur minimale de la flamme $\Delta x=0.1$	45
Figure 3.8 : Interpolation du temps CPU en fonction du temps physique	46
Figure 3.9.A : L'emplacement des capteurs du CO.....	48
Figure 3.9.B : L'emplacement des capteurs du CO.....	48
Figure 3.10 : Image montrant la configuration du cas 2.1.....	49

Figure 3.11 : Contours spatiaux (plan Z) de monoxyde de carbone après 600s (cas 2.1).....	49
Figure 3.12 : Contours spatiaux de monoxyde de carbone après 1200s (cas 2.1).....	50
Figure 3.13 : Résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.1).....	50
Figure 3.14 : Image montrant la configuration (cas 2.2).....	51
Figure 3.15 : contours spatiaux de monoxyde de carbone après 600s (cas 2.2).....	51
Figure 3.16 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas2.2).....	52
Figure 3.17 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas2.2).....	52
Figure 3.18: Image montrant la configuration (cas2.3).....	53
Figure 3.19 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas2.3).....	53
Figure 3.20 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas2.3).....	53
Figure 3.21 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.3).....	54
Figure 3.22 : Image montrant la conception de la maison dans le cas (2.4).....	55
Figure 3.23 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas2.4).....	55
Figure 3.24 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas2.4).....	55
Figure 3.25 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.4).....	56
Figure 3.26 : Image montrant la conception de la maison (cas 3.1).....	57
Figure 3.27 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas 3.1).....	57
Figure 3.28 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.1).....	57
Figure 3.29 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.1).....	58
Figure 3.30 : Image montrant la conception de la maison (cas 3.2).....	59
Figure 3.31 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas 3.2).....	59
Figure 3.32 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.2).....	59
Figure 3.33 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.2).....	60
Figure 3.34 : Image montrant la conception de la maison (cas 3.4).....	61
Figure 3.35 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas 3.4).....	61
Figure 3.36 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.4).....	61
Figure 3.37 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.4).....	62
Figure 3.38: Contours spatiaux de monoxyde de carbone après 1200s (cas 2.1 CO Yield=0.8).....	63
Figure 3.39 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.1 CO Yield=0.8).....	64

Figure 3.40 : Contours de monoxyde de carbone après 1200s (cas 2.1 CO Yield=1.6).....	65
Figure 3.41 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.1 CO Yield=1.6).....	65
Figure 3.42 : Contours de la température après 1200s (cas 3.4 CO Yield=0.6).....	66
Figure 3.43 : Contours de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.4 CO Yield=0.6).....	66
Figure 3.44 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.4 CO Yield=0.6).....	67
Figure 3.45 : Contours de monoxyde de température après 1200s (cas 3.4 CO Yield=1.2).....	68
Figure 3.46 : Contours de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.4 CO Yield=1.2).....	68
Figure 3.47 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.4 CO Yield= 1.2).....	69
Figure 3.48 : Résultats de température et Y CO en fonction de la distance entre les capteurs z =1.5m de R+1.....	70

Liste des abréviations

CFD : Computational Fluid Dynamics

CPU : Central processing unit

DAACO : Détecteur-avertisseur autonome de monoxyde de carbone

DEV : Capteur (Device)

EPI : Equipement de protection individuelle

FDS: Fire Dynamic Simulator

HRRPUA: Heat Release Rate Per Unit Area

LES : Large Eddy Simulation

LII : La limite inférieure d'inflammabilité

LSI : La limite supérieure d'inflammabilité

NIST : National Institute of Standards and Technology

O : Facteur d'ouverture

RDC : Rez-de-chaussée

SLC: Coupe plane (slice)

SMV: Smokeview

Nomenclature

A_{fire} : Surface du bac du feu [m^2]

B : Longueur ou largeur de la surface en feu [m]

C_{p0} : Capacité calorifique massique du gaz de référence (air) [J/ kg. K]

D_{eq} : Diamètre équivalent de la surface en feu [m]

g : Accélération de la pesanteur (9,81 m/s²) [m/s²]

H_f : Hauteur moyenne de la flamme [m]

\dot{m} : Débit massique de combustible [kg/s]

P : Pression statique [Pa]

R : Constante de gaz parfait [J/mole.K]

$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q}$: Puissance dégagée par la combustion [Kw]

T : Température [C°]

ρ : Masse volumique [kg/m³]

Introduction générale

La sécurité dans les locaux à usage d'habitation est une préoccupation majeure pour assurer la santé et le bien-être des occupants. Parmi les risques potentiels, la dispersion du monoxyde de carbone (CO) constitue une problématique importante en raison de sa toxicité et de sa difficulté à être détectée. La prédiction numérique de la dispersion du monoxyde de carbone dans un local résidentiel représente donc, un enjeu crucial pour évaluer les niveaux de concentration et mettre en place des mesures préventives efficaces.

Ce projet se concentre sur l'utilisation de techniques de modélisation et de simulation pour prédire numériquement la dispersion du monoxyde de carbone dans un local à usage d'habitation. L'objectif principal est de développer un modèle précis et fiable qui permettra d'estimer la propagation du CO, d'identifier les zones ou les configurations à risque élevé et de formuler des recommandations de sécurité appropriées.

La modélisation numérique offre une approche prometteuse pour étudier la dispersion du monoxyde de carbone dans un contexte résidentiel. En utilisant des équations de transport et des modèles de turbulence ou de dispersion atmosphérique, il est possible de simuler la propagation du CO dans le local, en prenant en compte les caractéristiques du bâtiment, la ventilation, les sources potentielles de monoxyde de carbone et d'autres paramètres pertinents.

L'utilisation d'un modèle en 3D du local permet de prendre en compte les détails géométriques et les conditions initiales du système avec FDS, tels que la concentration initiale (à la source) du CO, les températures et les flux d'air entrants. Les résultats de la simulation permettent ensuite d'évaluer les concentrations de monoxyde de carbone dans différentes parties du local en utilisant le SMOKEVIEW, d'identifier les zones présentant des risques élevés d'exposition au CO et de recommander des mesures de sécurité pour minimiser ces risques.

En identifiant les zones à risque élevé, il est possible de concevoir des systèmes de ventilation plus efficaces, de recommander des détecteurs de monoxyde de carbone et de promouvoir des pratiques de sécurité appropriées pour prévenir les intoxications au CO.

Cette recherche revêt une importance capitale pour la sécurité des locaux à usage d'habitation et constitue une contribution précieuse pour la prévention des risques liés au monoxyde de carbone. En utilisant des outils de modélisation avancés, nous pouvons améliorer la compréhension des mécanismes de formation / dispersion du CO.

Le mémoire est organisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre on parle de l'ingénierie de la sécurité incendie. Dans le second chapitre, on dresse les formulations mathématiques issues des lois de conservation et on explicite les variables principales et leurs origines physiques.

Le troisième chapitre, est une partie du mémoire dédiée à l'étude du cas choisi, aux calculs des paramètres du dégagement de chaleur et de ventilation. Il est complété par la partie relative aux discussions des résultats de la simulation numérique.

Le mémoire se termine par une conclusion et un ensemble de perspectives.

Chapitre 01 : Ingénierie de la sécurité incendie

Introduction

Le chapitre est dédié à l'aspect phénoménologique et technologique, relatif à l'incendie et à ses effets sur les structures et sur les humains. Les éléments des structures de construction sont constamment exposés aux flux instationnaires, donnant naissance à des contraintes thermiques, pouvant affecter la tenue mécanique et provoquer des ruines imprévisibles. Nous donnons quelques ordres de grandeurs des flux et leurs impacts sur les éléments de construction.

1.1 Phénoménologie du feu

Dans cette partie, sont décrits les principaux phénomènes mis en jeu lors d'un incendie susceptible de produire des fumées toxiques, dégageant entre autres, des flux thermiques. Il convient de rappeler que tout incendie conduit à l'émission de composés très divers qui se dénombrent par milliers. L'interaction entre l'incendie et l'environnement est illustrée par la figure (1.1). Cette interaction se fait généralement dans une période plus ou moins courte, caractérisée par plusieurs phases.

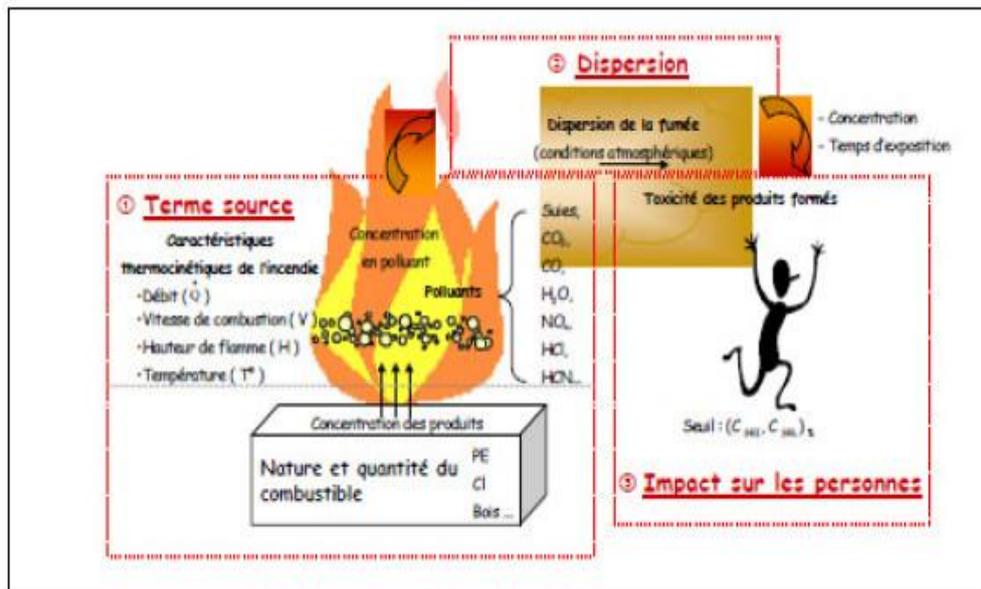


Figure 1.1 : Représentation schématique de l'émission de polluants engendrés par un incendie de stockage de combustibles [1].

L'incendie est un phénomène qui se développe de manière incontrôlée dans le temps et dans l'espace. Un incendie est une combustion naissant de la présence simultanée d'un comburant (corps qui, en se combinant avec un combustible, permet la combustion), d'un combustible (matière capable de se consumer et de brûler) et d'une source d'inflammation (source présentant l'énergie nécessaire au démarrage de la réaction chimique de combustion). Ces trois éléments forment le triangle du feu. Une extension du triangle du feu est préférée ; la représentation du tétraèdre du feu (figure 1.2), qui prend en compte la cinétique de la réaction en chaîne due aux radicaux libres (corps

intermédiaires instables générés par l'action de l'oxygène sur les combustibles [1]

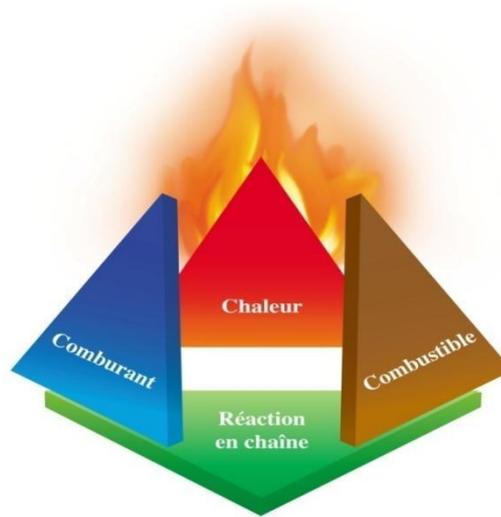


Figure 1.2 : Le tétraèdre de feu [1]

Un incendie se développe en plusieurs étapes, en accord avec la présence / absence de l'air (oxygène) du combustible et d'agents d'extinction et terres (fig. 1.3)

- **Phase 1** : Initiation du feu

Cette phase dépend fortement du type de combustible mis en jeu, de sa disposition géométrique, de la ventilation du lieu et du type de source d'allumage. Les premiers gaz et fumées apparaissent,

- **Phase 2** : La propagation

Au cours de cette phase, le foyer est vif mais encore localisé, le rayonnement ou le contact des flammes atteignent les matières proches, les gaz chauds se dégagent et emplissent le volume,

- **Phase 3** : L'embrassement généralisé ou "flash-over"

Les gaz chauds portent les combustibles présents à leur température d'inflammation, et l'ensemble du volume s'embrase brutalement. Le flux rayonné par les flammes atteint sa valeur maximale. Le flashover intervient lorsque la température d'une couche de fumées et de gaz dans le volume est comprise entre 500 °C et 600°C.

- **Phase 4** : Le déclin

Lorsque l'apport d'un des trois éléments du triangle du feu tend à s'amenuiser, le feu décline et finalement s'éteint.

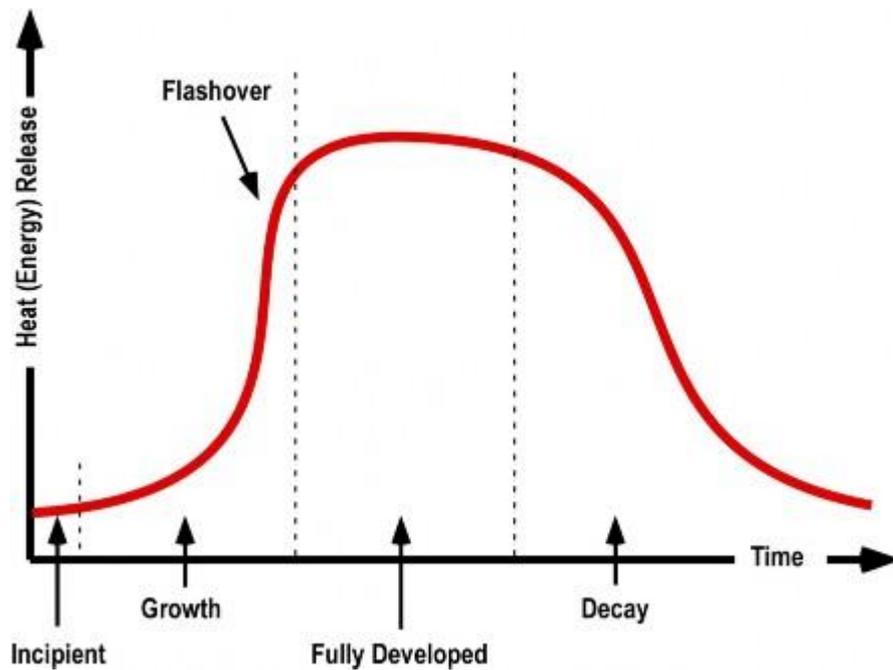


Figure 1.3 : Phases de développement du feu [1]

1.2 Impact du feu sur les structures

5 kW/m², seuil des destructions de vitres significatives ;

8 kW/m², seuil des effets dominant et correspondant au seuil des dégâts graves sur les structures.

16 kW/m², seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton.

20 kW/m², seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton.

200 kW/m², seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes [2]

1.3 Impact du feu sur les personnes

Les personnes (occupants personnels d'intervention) sont vulnérables aux températures, mais aussi aux flux surfaciques. En effet, la stratification technique atténue relativement les risques de brûlures, ce qui n'est pas le cas des densités de flux incidents sur les corps des personnes [2]

3 kW/m², seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine ».

5 kW/m², seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine ».

8 kW/m², seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très

Graves pour la vie humaine ».

La cause principale de décès lors d'un incendie est liée à l'inhalation de fumées toxiques. Les principaux composés retrouvés dans les fumées sont ceux préalablement présents et l'ensemble de ceux formés pendant l'incendie. Le risque toxique concerne les victimes directes des incendies, mais aussi les victimes indirectes, parmi lesquelles peuvent se trouver les sapeurs-pompiers qui auraient été amenés à intervenir sans être équipés de moyens de protection adaptés, ainsi que les populations environnantes qui peuvent être exposées par la pollution de l'environnement, en particulier par les eaux de ruissellement utilisées pour l'extinction de l'incendie, ou par la pollution aérienne, l'effet toxique pouvant persister même après extinction de l'incendie. [3]

Au cours d'un incendie, c'est la partie supérieure du volume formé par les flammes qui émet les fumées. La nature du combustible influence la hauteur des flammes, l'énergie thermocinétique initiale, la température, la vitesse d'émission et la concentration en gaz toxiques. La composition en nature et en quantité des fumées émises par l'incendie dépend des caractéristiques thermocinétiques de l'incendie, qui sont :

- Le débit de fumée : il dépend de la vitesse de combustion du combustible et détermine la quantité de produits émis dans l'air ambiant, et donc la toxicité. Plus ce débit est élevé, plus il est difficile de diluer la fumée, et donc plus la toxicité est importante,
- La vitesse d'émission : elle est la résultante de la poussée d'Archimède sur les gaz chauds, et donc favorise un courant ascensionnel. Ainsi, plus la vitesse d'émission est importante, plus la dilution de la fumée se fait en altitude,
- La hauteur d'émission : c'est la hauteur des flammes et elle correspond à l'altitude à laquelle a lieu la fin des réactions chimiques de combustion (zone de panache de fumée),
- La température : elle dépend du combustible et de la ventilation du foyer d'incendie. Si elle est importante, les fumées ont tendance à s'élever davantage. La nature des produits de combustion en est très dépendante.

Les effets irréversibles correspondant à la persistance dans le temps d'une atteinte lésionnelle ou fonctionnelle, directement consécutive à une exposition en situation accidentelle (exposition unique et de courte durée) ayant pour conséquence des séquelles invalidantes ; Les effets létaux correspondant à la survenue des décès pour une proportion donnée d'individus.

En pratique lors d'un accident, un observateur n'est jamais soumis à un échelon de concentration constant dans le temps et il y a donc lieu d'intégrer les apports de chacun des pas de temps pendant lesquels la concentration est

supposée constante, cette relation est plus connue sous le nom de Loi de Haber, qui permet de calculer \int comme suivant [4] :

$$I = \int_{t=t_0}^{t=t_n} C^n(t).dt \quad (1.1)$$

avec :

t_0 : temps de début d'exposition, t_n : le temps final d'exposition.

1.4 Le monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone est un gaz invisible, inodore et incolore créé lorsque les combustibles fossiles (tels que l'essence, le bois, le charbon, le propane, le mazout et méthane), brûlent incomplètement. À la maison, les appareils de chauffage et de cuisson sont des sources possibles de monoxyde de carbone. Des véhicules dans un garage attenant, peut également produire des niveaux dangereux de monoxyde de carbone.

Le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂) ; produits de combustion les plus fréquents et les plus abondants, L'acide cyanhydrique (HCN), Les oxydes d'azote ou les vapeurs nitreuses NO_x (NO, NO₂), L'anhydride sulfureux (SO₂) et le sulfure d'hydrogène

(H₂S), L'acide chlorhydrique (HCl), L'acide fluorhydrique (HF), Le phosgène (COCl₂), L'ammoniac (NH₃), L'acide acétique (CH₃CO₂H) et le chlore (Cl₂), Le brome (Br₂) ainsi que d'autres gaz.

1.4.1 Effets d'inhalation de monoxyde de carbone

Le CO remplace l'oxygène dans le sang, provoquant éventuellement une suffocation. Une intoxication légère au CO ressemble à la grippe, mais plus grave l'empoisonnement entraîne des difficultés respiratoires et même la mort.

Le mécanisme d'action toxique du monoxyde de carbone s'explique essentiellement par la liaison du CO aux structures héminiques et plus particulièrement par sa liaison à l'hémoglobine où il entre en compétition avec l'oxygène pour former la carboxyhémoglobine.

Cette liaison, stable mais réversible, empêche le transport de l'O₂ par le pigment, ce qui se traduit par une diminution la concentration sanguine en oxyhémoglobine et par conséquent, une diminution de l'oxygénation des tissus (hypoxie tissulaire) [5]

Diminution du transport de l'oxygène dans le sang (HbO₂)sang ↓



La façon dont les gens deviennent malades suite à une exposition au CO varie considérablement d'une personne à l'autre, en fonction de l'âge, de l'état de santé général, de la concentration de l'exposition (mesurée en parties par million) et la durée de l'exposition. Des concentrations plus élevées sont dangereuses même pour une courte période.

La concentration de monoxyde de carbone est donnée par le ppm avec :

$$1\text{ppm} = \frac{1\text{g}}{1000000} = \frac{1\text{g}}{1000\text{kg}} = \frac{1\text{mg}}{1\text{kg}} = \frac{10^{-3} \times 10^{-3}\text{kg}}{\text{kg}} = Y_{\text{CO}}$$

La concentration en ppm, est donc liée à la fraction massique du CO par : $Y_{\text{CO}} = [\text{CO ppm}] \times 10^{-6}$

Le tableau suivant présente des symptômes typiques, basés sur la concentration et le temps d'exposition :

Tableau 1.1 : Les symptômes causés par l'inhalation de monoxyde de carbone [6]

Concentration de monoxyde de carbone dans l'air (en ppm)	Symptômes chez une personne adulte/durée d'exposition
35	Aucun effet / ≤ 8 heures
100	Effet sur le sommeil, la mémoire et l'humeur / > 8 heures
200	Léger mal de tête et nausées après une période / 2 à 3 heures
400	Mal de tête et nausées après une période / 1 à 2 heures/
800	Mal de tête, nausée et étourdissements après 45 minutes, somnolence après 2 heures
1000	Perte de conscience après 1 heure,
1600	Mal de tête, nausées et étourdissements / 20 minutes, Perte de conscience / 30 minutes

3200	Mal de tête, nausées et étourdissements après 5 à 10 minutes, perte de conscience après 30 minutes
12800	Effets physiologiques instantanés perte de conscience et risque de décès/ de 1 à 3 minutes

1.5 Les combustions incomplètes

La combustion incomplète a lieu quand la quantité de comburant est insuffisante pour permettre la réaction complète du combustible ou lorsque le temps de contact, à une température rendant la combustion possible, est trop faible. Elle produit des résidus de combustion, sous forme de cendres qui émettent des fumées : certains composés, tels que monoxyde de carbone, particules de carbone pur (suie, goudron, cendres), oxydes d'azote (NOx), hydrocarbures (du benzène cancérigène par exemple) sont très toxiques pour l'homme et pour l'environnement, ou fortement toxiques comme les HAP ou les composés organiques volatils (COV).

Le monoxyde de carbone provient de la combustion incomplète de matières carbonées (gaz naturel, bois, charbon, butane, essence, fioul, pétrole, propane).

Ce phénomène est dû à : une quantité insuffisante d'oxygène dans l'air (pièce calfeutrée, aération insuffisante, entrée d'air bouchée...), la présence d'impuretés dans les matières carbonées, objets de la combustion, une évacuation insuffisante des gaz de combustion (conduit mal raccordé, cheminée obstruée/mal ramonée...), une utilisation prolongée ou inadaptée d'un appareil.

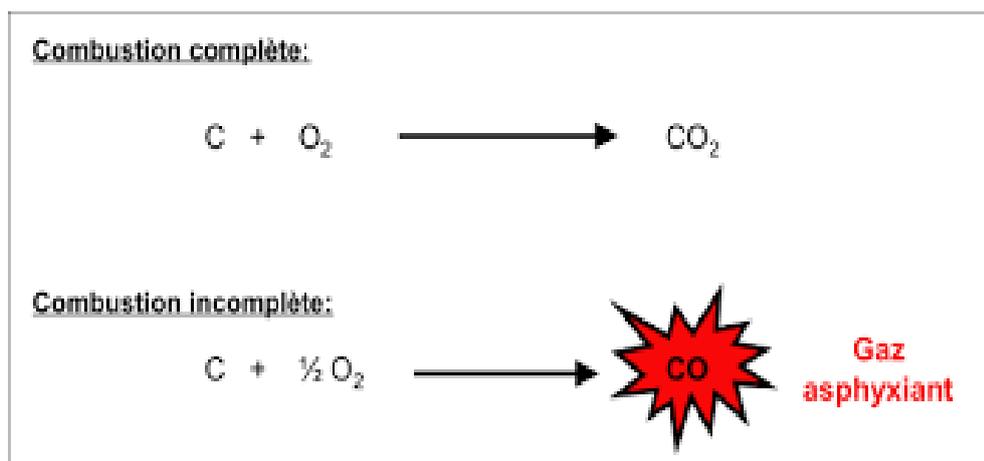


Figure 1.4 : Schématisation de la production de CO₂ et du CO [6]

En milieu domestique, il existe une multiplicité de sources, ce qui constitue un réel problème pour prévenir les intoxications au CO. Il est difficile d'établir une liste exhaustive des différents matériels susceptibles d'être à l'origine d'une intoxication. Cependant, en absence d'incendie en milieu domestique, les expertises ont montré que la détérioration des systèmes de combustion, et la mauvaise ventilation/ extraction, sont les principales causes d'augmentation des niveaux de monoxyde de carbone

* Systèmes à gaz

Appareils producteurs d'eau chaude, appareils pour chauffage, gazinières, ...Au niveau des installations de chauffage (au gaz) domestique, la concentration en CO dans les effluents gazeux est d'autant plus faible que l'apport en oxygène est élevé (l'objectif est d'éviter une combustion incomplète). Tout local dans lequel est implanté un appareil de chauffage à combustion doit impérativement être équipé d'une arrivée d'air frais. (Fig.1.5)

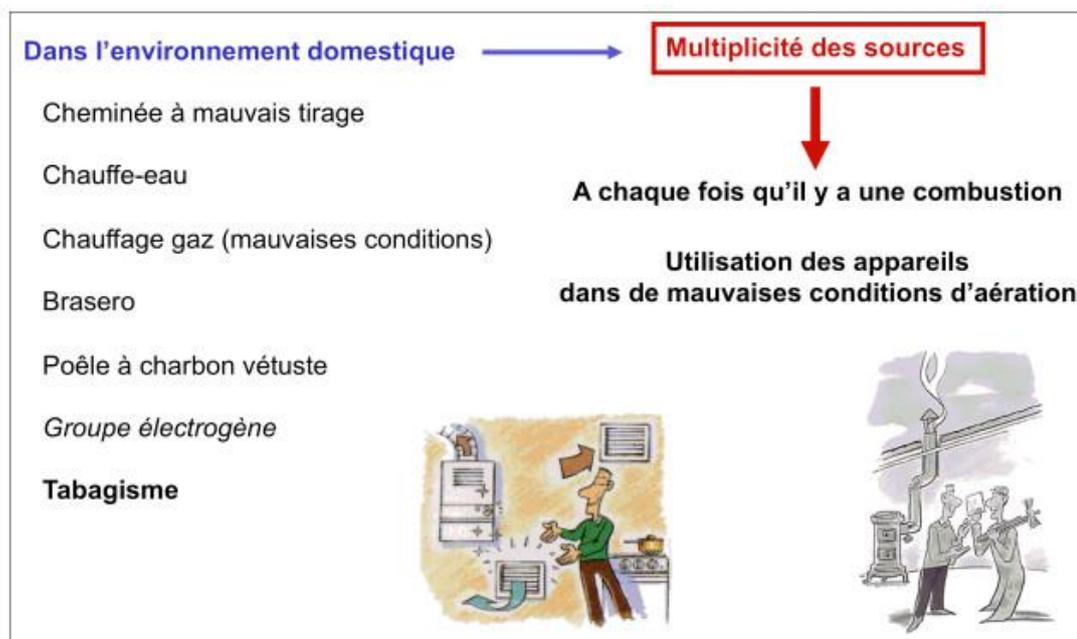


Figure 1.5 : Les sources de monoxyde de carbone dans l'usage d'habitation [6]

1.6 Solutions technologiques de type actives

Une manière d'assurer une protection <<active>> des personnes, il est intéressant de procéder à une limitation de la production du CO (CO yield) au niveau même du foyer domestique (en absence d'incendie).

1.6.1 Le contrôle continu

Pour limiter la production de monoxyde de carbone, il faut :

a-Avant l'hiver, faire systématiquement intervenir un professionnel qualifié pour contrôler les installations de combustion ;

b-Faire vérifier et entretenir chaudières, chauffe-eau, chauffe-bains, inserts et poêles. Il est recommandé de signer un contrat d'entretien garantissant une visite annuelle de prévention (réglage, nettoyage et remplacement des pièces défectueuses) ;

c-Vérifier et entretenir les conduits de fumées (par ramonage mécanique) chaque année. Le conduit de cheminée doit être en bon état et raccordé au foyer. Il doit déboucher loin de tout obstacle qui nuirait à l'évacuation des fumées.

d-Toute l'année et particulièrement pendant la période d'hiver, assurer une bonne ventilation du logement, Aérer le logement tous les jours pendant au moins 10 minutes, même quand il fait froid, ne pas obstruer les entrées et sorties d'air (grilles d'aération dans les cuisines, salles d'eau et chaufferies principalement). Si une pièce est insuffisamment aérée, la combustion au sein des appareils sera incomplète et émettra du monoxyde de carbone(CO).

e-Utiliser de manière appropriée les appareils à combustion : Ne jamais faire fonctionner les chauffages d'appoint en continu. Ils sont conçus pour une utilisation brève et par intermittence uniquement, respecter scrupuleusement les consignes d'utilisation des appareils à combustion (se référer au mode d'emploi du fabricant), en particulier les utilisations proscrites en lieux fermés (barbecue, groupe électrogène...), ne jamais utiliser pour se chauffer des appareils non destinés à cet usage : cuisinière, brasero...

f- Entretenir les appareils : Nettoyer régulièrement les brûleurs de la cuisinière à gaz (on doit voir la flamme dans chaque orifice). S'ils sont encrassés, le mélange air-gaz ne s'effectue pas dans de bonnes conditions et le brûleur peut s'éteindre, notamment quand il est au ralenti. Une flamme bien réglée ne doit pas noircir le fond des casseroles.

g- En cas d'installation de nouveaux appareils (groupes électrogènes ou appareils à gaz) : Ne jamais placer les groupes électrogènes dans un lieu fermé (maison, cave, garage...); ils doivent impérativement être installés à l'extérieur des bâtiments, s'assurer de la bonne installation et du bon fonctionnement de tout nouvel appareil à gaz avant sa mise en service et exiger un certificat de conformité auprès de l'installateur.

1.6.2 Atténuer la dispersion de monoxyde de carbone

Un autre moyen d'atténuer ou de retarder les effets du monoxyde de carbone (CO) lors de la dispersion des fumées, c'est là un contrôle passif, qui nécessite des équipements comme les jet-fans, les sprinklers et les trappes d'évacuation (fig1.7)

a/Le désenfumage

Un système de désenfumage doit permettre d'évacuer les fumées de manière à assurer la praticabilité et la sûreté des cheminements empruntés (en termes de visibilité, de température supportable, d'abaissement de la teneur en gaz toxiques et de maintien d'un taux d'oxygène suffisant) et doit empêcher la propagation des fumées et des flammes dans d'autres locaux.

Comme tout système de sécurité, il est essentiel qu'il fonctionne au bon moment et à bon escient. Par conséquent, et conformément à la réglementation européenne, il est obligatoire de faire entretenir périodiquement les installations de désenfumage par du personnel compétent [6]. Un désenfumage par balayage permet d'amener de l'air frais dans une voie d'évacuation et crée une surpression qui empêche la fumée de pénétrer dans la zone de balayage. L'ouvrant de désenfumage doit être disposé de sorte à balayer d'air frais dans toute la voie d'évacuation en sens opposé à la fuite. (fig.1.7)

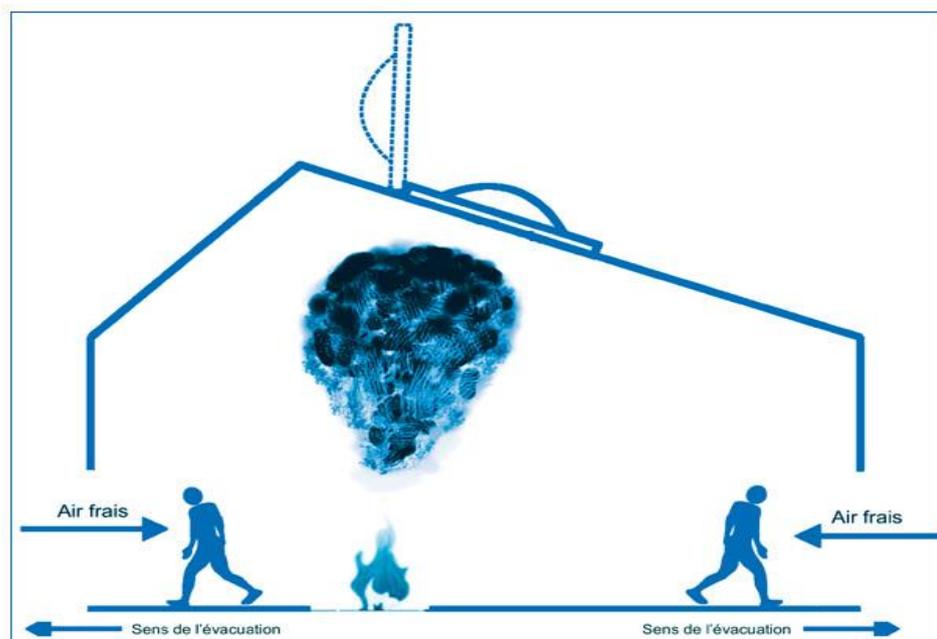


Figure 1.6 : Désenfumage par balayage [7]

b/La hiérarchie des pressions

La hiérarchie des pressions consiste à mettre en surpression les locaux adjacents au local enfumé.

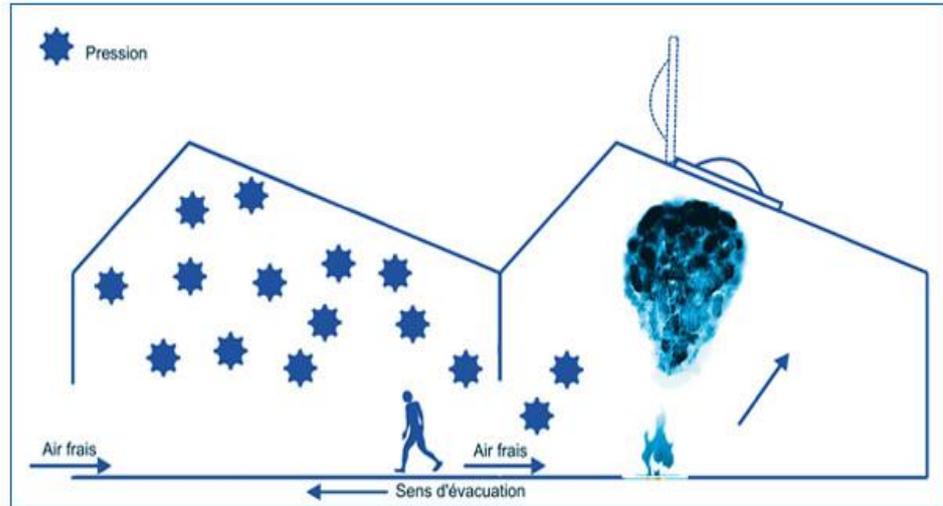


Figure 1.7 : Désenfumage par la hiérarchie des pressions [7]

Le local adjacent est en surpression par rapport au local incendié. Les fumées ne devront donc pas se propager au local adjacent puisque la surpression provoquée dans celui-ci s'oppose à leur passage.

c/L'efficacité : L'efficacité de ces deux principes dépend essentiellement de leur implantation et de leur délai de déclenchement. Les fumées devront être évacuées le plus près possible du foyer et le plus tôt. Les exutoires de désenfumage sont des ouvertures débouchant à l'air libre (ouvertures dans les parois et les toitures, gaines et canaux destinés à l'évacuation de la fumée et de la chaleur) qui permettent aux sapeurs-pompiers de mettre en œuvre des appareils mobiles d'extraction de fumée et de chaleur (par exemple ventilateurs des sapeurs-pompiers, ventilateurs pour gaz chauds). Les ouvertures d'amenée d'air sont les ouvertures par lesquelles les ventilateurs des sapeurs-pompiers soufflent l'air dans le local, soit directement par une porte, soit indirectement, par une cage d'escalier ou un couloir.

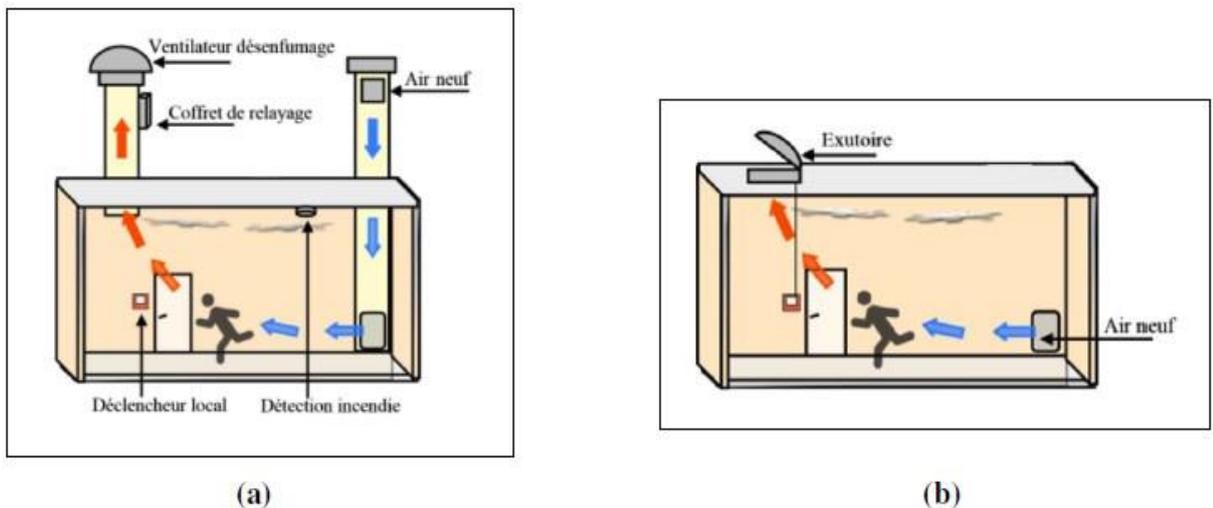


Figure 1.8 : Principes de désenfumage : a) Mécanique, b) Naturel [7].

Le désenfumage naturel est réalisé par des amenées d'air et des évacuations de fumées communiquant avec l'extérieur, directement ou au moyen de conduits disposés de manière à assurer un balayage satisfaisant du local. Le désenfumage par tirage mécanique est assuré par des extracteurs mécaniques de fumées et des amenées d'air naturelles ou mécaniques, l'ensemble étant commandé par un système manuel ou automatique.

1.7 Les détecteurs de monoxyde de carbone

1.7.1 Définition

Un détecteur-avertisseur autonome de monoxyde de carbone, ou détecteur autonome avertisseur de monoxyde de carbone (DAACO), est un appareil qui analyse l'air afin de détecter si un taux anormal de monoxyde de carbone y est présent, et ainsi prévenir une intoxication au monoxyde de carbone. Contrairement au détecteur de fumée, il n'a pas besoin de la présence de particules typiques de fumées dans l'air pour se déclencher mais seulement de la présence du monoxyde de carbone, gaz inodore et incolore résultant d'une combustion incomplète d'un combustible carboné. Les détecteurs de monoxyde de carbone peuvent être installés de manière fixe, ou pour les travailleurs de certaines industries, être portatifs et servir d'équipement de protection individuelle (EPI).

1.7.2 Technologies de détection

Les trois technologies de détecteurs de monoxyde de carbone disponibles sur le marché sont, les détecteurs électrochimiques ; les détecteurs à semi-conducteur en oxyde métallique ; et les détecteurs à disque enduit de gel (détection optique).

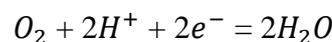
*a*DéTECTEURS électrochimiques*

Les détecteurs électrochimiques se basent sur une pile à combustible monoxyde de carbone - dioxygène. La pile est constituée d'un conteneur avec deux électrodes séparées par un électrolyte acide (par exemple de l'acide sulfurique). Le courant fourni par cette pile est reliée de manière précise à la quantité de monoxyde de carbone dans l'air à proximité du détecteur.

Le monoxyde de carbone est oxydé au niveau de l'anode et forme du dioxyde de carbone, d'après la demi-équation d'oxydo-réduction suivante (potentiel standard $E^\circ = -0,11 \text{ V / ESH}$) :



Au niveau de la cathode, c'est l'oxygène qui est réduit en eau (potentiel standard $E = 1.23\text{V/ ESH}$) :



La réaction globale $2\text{CO} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ est très favorisée, elle se produit donc spontanément. Le courant électrique produit par cette pile est proportionnel à la concentration en monoxyde de carbone dans l'air au niveau

du détecteur, ce qui permet de déclencher une alarme sonore lorsque ce taux atteint une valeur critique. Cette méthode de détection présente l'avantage de mesurer avec une haute précision le taux de monoxyde de carbone, de fonctionner à température ambiante et de ne nécessiter qu'une faible source d'énergie, lui assurant une autonomie de 5 à 10 ans.

B/Détection optique

Les méthodes de détection optique s'appuient sur le changement de couleur d'un gel ou d'une solution en fonction de la présence ou l'absence du monoxyde de carbone. La couleur est suivie à l'aide d'une photodiode. Les piles alcalines permettent d'alimenter ce type d'appareil environ 2 - 3 ans, elles doivent donc être changées au cours de la vie de l'appareil. Ces détecteurs disposent donc d'un système de mesure et d'alerte en cas de baisse de charge de la batterie.

Le changement de couleur peut être dû à la complexation du monoxyde de carbone par un ligand (en général un chromophore comme une cyclodextrine) dont la couleur change selon son état lié ou non. Cette technique imite le changement de couleur de l'hémoglobine entre ses états libres et liés. Elle présente l'avantage d'être extrêmement spécifique et est donc plébiscité dans les lieux publics où une fausse alerte est dommageable.

Le changement de couleur peut également être obtenu grâce aux propriétés réductives du monoxyde de carbone. Celui-ci peut par exemple réduire le disulfite de potassium (jaune), ce qui s'accompagne de la formation de palladium solide donc de l'obscurcissement du substrat.



1.8 L'entretien

Le détecteur autonome est équipé de piles et doit être vérifié régulièrement (au moins une fois par an). Généralement, il est équipé d'un bouton de test qui permet de s'assurer de son bon fonctionnement. Certains modèles (cf. photo en haut de page) sont aussi équipés d'un afficheur permettant de connaître la valeur maximale de CO mesurée. Les avertisseurs de CO doivent être installés dans un emplacement central à l'extérieur de chaque chambre à coucher et à chaque étage de la maison et à d'autres endroits où les lois, codes ou normes applicables l'exigent. Pour une meilleure protection, connectez tous les avertisseurs de CO dans toute la maison. (Fig. 1.10)

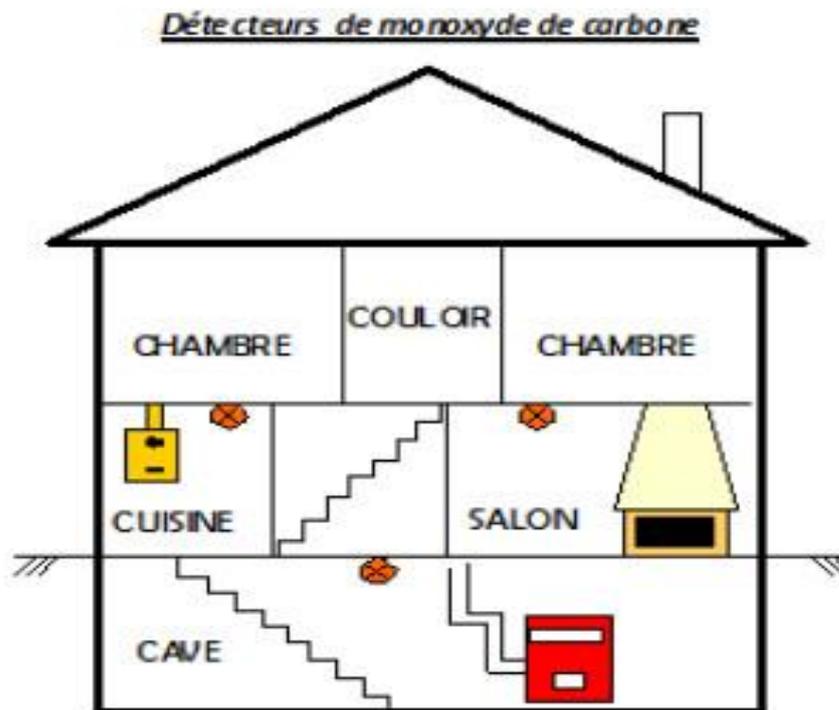
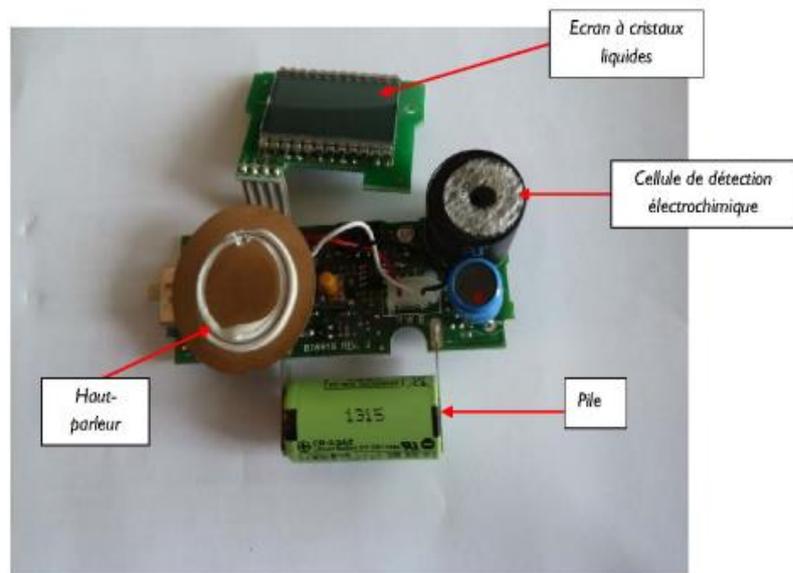


Figure 1.9 : L'emplacement des détecteurs de monoxyde de carbone dans une maison [7]

- Suivez les instructions du fabricant pour le placement et la hauteur de montage.
- Choisissez un avertisseur de CO répertorié par un laboratoire d'essai qualifié.
- Appelez le numéro non urgent de votre service d'incendie local pour savoir quel numéro appeler si l'alarme de monoxyde de carbone retentit.
- Testez les avertisseurs de CO au moins une fois par mois ; remplacez-les conformément aux instructions du fabricant.
- Si le signal sonore de panne retentit, vérifiez si les piles sont faibles. Si la batterie est faible, remplacez-la. Si ça sonne encore, appelez les pompiers.
- Si l'alarme de monoxyde de carbone retentit, déplacez-vous immédiatement vers un endroit à l'air frais à l'extérieur ou près d'une fenêtre ou d'une porte ouverte. Assurez-vous que tout le monde à l'intérieur de la maison est représenté. Appelez à l'aide d'un endroit à l'air frais et restez-y jusqu'à ce que le personnel d'urgence déclare qu'il est sécuritaire de rentrer dans la maison.
- Si vous devez réchauffer un véhicule, sortez-le du garage immédiatement après l'avoir démarré. Ne faites pas fonctionner un véhicule ou un autre moteur à carburant à l'intérieur, même si les portes du garage sont ouvertes. Assurez-vous que le tuyau d'échappement d'un véhicule en marche n'est pas recouvert de neige.

- Pendant et après une tempête de neige, assurez-vous que les événements de la sécheuse, de la fournaise, du poêle et du foyer sont exempts d'accumulation de neige.
- Une génératrice doit être utilisée dans un endroit bien ventilé à l'extérieur, loin des fenêtres, des portes et des ouvertures de ventilation.
- Les grils à gaz ou à charbon de bois peuvent produire du CO — utilisez-les uniquement à l'extérieur.



Vue agrandie de l'intérieur d'un DAACO

Figure 1.10.A : Les composants d'un détecteur de monoxyde de carbone [7]



Figure 1.10.B : Afficheur de détecteur de monoxyde de carbone [7]

Cet indicateur affiche le taux d'humidité en %, la température en ° CELSUS le taux de CO en particule par million (ppm)

La marge de tolérance entre 35 et 60

Conclusion

En conclusion, l'ingénierie de la sécurité incendie représente un ensemble de connaissances, de pratiques et de mesures essentielles pour prévenir les incendies, protéger les occupants et limiter les dommages matériels. En comprenant les principes de base de la science du feu et en appliquant des normes et des procédures appropriées, il est possible de créer des environnements plus sûrs et de sauver des vies.

L'ingénierie de la sécurité incendie exige une approche multidisciplinaire et une collaboration étroite entre les experts en génie, les professionnels de la sécurité et les occupants des bâtiments. En travaillant ensemble, nous pouvons évaluer les risques, concevoir des bâtiments résistants au feu, installer des systèmes de détection et d'extinction adéquats, et former les occupants à agir de manière sécurisée en cas d'urgence.

En fin de compte, la sécurité incendie concerne la protection des vies et des biens. En prenant au sérieux la prévention des incendies, en mettant en place des mesures de

sécurité appropriées et en promouvant la sensibilisation à la sécurité incendie, nous pouvons réduire les risques et créer un environnement plus sûr pour tous.

Chapitre 02 : Formulation mathématique

Introduction

La formulation mathématique et la modélisation sont des outils essentiels dans l'étude de la dispersion du monoxyde de carbone (CO) dans les environnements d'habitation. La prédiction précise de la dispersion du CO revêt une importance capitale pour la sécurité des occupants, car ce gaz toxique peut entraîner des risques graves pour la santé et même être fatal en cas d'inhalation prolongée.

Ce chapitre se concentre sur la formulation mathématique et la modélisation de la prédiction numérique de la dispersion du CO dans les usages d'habitation. La formulation mathématique consiste à traduire les phénomènes physiques liés aux lois de conservation et à la dispersion du CO en équations mathématiques, tandis que la modélisation permet de représenter ces équations sous forme de modèles numériques.

La dispersion du CO dans les espaces d'habitation est influencée par de nombreux facteurs, tels que la ventilation, la taille de la pièce et les sources de CO. La formulation mathématique de ce problème complexe implique la prise en compte des lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, ainsi que des équations de réaction chimique associées à la combustion du CO, sans oublier les équations de la turbulence.

2.1. La modélisation aéro-thermochimique

Les modèles décrits ci-dessous, font référence aux relations mathématiques, utilisées dans la quantification des paramètres d'étude, comme le facteur d'ouverture (O) le débit d'air \dot{m} air et le taux de production à la source du CO (CO yields).

2.1.1 Le facteur d'ouverture

Dans le domaine de la ventilation, le facteur d'ouverture se réfère généralement à la proportion d'une ouverture (comme une fenêtre, une porte ou une bouche d'aération) qui est perméable à l'écoulement de l'air. Il est utilisé pour déterminer la quantité d'air qui peut passer à travers cette ouverture, et servira à alimenter ou non, le foyer de feu.

Le facteur d'ouverture est un paramètre important dans la conception des systèmes de ventilation, car il permet d'estimer la quantité d'air qui peut être introduite ou extraite d'un espace donné. Il est utilisé pour calculer le débit d'air nécessaire pour maintenir une bonne qualité de l'air intérieur et assurer le confort et la sécurité des occupants. Il est donné par la relation [3] :

$$O = \sqrt{\frac{A_{op}(H_{op}^{1/2})}{A_t}} \quad [m^{0.5}] \quad (2.1)$$

avec :

A_{op} = la surface de l'ouverture

A_t = La surface totale du compartiment (sol, plafond, murs)

H_{op} = La hauteur de l'ouverture

2.1.2 La hauteur d'ouverture

La "hauteur d'ouverture" dans le domaine de la ventilation, fait référence à la distance verticale entre le point d'entrée et le point de sortie de l'ouverture, par laquelle l'air circule. Elle est utilisée pour décrire la dimension verticale d'une ouverture telle qu'une fenêtre, une bouche d'aération ou une grille de ventilation. C'est un paramètre important, car elle peut influencer le débit d'air, la vitesse de l'air et la distribution du mélange air/fumée dans un espace donné. Elle est souvent prise en compte lors de la conception des systèmes de ventilation, pour optimiser la circulation de l'air et garantir des conditions de confort appropriées.

Dans le cas où on a une seule ouverture c'est la longueur ou bien la dimension verticale d'ouverture. Si on a plusieurs ouvertures (N) c'est la hauteur équivalente donnée par [3]:

$$h_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i \times A_{opi}}{\sum_{i=0}^N A_{opi}} \quad (2.2)$$

2.1.3. Le débit d'air

Le débit d'air désigne la quantité d'air qui se déplace à travers un système ou une ouverture donnée pendant une certaine période de temps. Il est souvent exprimé en unités massique (kg/s). Le débit d'air est un paramètre important dans de nombreux domaines, tels que la ventilation, la climatisation, la combustion et l'aération. Il est utilisé pour évaluer et contrôler l'apport ou l'évacuation d'air dans un espace ou un système donné. Il peut être mesuré à l'aide d'instruments de mesure spécifiques tels que des débitmètres ou des anémomètres. Ces instruments permettent de déterminer la vitesse de l'air et d'utiliser les dimensions géométriques de l'ouverture ou du conduit, afin de calculer le débit massique/volumique d'air. La connaissance du débit d'air est essentielle pour garantir des conditions de confort, une qualité de l'air adéquate, des performances thermiques efficaces et le bon fonctionnement des systèmes de ventilation et de climatisation et la protection contre le feu. Pour le cas de la ventilation naturelle, ou seules les forces de flottabilité, contrôlent l'écoulement de l'air frais /des fumées, le débit d'air s'exprime via la corrélation de Kawagoe (2.3) comme [3] :

$$\dot{m}_{air} = 0.5 * A_{op} * \sqrt{H_{op}} \quad (2.3)$$

avec : H_{op} est la hauteur d'ouverture (m).

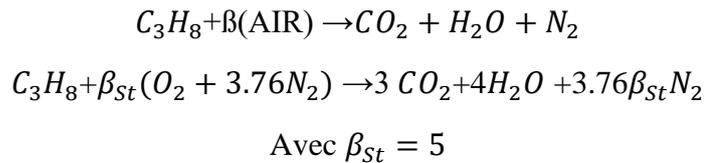
A_{op} est la surface d'ouverture (m^2).

2.1.4. La combustion complète du propane C_3H_8

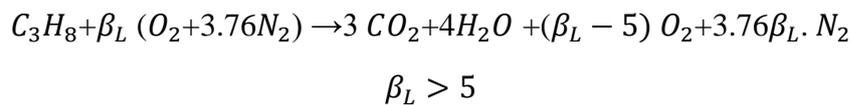
Se plaçant dans le cas d'une utilisation domestique d'un système de chauffage, une focalisation est faite sur le propane (C_3H_8). La combustion complète du propane est une réaction exothermique, ce qui signifie qu'elle produit le maximum de chaleur. Le propane est couramment utilisé comme source de chaleur dans de nombreuses applications domestiques et industrielles, telles que le chauffage, la cuisson et les systèmes de chauffage de l'eau.

Lorsque la combustion du propane est complète, cela signifie que tout le combustible (propane) réagit avec la quantité d'oxygène nécessaire pour produire uniquement du dioxyde de carbone et de l'eau, sans résidus ou sous-produits. Il est important de noter que pour que la combustion soit complète, il doit y avoir une quantité suffisante d'oxygène disponible. Si l'oxygène est limité, la combustion peut être incomplète, ce qui peut entraîner la formation de monoxyde de carbone (CO), plutôt que du dioxyde de carbone.

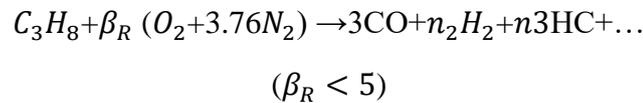
La réaction chimique de la combustion complète du gaz de propane, s'exprime comme :



Dans le cas où la combustion est sur ventilée, la réaction chimique de la combustion complète se caractérise, par un excédent d'oxygène :



Dans le cas où la combustion est mal ventilée, la réaction chimique de la combustion complète est donnée par :



2.1.5. La richesse

Dans le contexte de la combustion, la "richesse" se réfère généralement au rapport entre la quantité de combustible et la quantité d'oxygène disponible pour la réaction de combustion. Ce rapport est crucial pour déterminer si une combustion est "pauvre" (L) en combustible ou "riche" (R) en combustible.

Le rapport de richesse est généralement exprimé en termes de rapport stœchiométrique β_{St} , qui est le rapport idéal entre les quantités de combustible et d'oxygène nécessaires pour une combustion complète. Par exemple, pour la combustion du propane (C_3H_8) avec de l'oxygène (O_2), le rapport stœchiométrique est d'environ 1:5 (une mole de C_3H_8 nécessite cinq moles d'air), pour réagir complètement.

Lorsque la richesse est inférieure au rapport stœchiométrique, on parle de combustion "pauvre" ou "Lean". Cela signifie qu'il y a un excès d'oxygène par rapport à la quantité de combustible, ce qui peut entraîner une combustion incomplète et une production accrue de produits de combustion, tels que le monoxyde de carbone (CO). En revanche, lorsque la richesse dépasse le rapport stœchiométrique, on parle de combustion "riche" ou "Rich". Cela signifie qu'il y a un excès de combustible par rapport à la quantité d'oxygène disponible, ce qui peut entraîner une combustion incomplète, une production accrue de suies et une diminution de l'efficacité énergétique. Il est important de

contrôler la richesse de la combustion, en particulier dans les applications industrielles et les systèmes de chauffage, pour optimiser l'efficacité de la combustion, minimiser les émissions polluantes et maintenir des conditions de sécurité appropriées.

Dans le cas des incendies, où l'air frais est alimenté par convection naturelle (forces de flottabilité), les débits de combustible, sont généralement fixés et connues [8]. Soit, on est dans un cas d'incendie où le débit de pyrolyse (combustible solide) ou de vaporisation (combustible liquide) sont connus a priori-, soit on est en situation de chauffage domestique, où le débit du gaz est fixé via la pression d'injection du dispositif de chauffage.

En l'occurrence, la richesse varie en fonction de l'air d'alimentation, qui est lui-même fonction du facteur d'ouverture (eq.2.3).

Pour des applications de l'ingénierie incendie, elle est donnée par la relation (2.4) [4] :

$$\Phi = \frac{\dot{Q}}{0.5[o].At.3030} = \frac{\dot{Q}}{[o].At.1515} \quad (2.4)$$

$$\phi = \frac{\dot{Q}}{O \cdot At.1515} = \frac{\dot{Q}}{O \times A_t \times (1515)}$$

avec :

Φ : La richesse du mélange air/fumée

$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q}$: Le taux dégagement de chaleur [watts]

O : Le facteur d'ouverture du compartiment [m^2]

At : La surface totale du compartiment [m^2]

Pour un local, la situation de ventilation globale est définie via la richesse Φ :

\dot{m}_f =masse (débit) de la vapeur de combustible :

$$\Phi = (\dot{m}_f / \dot{m}_r) / r \text{ air} \quad (2.5)$$

$\dot{m}_{\text{air}} / \dot{m}_{O_2}$: masse (débit) d'air ou de combustible disponible

r_{air} / r_{O_2} : le rapport stœchiométrique fuel/air

$\Phi < 1$: combustion en régime pauvre (en fuel), feu sur-ventilé (un excès d'air)

$\Phi > 1$: combustion en régime riche, feu sous-ventilé (pas assez d'air)

2.1.6. Le taux de production du CO (CO yield)

Le CO Yield, ou taux de génération en monoxyde de carbone, fait référence à la quantité de monoxyde de carbone (CO) produite lors d'un processus de combustion ou d'une réaction chimique. Il s'agit d'une mesure de la proportion de combustible qui est convertie en monoxyde de carbone plutôt qu'en dioxyde de carbone (CO_2) lors de la combustion. Le rendement en CO est généralement exprimé en pourcentage et peut être calculé en comparant la quantité de CO produite à la quantité maximale de CO pouvant être théoriquement formée à partir du combustible utilisé.

Un rendement en CO élevé peut indiquer une combustion incomplète ou inefficace, car le CO est considéré comme un sous-produit indésirable et potentiellement toxique. Une combustion complète et efficace devrait idéalement produire principalement du CO_2 plutôt que du CO.

Il est important de noter que le rendement en CO peut être influencé par divers facteurs tels que la quantité d'oxygène disponible, la température de combustion, le rapport de mélange du combustible et de l'air, ainsi que les caractéristiques du combustible lui-même. Des conditions de combustion optimales doivent être maintenues pour minimiser la formation de CO et maximiser l'efficacité énergétique et la stabilité du processus de combustion.

Le rendement en monoxyde de carbone (CO yield) dans la combustion complète du propane (C_3H_8) est normalement très faible. Lorsque le propane brûle complètement avec une quantité suffisante d'oxygène, la réaction idéale produit principalement du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau (H_2O), sans la formation significative de monoxyde de carbone (CO). Tous les atomes de carbone du propane (C_3H_8) se retrouvent dans les molécules de dioxyde de carbone (CO_2) produites, et aucun monoxyde de carbone (CO) n'est formé.

Cependant, il est important de noter que la combustion réelle peut être affectée par des conditions variables, telles que la disponibilité en oxygène, la température et d'autres facteurs qui pourraient entraîner une combustion incomplète. Dans de telles conditions, une petite quantité de CO peut être produite. Dans le chauffage domestique, une combustion en régime sous-ventilé, peut être due, soit à une carence de ventilation (conduits obturés, trappes fermées, extracteurs en arrêt, ...),

Soit à un déficit de mélange au niveau du dispositif lui-même (tube à flamme encrassé, injecteurs de gaz (becs) obturés, injecteurs mal dimensionnés, ...). Avec les anomalies liées à la ventilation (compartiment) ou à l'exploitation (chauffage, chaudière), la combustion devient incomplète, et le CO yield augmente au niveau de la source de chaleur.

Le taux de production (ou rendement) du monoxyde de carbone, noté Y_{CO} est le débit (ou masse) produit de CO, par unité de débit (ou de masse) de combustible brûlé [11] :

$$y_{CO} = \frac{\dot{m}_{CO}}{\dot{m}_{fuel-brulé}} \quad (2.6)$$

Pour un fuel donné, le taux de production réduit ' f_i ' est donné par [11] :

$$f_i = \frac{y_i}{y_{i,max}} \quad (2.7)$$

y_i : Taux de production (kg/kg) pour 1 kg de vapeur de fuel consommé,

$y_{i,max}$: Taux de production maximale

*La combustion stœchiométrique donne l'équation suivante :

$$C_3H_8 + 5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + \gamma N_2$$

$$Y_{CO_2, \max} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{m_{fuel}} = \frac{3 \times (12 + 32)}{1 \times (3 \times 12 + 8 \times 1)} = \frac{3 \times 44}{1 \times 44} = 3 \quad (2.8)$$

$$Y_{CO_2, \max} = 3 \left(\frac{KG_{CO_2}}{Kg_{fuel}} \right), \quad Y_{CO} = 0$$

*Dans une combustion riche, on a :

$$2C_3H_8 + 5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + \gamma N_2 + C_3H_8$$

$$Y_{CO_2, \max} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{m_{fuel}} = \frac{3 \times (12 + 32)}{2 \times (3 \times 12 + 8 \times 1)} = \frac{3 \times 44}{2 \times 44} = 3/2 \quad (2.9)$$

$$Y_{CO_2, \max} = 3/2 \left(\frac{KG_{CO_2}}{Kg_{fuel}} \right), \quad Y_{CO} = 0$$

*Dans une combustion pauvre on a :

$$1C_3H_8 + \beta_R(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3CO + 4H_2 + \gamma N_2$$

$$Y_{CO, \max} = \frac{\dot{m}_{CO}}{m_{fuel}} = \frac{3 \times (12 + 16)}{1 \times (3 \times 12 + 8 \times 1)} = \frac{3 \times 28}{1 \times 44} = 1.91 \quad (2.10)$$

$$Y_{CO, \max} = 1.91$$

2.1.7 Les limites d'inflammabilité

La limite d'inflammabilité est la plage de concentrations de combustible dans l'air à laquelle une substance inflammable peut s'enflammer et brûler en présence d'une source d'inflammation, telle qu'une flamme ou une étincelle. La limite inférieure d'inflammabilité (LII ou LIF) : C'est la concentration minimale de combustible dans l'air en dessous de laquelle le mélange air-combustible est trop pauvre en combustible pour soutenir une combustion. En dessous de cette limite, le mélange est trop "pauvre" pour brûler.

2- La limite supérieure d'inflammabilité (LSI ou LSF) : C'est la concentration maximale de combustible dans l'air au-dessus de laquelle le mélange air-combustible est trop riche en combustible pour soutenir une combustion. Au-delà de cette limite, le mélange est trop "riche" pour brûler.

Entre la limite inférieure d'inflammabilité et la limite supérieure d'inflammabilité se trouve la plage d'inflammabilité, où le mélange air-combustible est dans une proportion (richesse Φ) adéquate pour brûler, pour le propane dans l'air, cette plage est : $\Phi \in [0.53 \rightarrow 1.5]$

2.1.8 La hauteur de flamme

La relation de Heskestad, également connue sous le nom de modèle Heskestad-Fauske, est une relation empirique largement utilisée pour estimer la hauteur moyenne de la flamme dans un incendie de liquide. Cette relation prend en compte des paramètres tels que la quantité de combustible impliqué, la densité du combustible, la surface enflammée, l'intensité de la source de chaleur, la taille de la zone d'incendie, etc.

La relation de Heskestad est basée sur des observations et des expérimentations réalisées sur des incendies réels et fournit une estimation approximative de la vitesse de propagation de la flamme, comme [2] :

$$H_f = \dot{Q} (0.235)^{2/5} - 1.02 (D_f) \quad (2.11)$$

$$D_f = \frac{\sqrt{(4 \times A_f)}}{\pi} \quad (2.12)$$

$$H_f = 0.235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D_f$$

Avec : H_f : La hauteur de flamme (m),

D_f : Diamètre équivalent du feu localisé (m),

\dot{Q} : Puissance dégagée par la combustion (kW)

2.1.9 Les corrélations

Les expériences de Beyler, en 1986 ont montré que des niveaux importants de CO, H_2 peuvent se produire à des richesses élevées.

*Corrélation CO- Φ : Corrélation de Go Huker Lattier s'exprime comme [4] :

$$\Phi < 0.5 \rightarrow Y_{CO} = 0$$

$$1.5 \geq \phi \geq 0.5, Y_{CO} = [0.2 \phi - 0.1] * Y_{CO, \max}$$

$$\phi > 1.5, Y_{CO} = 0.2 * Y_{CO, \max} = 0.382 \text{ (pour le propane)}$$

2.2 Le Fire Dynamic Simulator (FDS)

Le FDS[®] est un produit Américain, développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) depuis Ferrier 2000. 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 de simulation aux grandes échelles (LES) ou bien la technique de simulation numérique directe (DNS) 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 spécifiques (comme la flamme) 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.

2.2.1 Principe de la méthode de résolution sous FDS

Le principe de la méthode numérique réside en une approximation des dérivées spatiales par des différences centrées du second ordre. Un schéma prédicteur-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. à $t = t_{n+1}$, ρ , Y , (u,v,w) , H , P_o sont connus. Toutes les autres quantités découlent de ces variables,

Les particules sont injectées dans l'écoulement, les termes diffusifs et convectifs F_i de l'équation de conservation de la quantité de mouvement sont évalués ;

2. Les valeurs de ρ , Y , p_0 sont estimées au temps $n+1$ par un schéma d'Euler explicite. à partir de ces quantités, la divergence de la vitesse estimée est déduite ;

3. Résolution de l'équation de Poisson par une transformée de Fourier permettant de déterminer une estimation de la vitesse.

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

Conservation de la masse :

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho\vec{u}) = 0 \quad (2.13)$$

Conservation des espèces (CO) :

$$\frac{d}{dt}(\rho Y_{co}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho Y_{co} \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\rho D)_{co} \vec{\nabla} Y_e + W'''_{co}, \dot{w}''''_{co} = 0 \text{ (espèce inerte)} \quad (2.14)$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \left(\frac{d\vec{u}}{dt} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right) + \vec{\nabla} P = \rho \vec{g} + \vec{f} + \text{div} \cdot \vec{\tau} \quad (2.15)$$

Conservation de l'énergie :

$$\frac{d}{dt}(\rho h) + \vec{\nabla} \cdot (\rho h \vec{u}) - \frac{dp}{dt} = \dot{q}''' + \vec{\nabla} \cdot k \vec{\nabla} T + \vec{\nabla} \cdot \sum_{\text{espèces } e} h_e (\rho D)_e \vec{\nabla} Y_{co} \quad (2.16)$$

Dans l'équation, $\frac{dp}{dt} = \frac{dp}{dt} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} p$ représente la dérivée particulaire de la pression p .

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

$$p = p_0 - \rho_{\infty} g z + \tilde{p} \quad (2.17)$$

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

$$p_0(t) = \rho T R \sum_{\text{espèces } e} \left(\frac{Y_e}{M_e} \right) \quad (2.18)$$

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 :

$$p_0(t) = \frac{\gamma-1}{\gamma} \rho h \quad (2.19)$$

$$\frac{dp_0}{dt} = \frac{\gamma-1}{V} \left(\int_{\Omega} \dot{q}''' dV + \int_{\partial\Omega} k \vec{\nabla} T d\vec{s} + \sum_{\text{espèces } e} \int_{\partial\Omega} c_{p,e} T \rho D d\vec{s} \right) - \frac{\gamma p_0}{V} \int_{\partial\Omega} \vec{u} d\vec{s} \quad (2.20)$$

La divergence de la vitesse est ensuite extraite de l'équation (59) de conservation des espèces :

$$\text{div } \vec{u} = \frac{\gamma-1}{\gamma p_0} \left(\dot{q}''' + \vec{\nabla} \cdot k \vec{\nabla} T + \vec{\nabla} \cdot \sum_{\text{espèces } e} c_{p,e} T \rho D \vec{\nabla} Y_0 - \frac{1}{\gamma-1} \frac{dp_0}{dt} \right) \quad (2.21)$$

Enfin, une pseudo-pression totale définie par $\vec{\nabla} H = \frac{1}{2} \vec{\nabla} |\vec{u}|^2 + \frac{\vec{\nabla} \bar{p}}{\rho}$ est introduite dans l'équation (2.26) :

$$\frac{d\vec{u}}{dt} + \vec{\nabla} H = \frac{1}{\rho} \left((\rho - \rho_{\infty}) \vec{g} + \vec{f} + \overrightarrow{\text{div}} \cdot \vec{\tau} \right) + \vec{u} \times \vec{\omega} \quad (2.22)$$

La dérivée de l'équation (59) donne une équation dite de Poisson pour la pression :

$$\Delta H = - \frac{\partial(\text{div } \vec{u})}{\partial t} - \text{div } \vec{F}; \vec{F} = -\vec{u} \times \vec{\omega} - \frac{1}{\rho} \left((\rho - \rho_{\infty}) \vec{g} + \vec{f} + \overrightarrow{\text{div}} \cdot \vec{\tau} \right) \quad (2.23)$$

2.2.2 Utilisation de la simulation aux grandes échelles (LES) 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 $k - \varepsilon$ et ses variantes (réalisable, RNG, ...) 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 [10].

L'approche par un modèle de simulation à grandes échelles (LES) de la turbulence représente une rupture avec les approches antérieures. Si l'on s'affranchit de certaines difficultés précédemment rencontrées, d'autres non moins délicats 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 [10].

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.

2.2.3 Utilisation de la LES dans le solveur 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 μ_t [10].

La forme de cette modélisation caractérise les différents modèles de sous-maillages. Le modèle de viscosité dans l'espace physique de Smagorinsky est certainement le plus populaire. Il introduit une dépendance de μ 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 des cellules du maillage, la conductivité thermique ainsi que la diffusivité matérielle sont calculées sur la base de cette viscosité [10].

Les nombres de Prandtl, de Schmidt ainsi que la constante empirique C , ont des valeurs basées sur des simulations de panache de fumées, $Pr = Sc = 0.2$ et $C_{Smag} = 0.14$

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 termes 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 [10]

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 descendre jusqu'à l'échelle de Kolmogorov doit varier comme $R^{9/4}$.

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. Néanmoins, des procédures numériques usuelles consistent à imposer une taille minimale

(δX_{cell}) pour les cellules du maillage se situant aux voisinages du foyer (flamme+panache) et de relâcher au fur et à mesure qu'on s'éloigne. En accord avec les directives de l'Agence

Américaine de Régulation Nucléaire (NUREG), le rapport des tailles ($\delta X_{cell}/D^*$) doit être compris entre 1/16 et 1/4 [7], afin de pouvoir capter les structures fines du feu. D^*

représente une taille caractéristique physique des structures de feu, dépendant essentiellement de la puissance au foyer \dot{Q}_f et des conditions ambiantes ($\rho_\infty, p_\infty, g, T_\infty$).

Ceci dit et en fonction des conditions de ventilation et de turbulence, il serait toujours utile de vérifier l'indépendance d'un ou plusieurs quantités physiques (caractérisant le phénomène étudié) vis-à-vis du nombre de cellules dans le domaine de calcul.

Conclusion

La formulation mathématique et la modélisation de la prédiction numérique de la dispersion du monoxyde de carbone dans les usages d'habitation sont des outils essentiels pour évaluer et prévenir les risques associés à ce gaz toxique. Grâce à ces approches, il est possible d'améliorer la sécurité des occupants en identifiant les zones à risque, en optimisant les mesures préventives et en développant des stratégies d'intervention efficaces.

Le système d'équations, est résolu numériquement, dans le sens des différences finies, par l'utilisation du solveur NIST-FDS[®].

Chapitre 03 : Calcul par simulation

Introduction

Dans ce chapitre consacré aux calculs par simulation de la prédiction numérique de la dispersion du monoxyde de carbone (CO) dans un usage d'habitation, nous explorons les méthodes numériques permettant d'évaluer et de modéliser la dispersion de ce gaz toxique. Les simulations par l'outil FDS® offrent une approche efficace pour étudier les phénomènes complexes liés à la dispersion du CO, en prenant en compte les interactions entre les sources de CO, la ventilation et la turbulence dans le calcul. Grâce à ces simulations, nous pouvons estimer les concentrations de CO dans différentes zones de l'habitation, optimiser les systèmes de ventilation et élaborer des stratégies de sécurité adaptées.

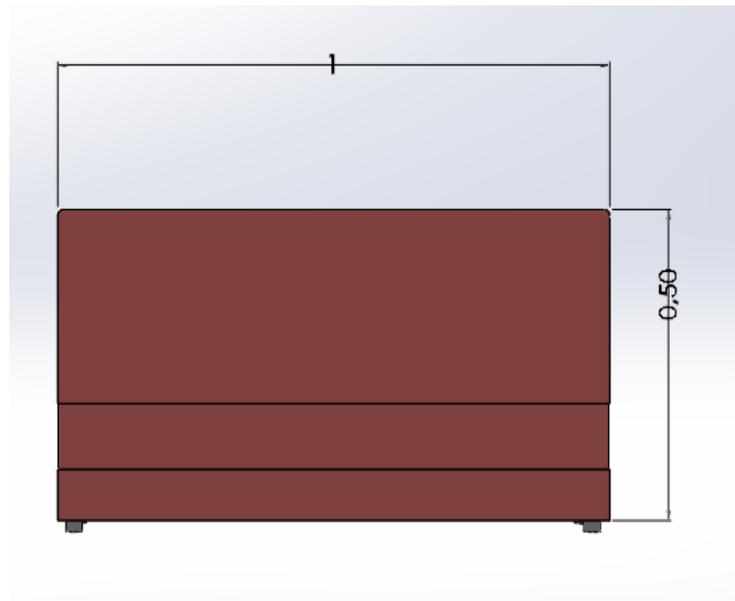
3.1 Présentation du module de chauffage

Description :

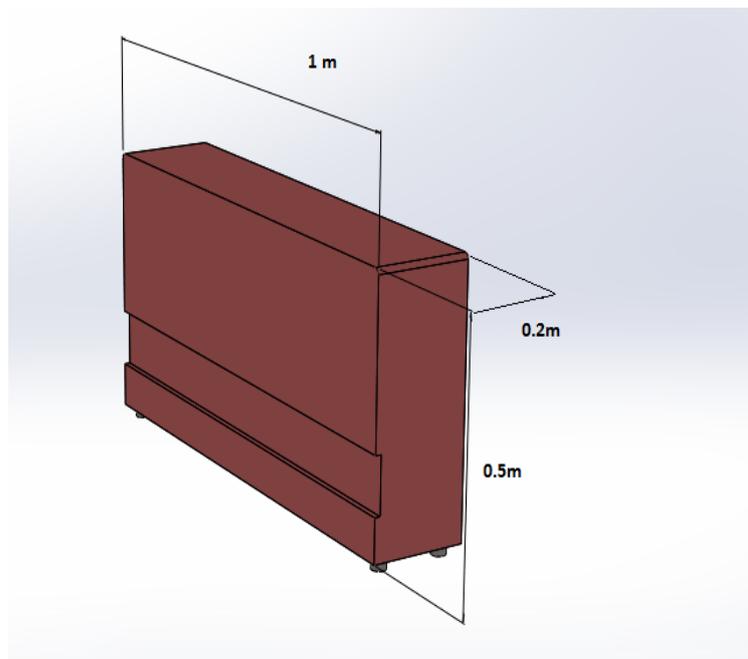
Le module de chauffage d'étude, est un produit Algérien, commercialisé, de couleur Marron, ayant les dimensions de 100x50x20 cm et pesant 19 kg (fig. 3.1).



Figure 3.1 : Image du chauffage domestique étudié



(A)



(B)

Figure 3.2 : Dimensions globales de l'élément du chauffage

Quelques caractéristiques technico-commerciales sont dressées sur le tableau ci-dessous

Tableau 3.1. Caractéristiques de l'élément de chauffage

Caractéristique	Valeur	Acquisition (fiche technique)
Volume total (L)	100	Mesure directe
Rendement globale (%)	84%	Fiche technique
Taux de dégagement de chaleurs [KW]	12.0	Fiche technique
Quantité de gaz C_3H_8 consommée (m^3/h)	1.20	Fiche technique
Diamètre injecteur bruleur (mm)	2.90	Mesure directe (fig 3.3.A)
Pression de service (mbar)	18 à 21 mbar	Fiche technique
Commande : Manuel		
Allumage : Bouton		
Méthode Allumage : piézoélectrique		
Vue sur les flammes : Façade.		
Régulation par thermostat (C°)	13-38	Fiche technique



(A)



(B)

Figure 3.3 : Prises de mesures pour les orifices de gaz

La surface totale des orifices est : 0.024 m²

Le FDS modélise le feu par une surface rectangulaire, (ou carré) alors on va convertir la surface des orifices en surface triangulaire A pool pour calculer ses dimensions a et b.

On suppose que a = b donc $a = \sqrt{A_{pool}} = \sqrt{0.1} = 0.31\text{m}$

Ça nous permet de préserver la densité de puissance thermique (HRRPUA) à sa valeur pratique du chauffage. Pour le chauffage d'étude, on utilisera le propane comme le combustible, utilisée pour toutes les simulations.

$$\text{HRRPUA} = \frac{Q}{A_{pool}} = \frac{12}{0.1} = 120 \text{ KW/m}^2$$

3.2 Présentation du compartiment

On a une maison des dimensions 15*7*6 m, composée d'un rez-de chaussée et d'un étage supérieur, cage d'escalier, une porte, 3 fenêtres, une trappe, un chauffage + une gaine d'évacuation des fumées (fig 3.4)

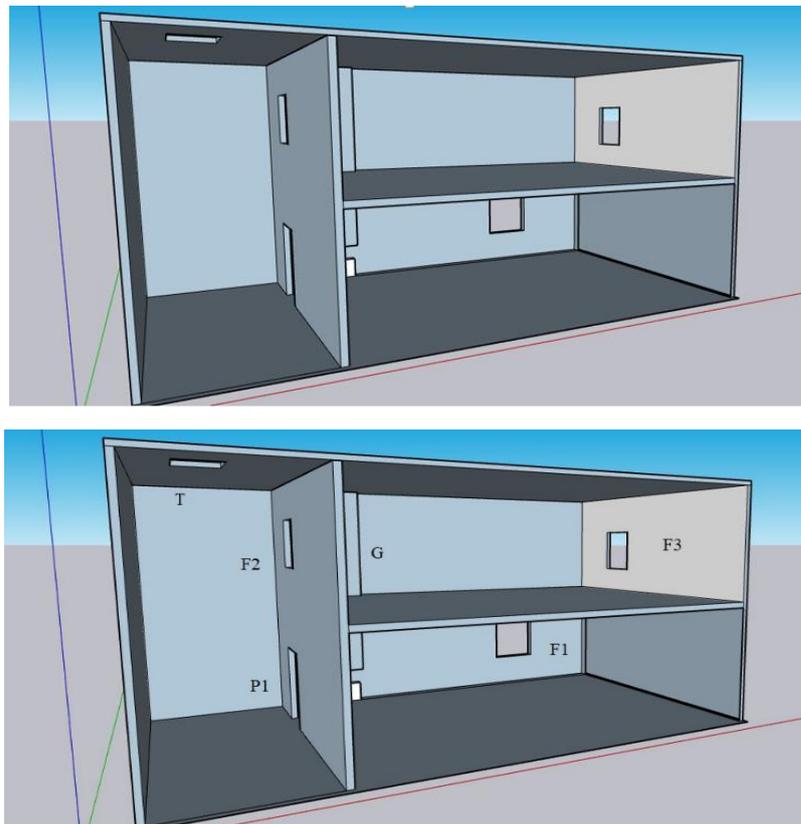


Figure 3.4: Plan 3D du compartiment (deux angles de vue)

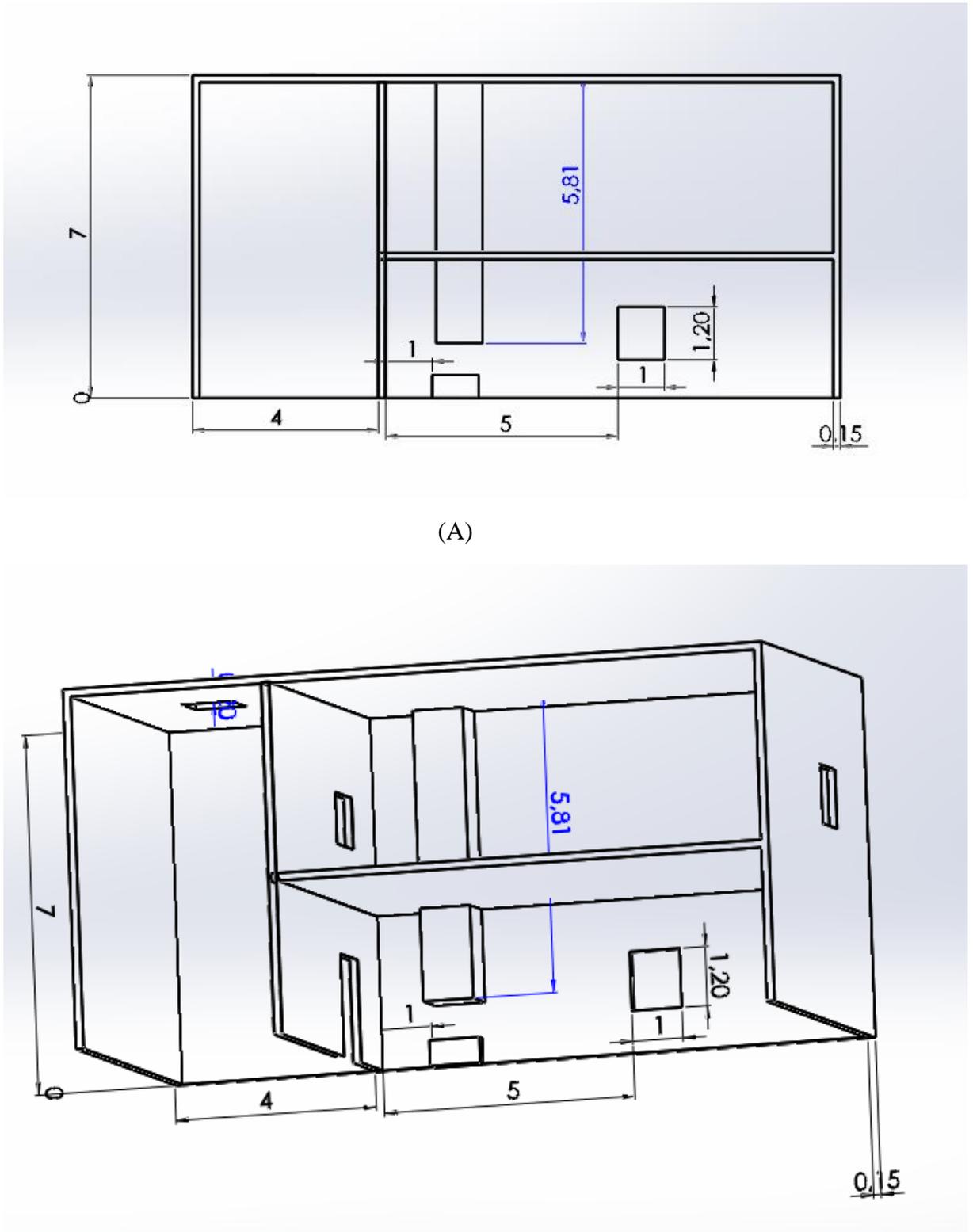


Figure 3.5 : Schématisation des dimensions du compartiment et du bac de chauffage (par SolidWorks)

Les éléments de construction permettant de ventiler naturellement le local, aux diverses dimensions, selon le tableau ci-dessous.

Tableau 3.2 : Dimensions principales des éléments de ventilation naturelle

	Porte 1	Fenêtre 1	Fenêtre 2 intérieure	Fenêtre 3 extérieure	Gaine	Trappe
Niveau	RDC	RDC	R+1	R+1	RDC	R+1
Hauteur H(m) ↓	2.0	1.20	1.20	1.20	0.20	1.00
Largeur b(m) ↔	1.20	1.00	1.00	1.00	0.15	1.00

En accord avec la configuration d'ouverture (O) ou de fermeture (F) d'un élément de ventilation naturelle (E_i), on peut distinguer trois macro-situations (case1, case2, case3) avec des sous-configurations (casex.y). Le tableau ci-dessous décrit les différentes configurations, associées aux facteurs d'ouvertures correspondants.

Tableau 3.3 Facteurs d'ouverture pour diverses configurations

Configuration	Case 0 100%	Case 1	Case 2.1	Case 2.2	Case 2.3	Case 2.4	Case 3.1	Case 3.2	Case 3.3	Case 3.4
Disposition des ouvertures	P=F F1=F F2=F F3=F T=F G=F	P=F F1=F F2=F F3=F T=O G=F	P=F F1=O F2=F F3=F T=O G=F	P=O F1=F F2=F F3=F T=O G=F	P=O F1=O F2=F F3=F T=O G=F	P=O F1=O F2=F F3=F T=O G=O	P=O F1=F F2=O F3=F T=O G=F	P=O F1=F F2=O F3=O T=O G=F	P=O F1=F F2=O F3=O T=O G=O	P=O F1=F F2=O F3=O T=F G=O
$A_{op} (m^2)$	0	1	22	3.4	4.6	4.63	4.6	5.8	5.83	4.83
$H_{eq} (m)$	0	1.128	1.167	1.92	1.914	1.60	1.60	1.51	1.51	1.59
$O (m^{0.5})$	0	2.82×10^{-3}	6.32×10^{-3}	9.82×10^{-3}	1.33×10^{-2}	1.63×10^{-2}	1.33×10^{-2}	1.68×10^{-2}	1.68×10^{-2}	1.4×10^{-2}

3.3 Estimation des tailles caractéristiques des cellules

En fonction de la puissance nominale du feu, la taille caractéristique Δx_{LES} utilisée dans les calculs de simulation à grandes échelles (voir manuel FDS) pour capter le feu D^* , est donnée par les normes de la NUREG1827 comme [7] :

$$D^* = \left[\frac{\dot{Q}}{\rho_{air} C_p air T_{air} \sqrt{g}} \right]^{2/5} \quad (3.1)$$

et
$$16 \geq \frac{D^*}{\Delta x_{LES}} \geq 4 \quad (3.2)$$

où : Δx_{LES} est la taille caractéristique de la cellule nécessaire à la capture de la structure du feu D^* , est la taille infinitésimale d'une structure de feu, ρ , C_p air désignent respectivement, la masse volumique, et la chaleur massique de l'air à la température, T air, Q en kilowatts est le taux de dégagement de chaleur lors de la combustion.

$$\rho_{air} = P / (rT_{air}) = 101325 / (287 \cdot T_{air}) = 1.2049 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p_{air}} = 1005 \text{ J/Kg.K}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} \text{ la puissance du chauffage en kilowatts}$$

Il y a trois types de maillage ; maillage fin, maillage moyen, maillage grossier. On peut les obtenir par variation du rapport $D^*/\Delta x_{LES}$ dans l'intervalle 4 ; 10 et 16.

$$\text{Maillage grossier : } \frac{D^*}{\Delta x_{LES}} = 4$$

$$\text{Maillage moyen : } \frac{D^*}{\Delta x_{LES}} = 10$$

$$\text{Maillage fin : } \frac{D^*}{\Delta x_{LES}} = 16$$

En fonction des dimensions du domaine de calcul, $X_{max} = 15.6$, $Y_{max} = 7.5$, $Z_{max} = 6.5$ et on a « Ndivx » cellules dans la direction X, « Ndivy » cellules dans la direction Y, « Ndivz » cellules dans la direction Z.

Avant de calculer le nombre total des cellules, il faut calculer le nombre des cellules dans les trois directions x, y, z en divisant les dimensions de domaine de calcul, sur le Δx de type de maillage qu'on a choisi et

Le nombre total de cellules dans le domaine de calcul = $N_{divx} \cdot N_{divy} \cdot N_{divz}$

Tableau 3.4: Valeurs des pas Δx_{LES} pour les différentes tailles de maillage

\dot{Q} fire	D^*	$\Delta x_{grossier}(m)$	$\Delta x_{moyen}(m)$	$\Delta x_{fin}(m)$
12 KW	0.01031	2.577×10^{-3}	1.031×10^{-3}	6.443×10^{-4}

Tableau 3.5: Valeurs du nombre de cellules pour chaque maillage

Le maillage	Nombre de cellules/direction	Nombre de cellules
Grossier	$N \text{ div } x = \frac{X_{max}}{\Delta x \text{ grossier}} =$ 6052.37	44 420 437(≈44 millions)
	$N \text{ div } y = \frac{Y_{max}}{\Delta x \text{ grossier}} =$ 2910.36	
	$N \text{ div } z = \frac{Z_{max}}{\Delta x \text{ grossier}} =$ 2521.8	
Moyen	$N \text{ div } x = \frac{X_{max}}{\Delta x \text{ moyen}} =$ 15130.94	693 941 964(≈700 millions)
	$N \text{ div } y = \frac{Y_{max}}{\Delta x \text{ moyen}} = 7274.5$	
	$N \text{ div } z = \frac{Z_{max}}{\Delta x \text{ moyen}} = 6304.55$	
Fin	$N \text{ div } x = \frac{X_{max}}{\Delta x \text{ fin}} = 24209.69$	284 274 126 812
	$N \text{ div } y = \frac{Y_{max}}{\Delta x \text{ fin}} = 11640.54$	
	$N \text{ div } z = \frac{Z_{max}}{\Delta x \text{ fin}} = 10087.37$	

Les résultats de calcul de nombre des cellules pour chaque type de maillage, font ressortir de grands nombres, car le domaine de calcul est très grand par rapport au puissance Q et c'est ce qui crée des difficultés pour faire la simulation avec ce très grand nombre de cellules et prendre long temps alors qu'on a essayé de trouver une solution technique pour valider un bon maillage.

3.4 Autre critère de maillage

Pour faciliter la simulation et réduire le temps de calcul, on va choisir un autre maillage par l'aide de la corrélation de Heskested (2.11) mentionnée en chapitre 2 par l'observation de la hauteur de flamme en direct, et sur le FDS, en utilisant 2 cas de division de maillage grossier sur $\Delta_{cell} = 0.1m$ et $\Delta_{cell} = 0.15m$ et on va choisir le maillage le plus proche aux résultats réels.

On applique la formule de Heskested (2.11) pour un diamètre équivalent, du bac de chauffage, qu'on trouve égal à $D_f = 0.357m$, correspondant à une hauteur de flamme $H_f \sim 0.27m$.

A-Pour $\Delta x = 0.15 m$

$$N_x = \frac{15.6}{0.15} = 104$$

$$N_y = \frac{7.5}{0.15} = 50$$

$$N_z = \frac{6.5}{0.15} = 44$$

Nombre de cellules est : $N_{cell} = 228800$

La simulation sur FDS donne les résultats suivants ; $H_f \text{ min} = 0.18 m$, $H_f \text{ max} = 0.35 m$, ce qui représente un écart relatif

$$\sigma_1 = \frac{0.18 - 0.27}{0.18} = -55 \%$$

$$\sigma_2 = \frac{0.35 - 0.27}{0.35} = 22 \%$$

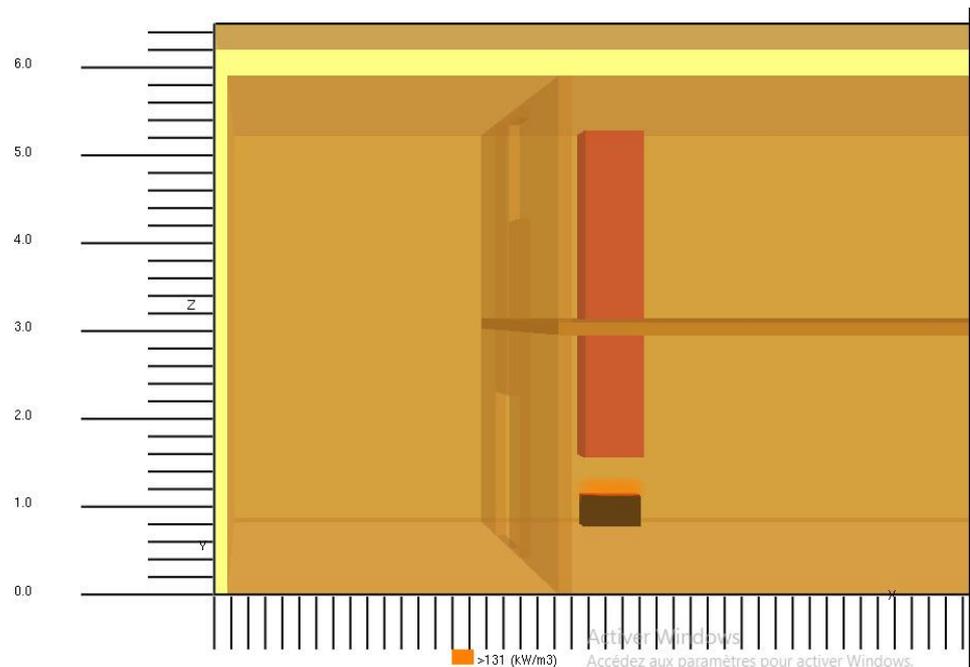


Figure 3.6.A : Image instantanée (FDS) montrant la hauteur maximale de la flamme ($\Delta x = 0.15m$)

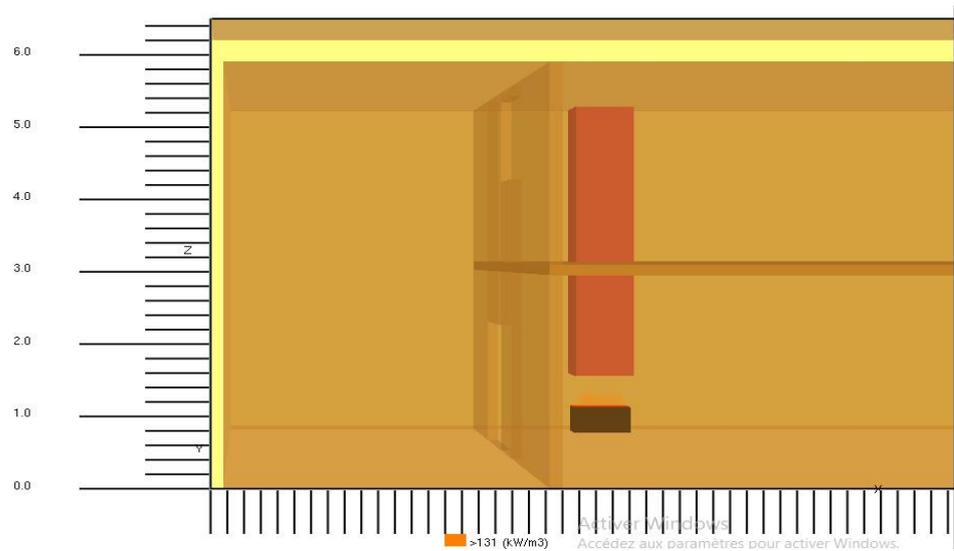


Figure 3.6.B : Image instantanée (FDS) montrant la hauteur minimale de la flamme ($\Delta x = 0.15\text{m}$)

B-Pour $\Delta x = 0.1\text{m}$

$$N_x = \frac{15.6}{0.1} = 156$$

$$N_y = \frac{7.5}{0.1} = 75$$

$$N_z = \frac{6.5}{0.1} = 65$$

Nombre de cellules est : $N_{cell} = 760500$

La simulation sur FDS donne les résultats suivants, $H_f \text{ min} = 0.19 \text{ m}$, $H_f \text{ max} = 0.3 \text{ m}$

$$\sigma_1 = \frac{0.19-0.27}{0.19} = -44.2\%, \text{ ce qui représente un écart relatif par rapport a la corrélation}$$

$$\sigma_2 = \frac{0.3-0.27}{0.3} = 10 \%$$

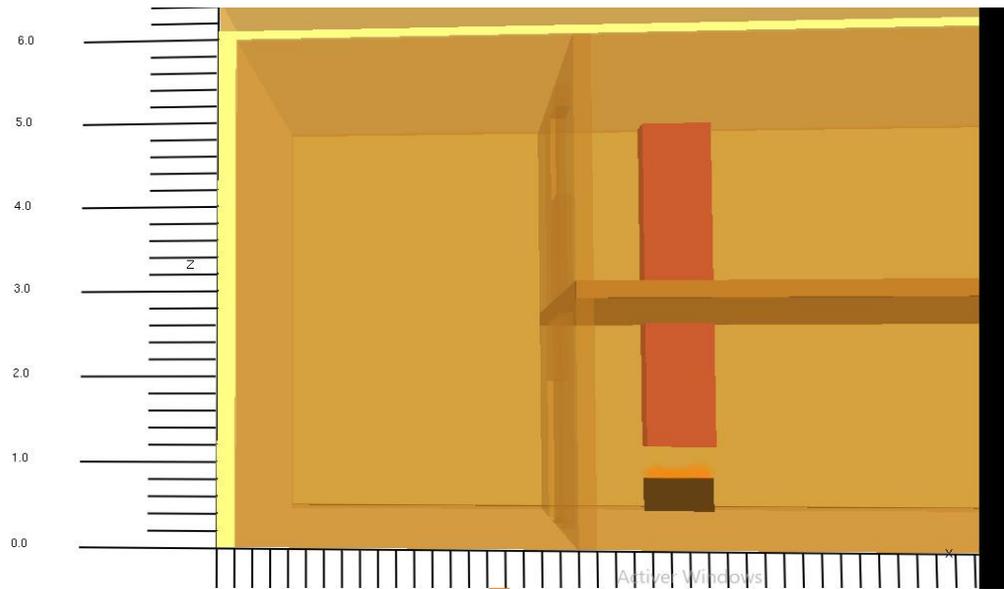


Figure3.7. A : Image montrant la hauteur maximale de la flamme ($\Delta x = 0.1m$)

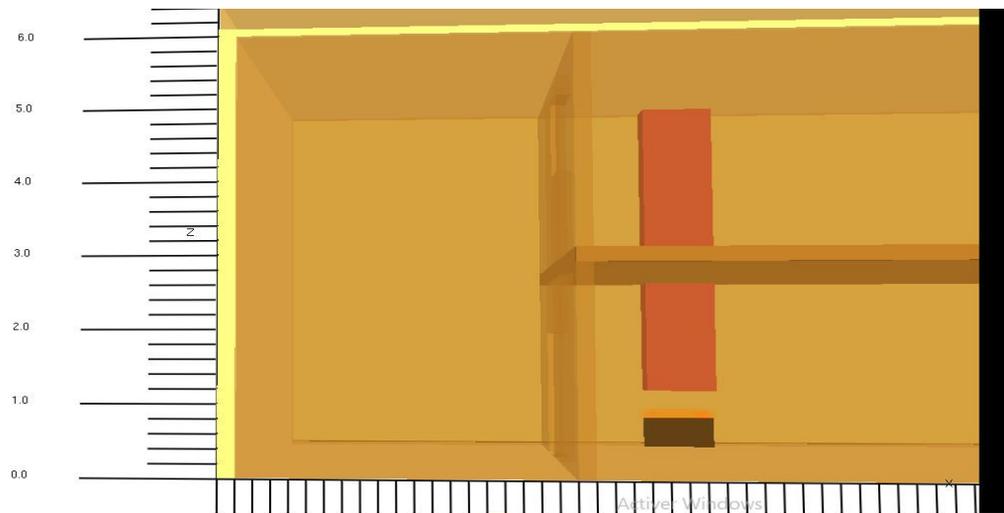


Figure3.7. B : Image instantanée (FDS) montrant la hauteur minimale de la flamme ($\Delta x = 0.1m$)

Dans ce cas, la flamme (numérique) est intermittente entre 19cm et 30cm de hauteur, ce qui semble plus proche de la hauteur moyenne donnée par la corrélation de HESKESTAD ($H_f \approx 27cm$).

La grille générée contenant $N_{cell}=760500$ cellules sera retenue et utilisée, pour la suite des calculs.

3.5 Temps des calculs

Après la validation et l'utilisation de maillage de $\Delta x = 0.1$, on a comparé le temps physique (temps d'observation) avec le CPU time (temps d'exécution du FDS sur l'ordinateur) et on a obtenu les résultats suivants :

Tableau 3.6 : Données relatives au temps de calcul

Temps physique (min)	1	5	10	15	20
Temps CPU (h)	0.7	3.3	6.8	10.6	15.3

Le déroulement des simulations, s’est fait sur un ordinateur personnel (CPU=2.79Ghz ; RAM 8GB), avec un temps de calcul assez important (l’ordre de la journée) ce qui nous a limité à $t_{phys.}=20$ minutes, comme temps d’observation (fig 3.8).

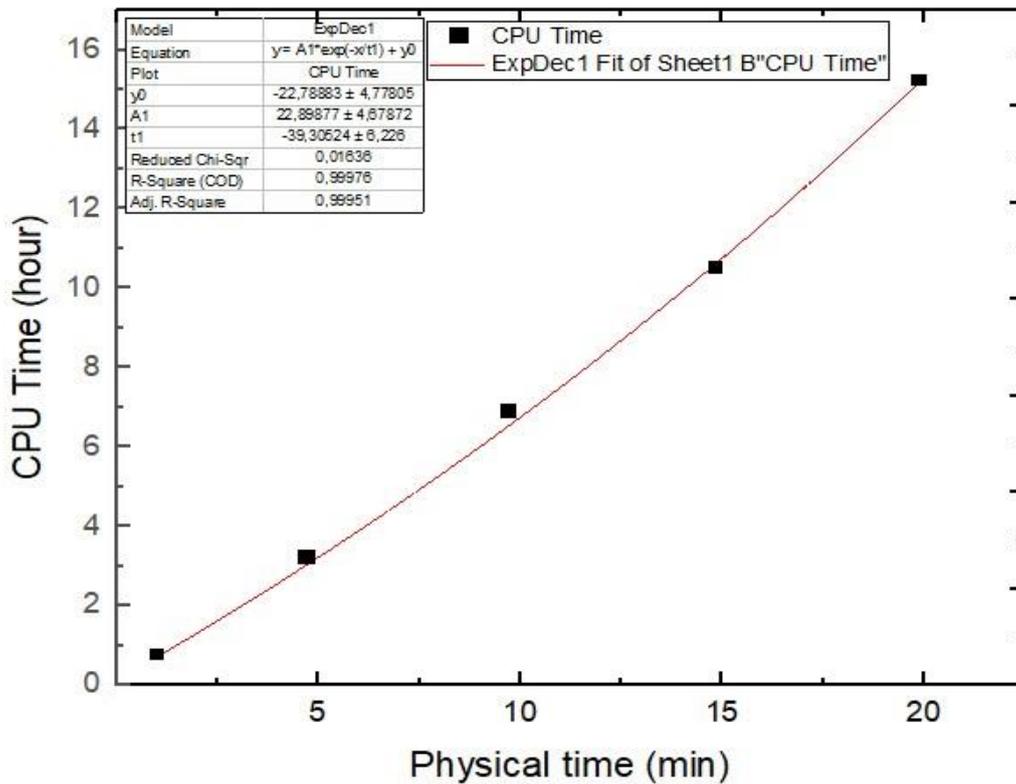


Figure 3.8 : Interpolation du temps CPU en fonction du temps physique

Le temps de calcul (CPU) est donc lié au temps d’observation par :

$$Y = A1 \cdot e^{\frac{-x}{t1}} \cdot y0,$$

avec : $A1=22.89877 \mp 4.67872$

$t1=-39.30624 \mp 6.226$

$y0=-22.78883 \mp 4.77805$

3.6 Le calcul de débit d'air, richesse, CO yield

Chaque cas a ses caractéristiques spécifiques, avant de faire la simulation il faut avoir le CO Yield pour obtenir des résultats réels et écrire le CO Yield dans l'input de FDS. Le calcul de CO Yield passe par le calcul du facteur d'ouverture, le débit d'air, la richesse, les résultats sont affichés dans le tableau (3.6)

Tableau 3.7 : Tableau des résultats de débit d'air, richesse, CO Yield

Cas	0	1	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
Débit d'air (Kg/s)	0	0.53	2.188	2.35	2.33	2.9	2.9	3.56	3.58	3.04
La richesse (Φ)	0	7.47	1.33	1.45	1.5	1.36	1.36	1.11	1.1062	1.3
CO Yield	0	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.235	0.23	0.3

Comme mentionné dans le chapitre 2, si le rapport de mélange (richesse) n'appartient pas à l'intervalle d'inflammabilité $\Phi \in [0,53 \rightarrow 1,5]$, Il n'y a pas de combustion. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'étudier les cas 0 et 1.

3.7 Modalisations du cas d'étude

Dans tous les cas étudiés, il faut programmer l'input de FDS avec les conditions réels de la maison. On prend :

&MESH IJK=156, 75,65, XB=0,15.6,0,7.5,0,6.5/ le maillage et le domaine de calcul

&TIME T_END=1200. / ; Temps physique d'observation (20 minutes)

*&MISC RADIATION=.FALSE. **TMPA =10/** ; Pas de rayonnement, température ambiante = 10°C (**cas d'hiver**)

* &MATL ID= 'BRICK', CONDUCTIVITY= 0.84, SPECIFIC_HEAT= 0.80, DENSITY= 1350. / Wall material &SURF ID= 'BRICK WALL', MATL_ID= 'BRICK', THICKNESS= 0.015, EMISSIVITY = 1/; Les caractéristiques du murs en brique

*&SURF ID='FIRE', HRRPUA=120 /; Le taux de dégagement de chaleur par unité de surface

&VENT XB= 5.5, 6.0, 6.45, 6.65, 0.5, 0.5, SURF_ID='FIRE', COLOR='RED'/ Les dimensions du pool du feu

CO_PRODUCTION=.FALSE./ Pas de production du CO

CO_YIELD=0.382,/ Le taux de production du CO

3.7.1 Emplacement des capteurs de monoxyde de carbone

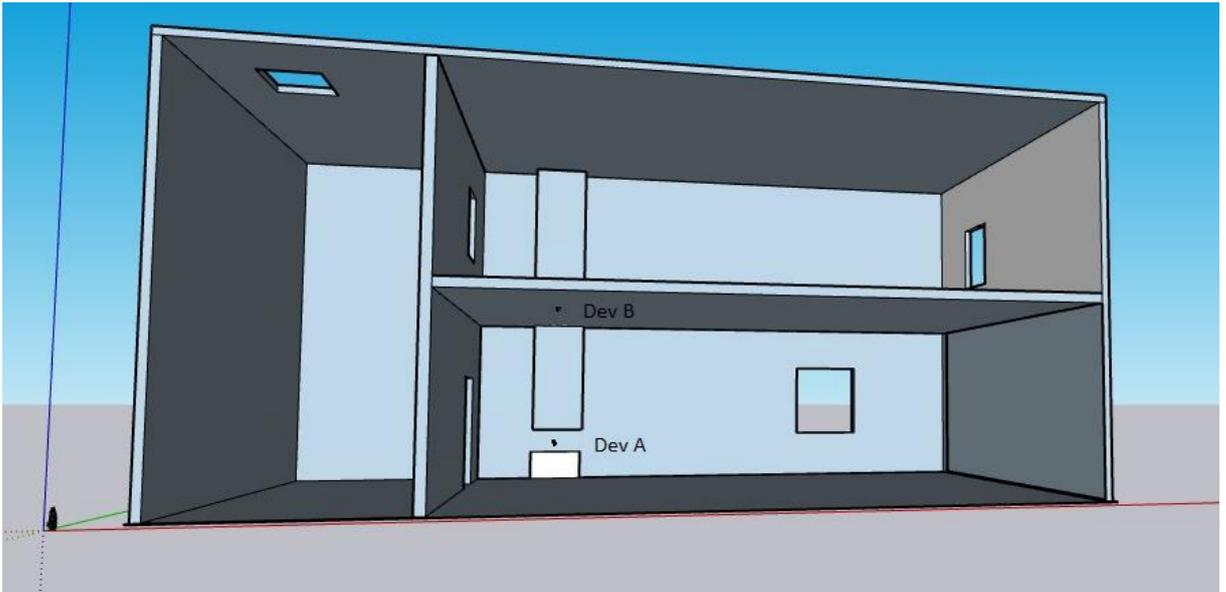


Figure 3.9.A : L'emplacement des capteurs du CO

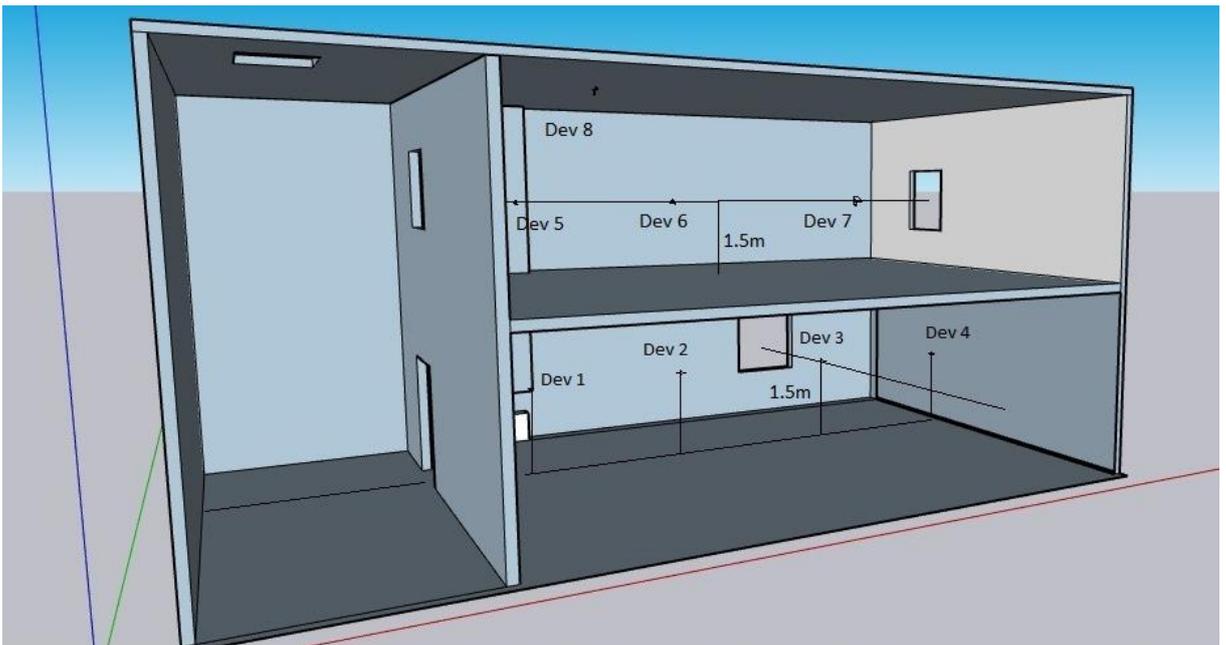


Figure 3.9.B : L'emplacement des capteurs du CO

avec:

Capteurs RDC Z= 1.5m

Dev A = Dev on top of heater → au-dessus du chauffage

Dev B = dev ceiling → Capteur au plafond

Dev 1 : YCO gate-heater → Capteur dans le prolongement de la porte

Dev 2 : YCO +3m → Deuxième capteur dans le prolongement de la porte +3m

Dev3 : YCO gate-window → Capteur dans le prolongement de la fenêtre

Dev4 : YCO +3m → Deuxième capteur dans le prolongement de la fenêtre +3m

Les capteurs du R+1 ont une hauteur de $Z=1.5\text{m}$ du sol du premier étage,

Dev 5 Dev6 Dev7 Dev8

3.7.2 : Divers configurations de ventilation naturelle

Cas 2.1

Le cas 2.1, toutes les ouvertures sont fermées sauf la fenêtre du RDC, ce qui correspond a un facteur d'ouverture $O=6.32 \times 10^{-3} (m^{0.5})$

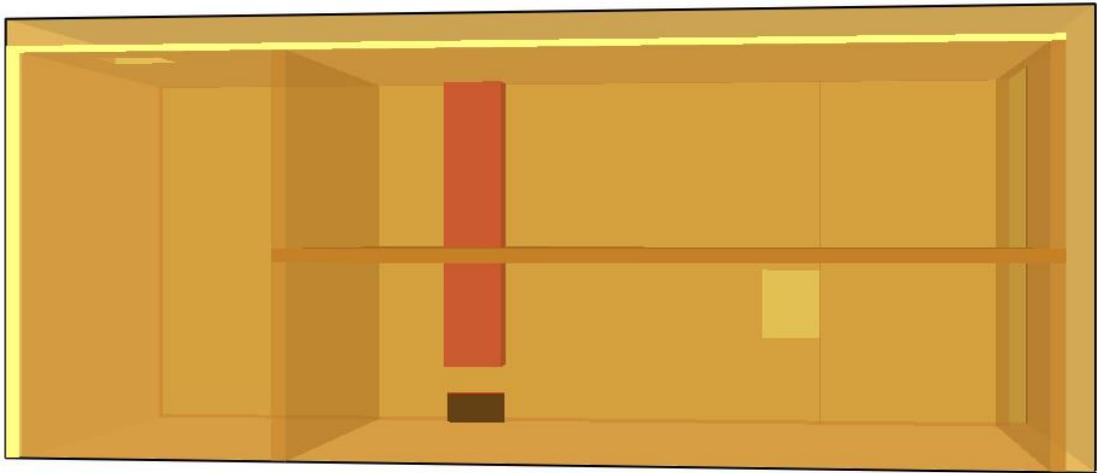


Figure 3.10 : Image montrant la configuration du cas 2.1

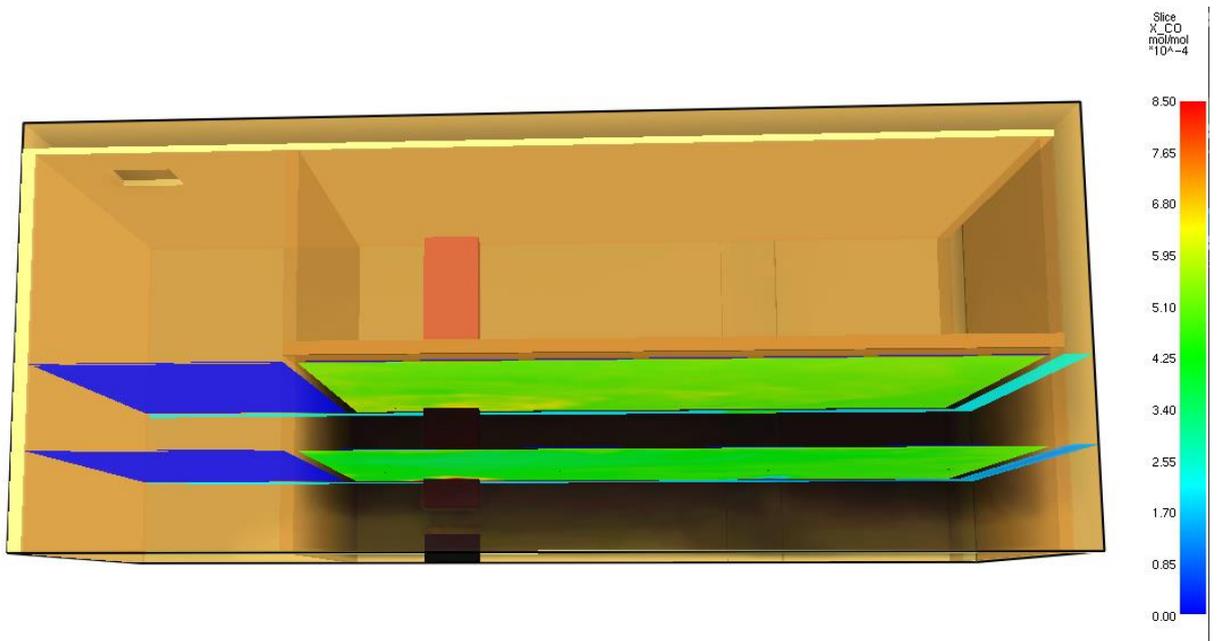


Figure 3.11 : Contours spatiaux (plan z) de monoxyde de carbone après 600s (cas 2.1)

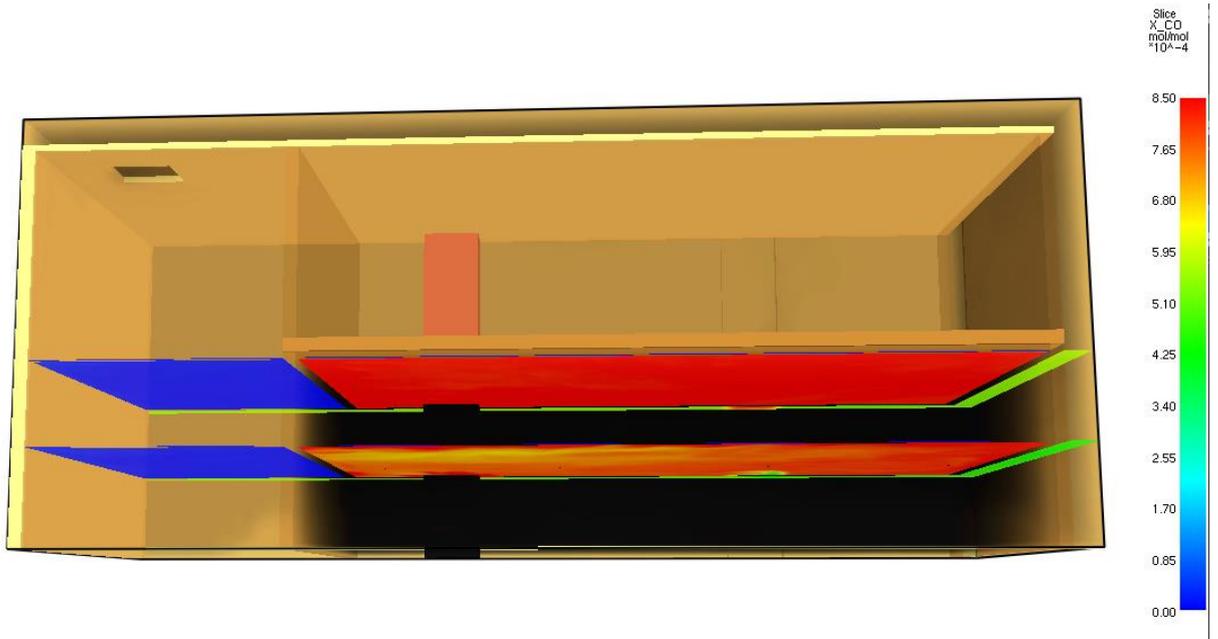


Figure 3.12 : Contours spatiaux de monoxyde de carbone après 1200s (cas 2.1)

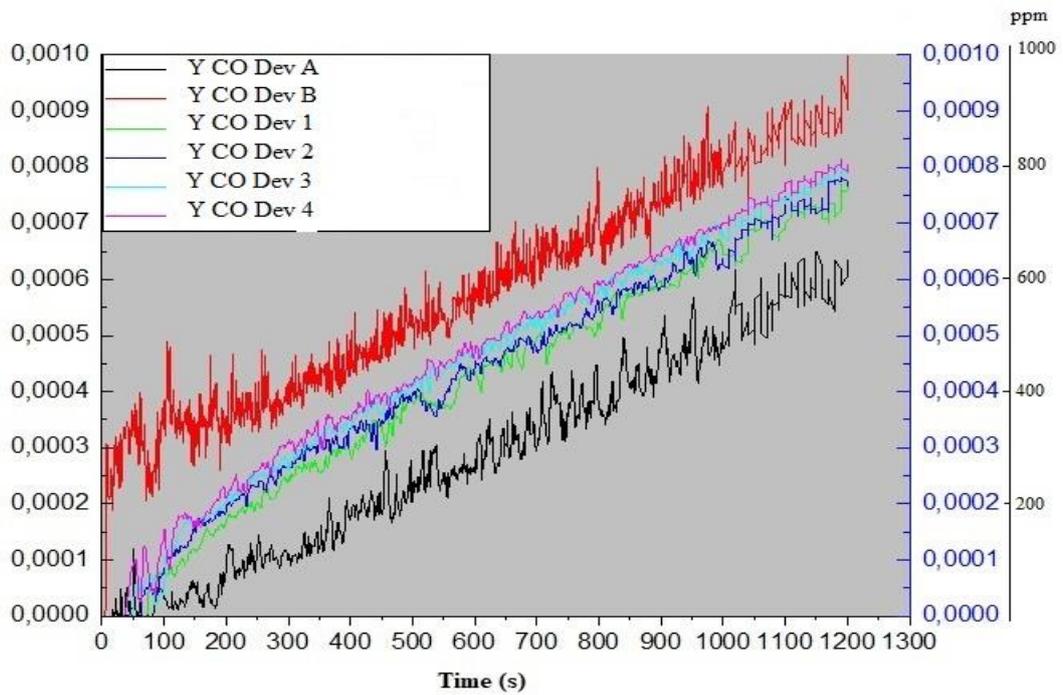


Figure 3.13 : Résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.1)

Après une période de 20 minutes, l'analyse du rendement du monoxyde de carbone (CO) sur le graphique de la (figure 3.13) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du plafond dépasse 0,001, soit l'équivalent de 1000 ppm, tandis que les niveaux de CO situés entre 0,0006 et 0,0008 (soit de 600 ppm à 800 ppm) sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau 1.1 (page 9), il est conclu qu'une exposition prolongée d'une heure ou plus à ces

niveaux de monoxyde de carbone entraînera une perte de connaissance, principalement au niveau du plafond, tandis que les autres niveaux présentent un risque de toxicité plus faible, pouvant provoquer mal de tête, nausée et étourdissements, la concentration de monoxyde de carbone mesurée dans les capteurs de niveau humain (capteurs 1,2,3,4) $z=1.5\text{m}$ est alarmante, indiquant des niveaux très élevés de ce gaz toxique. Par conséquent, il est nécessaire de ventiler les locaux en ouvrant les fenêtres et d'éteindre le système de chauffage avant le début de l'exposition d'une heure ou moins.

Cas 2.2

Le cas 2.2 la porte et la trappe sont ouvertes, le reste est fermé, ce qui correspond au facteur d'ouverture $O=9.82 \times 10^{-3} (m^{0.5})$

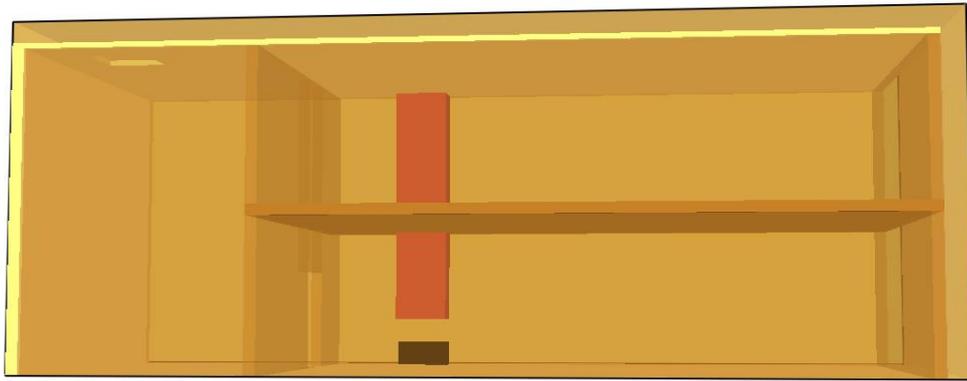


Figure 3.14 : Image montrant la configuration (cas 2.2)

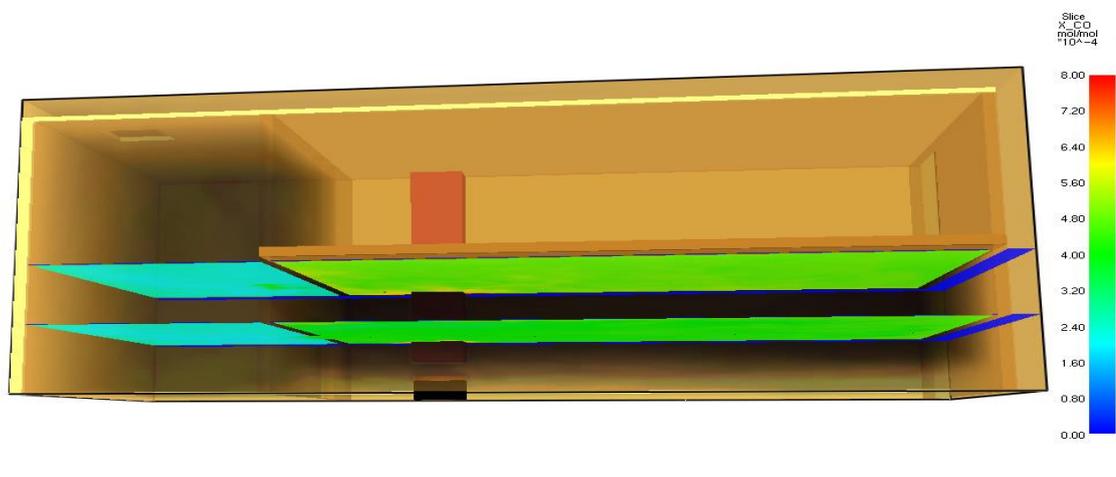


Figure 3.15 : Contours spatiaux de monoxyde de carbone après 600s (cas 2.2)

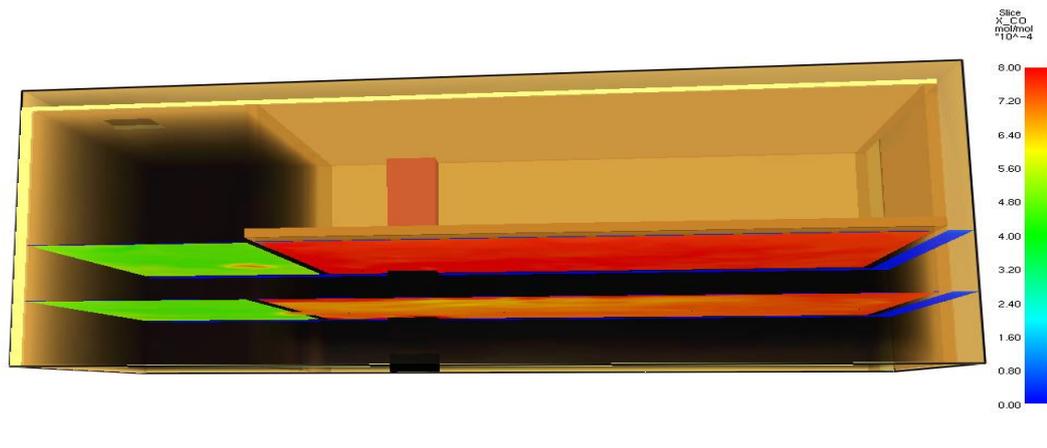


Figure 3.16 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas2.2)

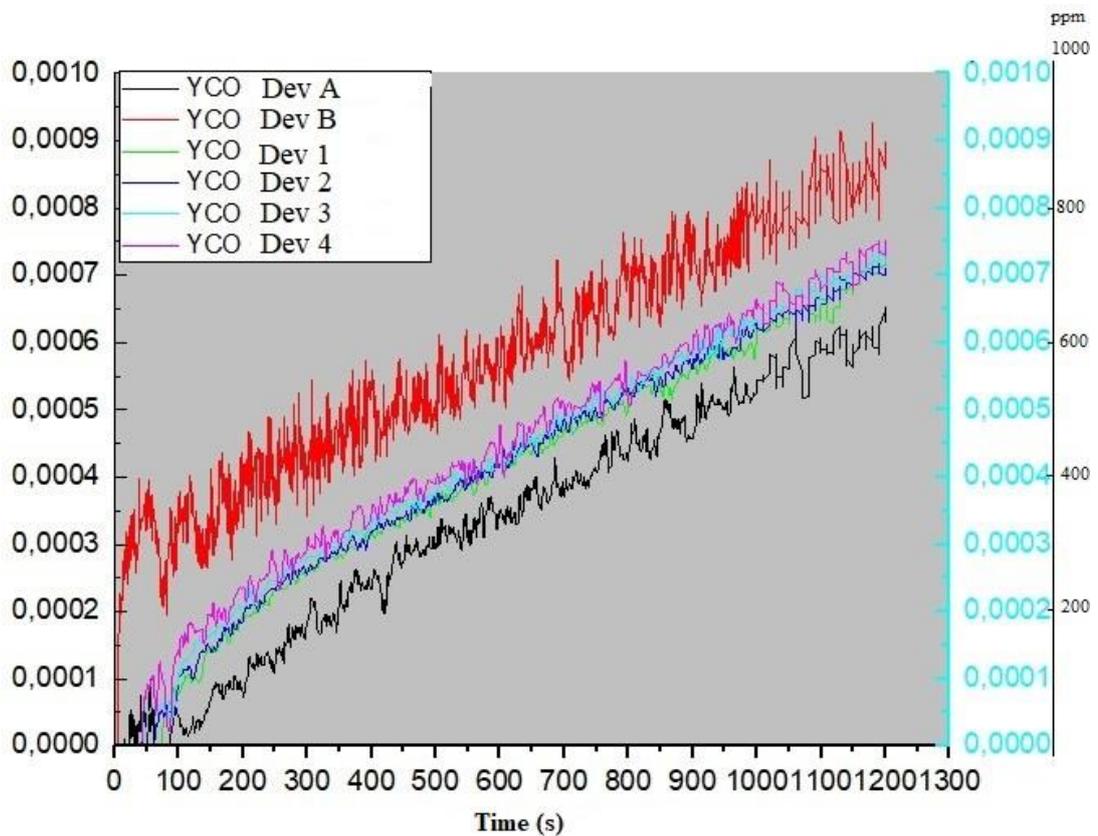


Figure 3.17 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas2.2)

Après une période de 20 minutes, l'analyse du rendement du monoxyde de carbone (CO) sur le graphique de la (figure 3.17) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du plafond dépasse 0,0009, soit l'équivalent de 900 ppm, tandis que les niveaux de CO situés entre 0,00065 et 0,00085 (soit de 650 ppm à 850 ppm) sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau (1.1), il est conclu qu'une exposition prolongée d'une heure ou plus à ces niveaux de monoxyde de carbone entraînera une somnolence, principalement au niveau du plafond, tandis que les autres niveaux présentent un risque de toxicité plus faible, pouvant provoquer des maux de tête et des nausées, la concentration de monoxyde de carbone mesurée dans les capteurs de niveau humain (capteurs 1,2,3,4) $z=1.5m$ est

alarmante, indiquant des niveaux très élevés de ce gaz toxique. Par conséquent, il est nécessaire de ventiler les locaux en ouvrant les fenêtres et d'éteindre le système de chauffage avant le début de l'exposition d'une heure.

Cas 2.3

Le cas 2.3 la porte et la trappe et la fenêtre de RDC sont ouvertes, le reste est fermé.

$$O=1.33 \times 10^{-2} (m^{0.5})$$

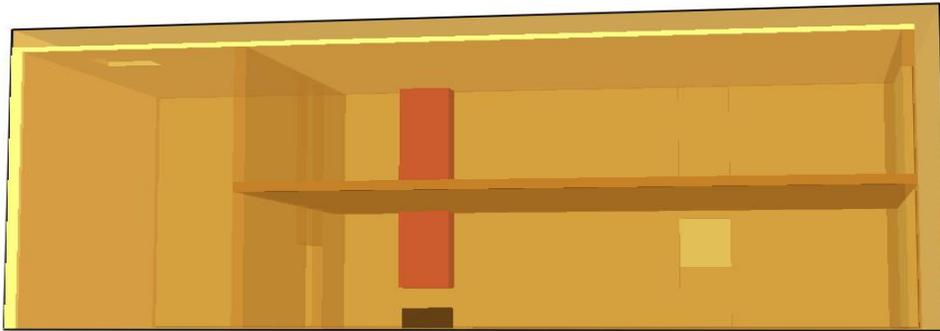


Figure 3.18: Image montrant la configuration (cas2.3)

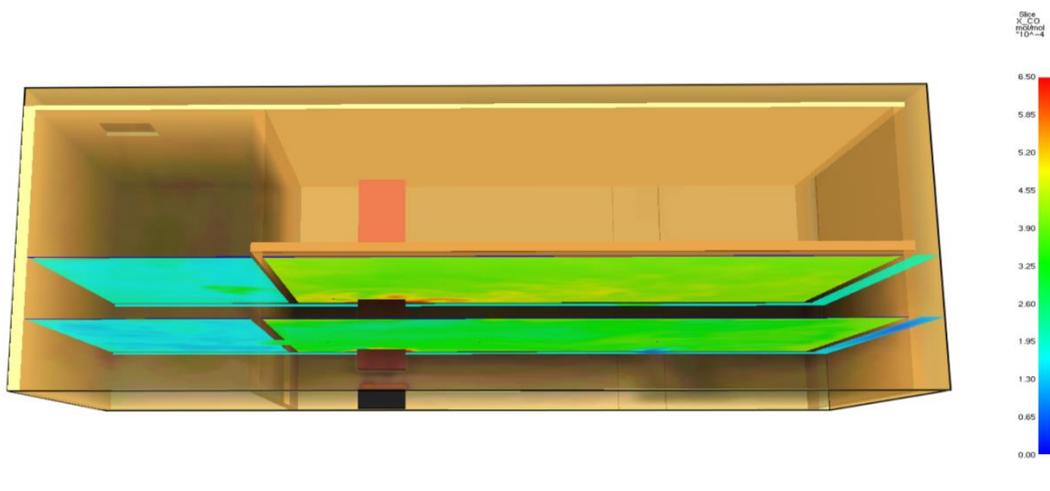


Figure 3.19 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas2.3)

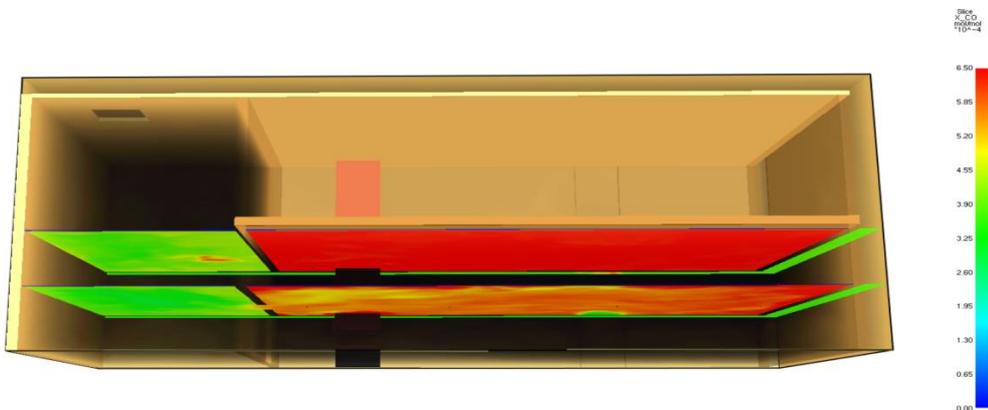


Figure 3.20 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas2.3)

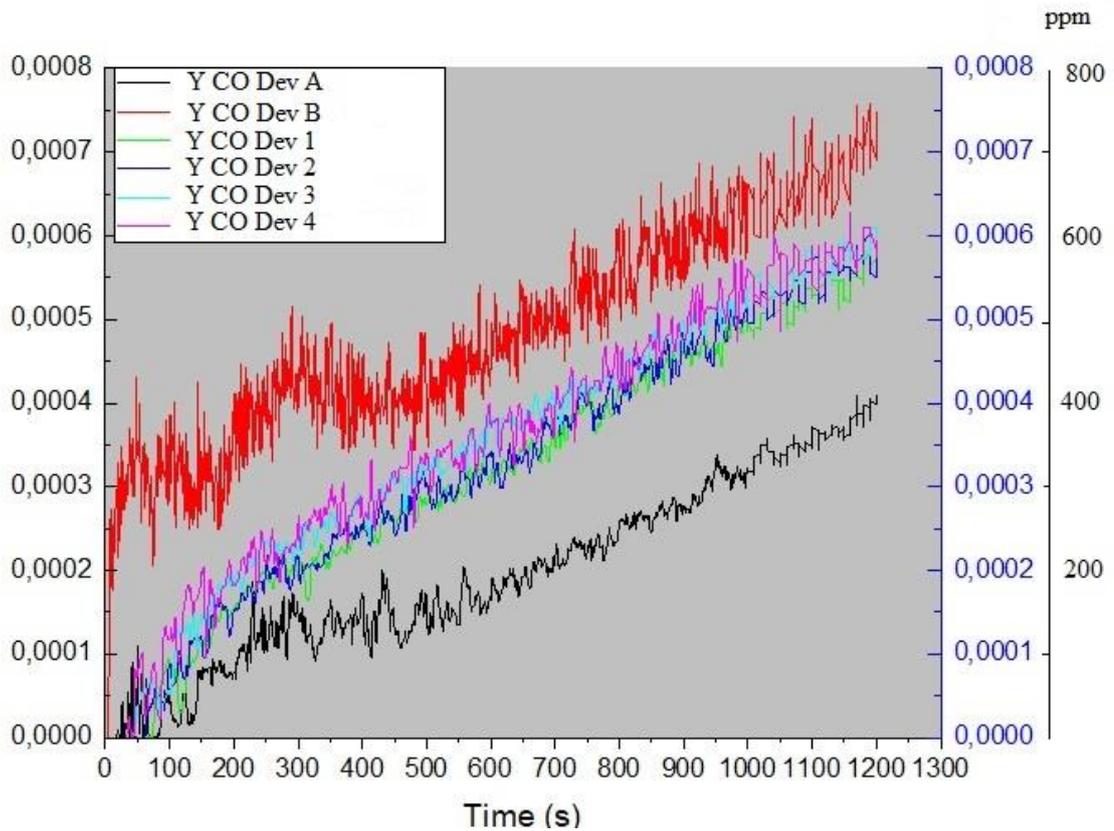


Figure 3.21 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.3)

Après 20 minutes, l'analyse du rendement du CO sur le graphe de (la figure 2.21) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du plafond dépasse 0.0007, équivalent à 700 ppm, tandis que les niveaux de CO entre 0.004 et 0.006, soit de 400 ppm à 600 ppm, sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau (1.1), il est conclu que l'inhalation prolongée pendant plus d'une heure provoque un mal de tête, nausée et étourdissements principalement au niveau du plafond, tandis que les autres niveaux présentent un taux inférieur de dangerosité, la concentration de monoxyde de carbone mesurée dans les capteurs de niveau humain (capteurs 1,2,3,4) $z=1.5m$ est alarmante, indiquant des niveaux très élevés de ce gaz toxique, il est nécessaire de ventiler les locaux en ouvrant les fenêtres et d'éteindre le système de chauffage avant le début de l'exposition d'une heure et demie ou plus.

D. Le cas 2.4

Le cas 2.4 la porte et la fenêtre et la gaine de RDC sont ouverts, les restes sont fermés.

$$O=1.63 \times 10^{-2} (m^{0.5})$$

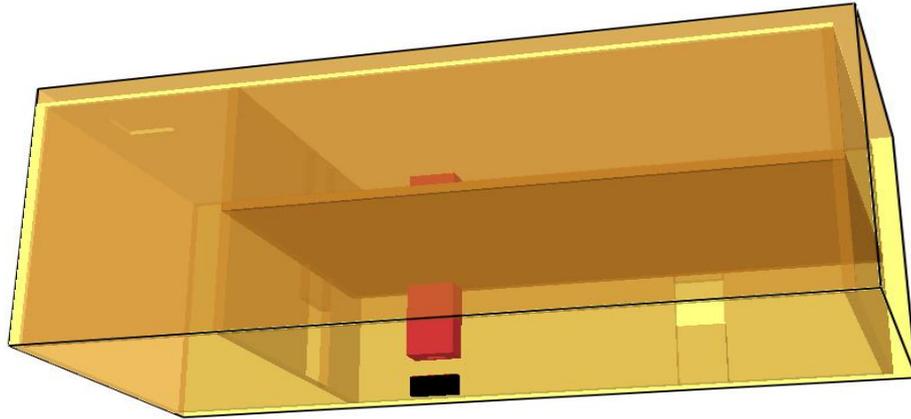


Figure 3.22 : Image montrant la conception de la maison dans le cas (2.4)

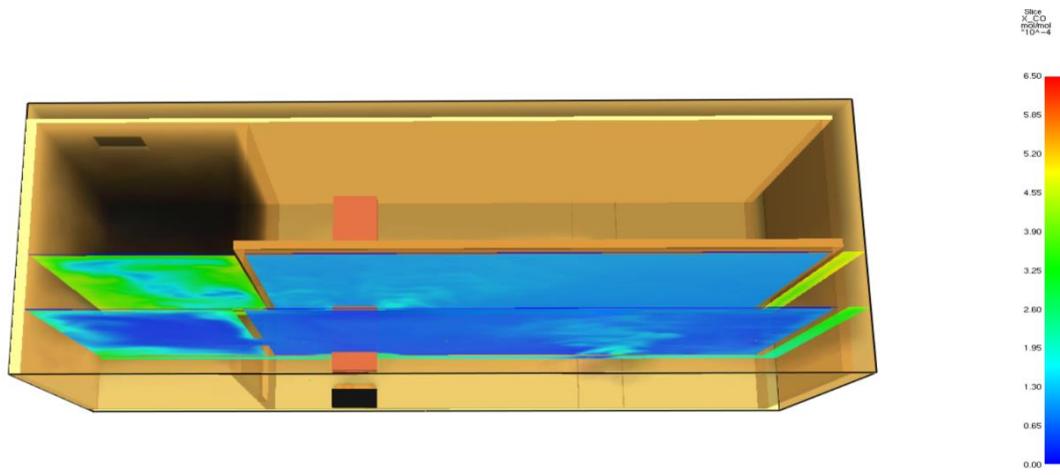


Figure 3.23 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas2.4)

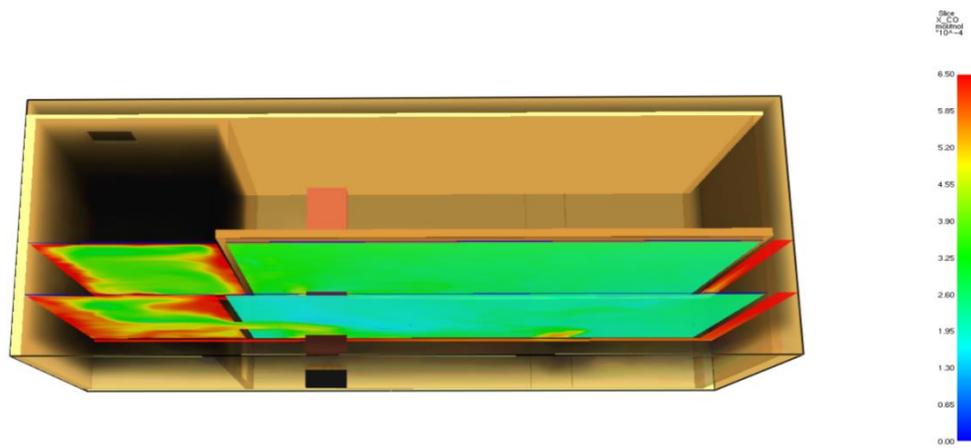


Figure 3.24 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas2.4)

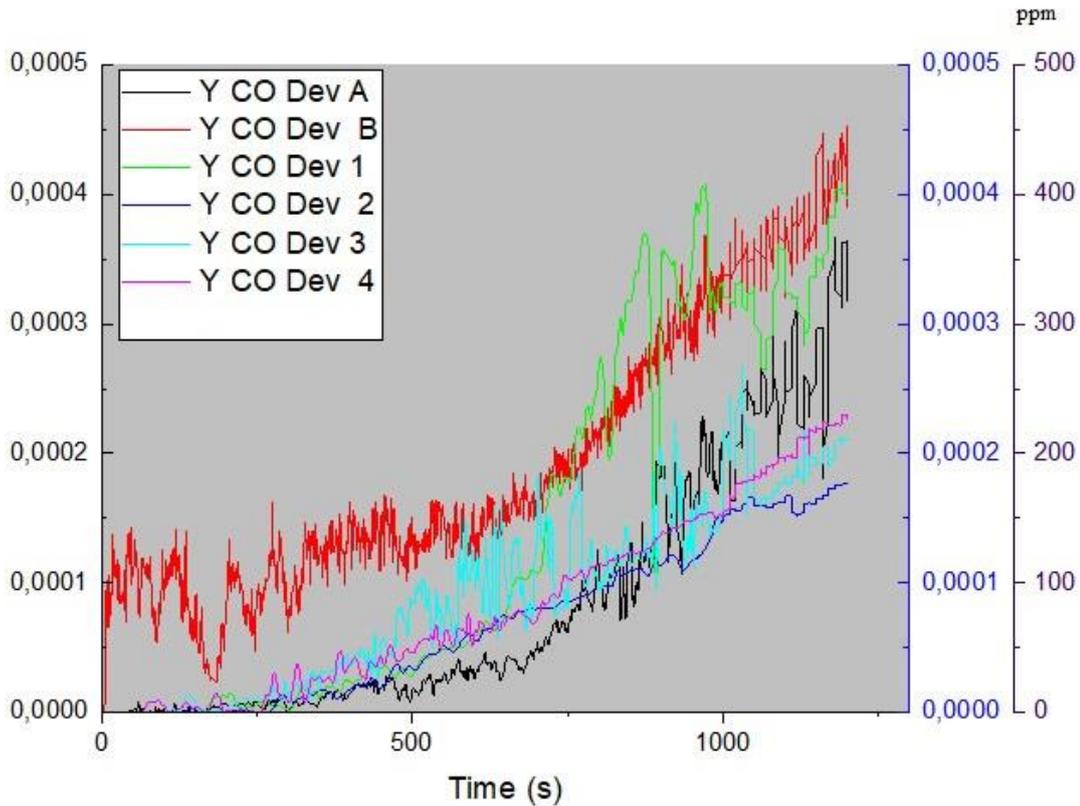


Figure 3.25 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.4)

Après 20 minutes, l'analyse du rendement du CO sur le graphe de (la figure 3.25) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du plafond et niveau de la porte dépasse 0.00045 équivalent à 450 ppm, tandis que les niveaux de CO entre 0.0002 et 0.0004, soit de 200 ppm à 400 ppm, sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau (1.1), il est conclu que l'inhalation prolongée pendant plus d'une heure provoque léger mal de tête et nausées, principalement au niveau du plafond et la porte, tandis que les autres niveaux présentent un taux inférieur de dangerosité, la concentration de monoxyde de carbone mesurée dans les capteurs de niveau humain (capteurs 1,2,3,4) $z=1.5m$ est alarmante, indiquant des niveaux très élevés de ce gaz toxique, il faut rester loin de la porte en cas d'évacuation.

E. Le cas 3.1

Le cas 3.1 la porte de RDC et la fenêtre intérieure de R+1, la trappe sont ouverts, le reste est fermé. $O=1.33 \times 10^{-2} (m^{0.5})$

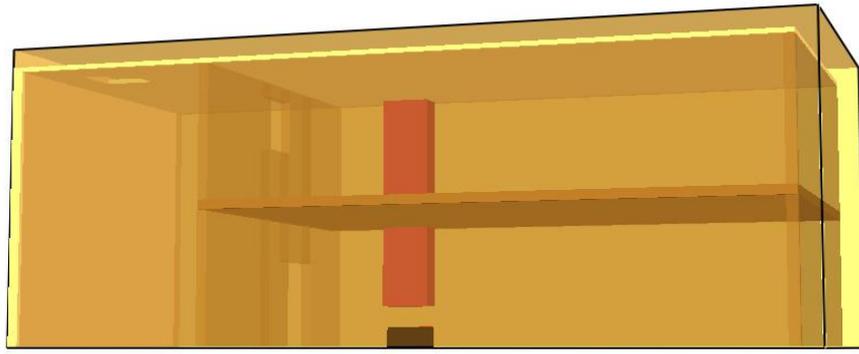


Figure 3.26 : Image montrant la conception de la maison (cas 3.1)

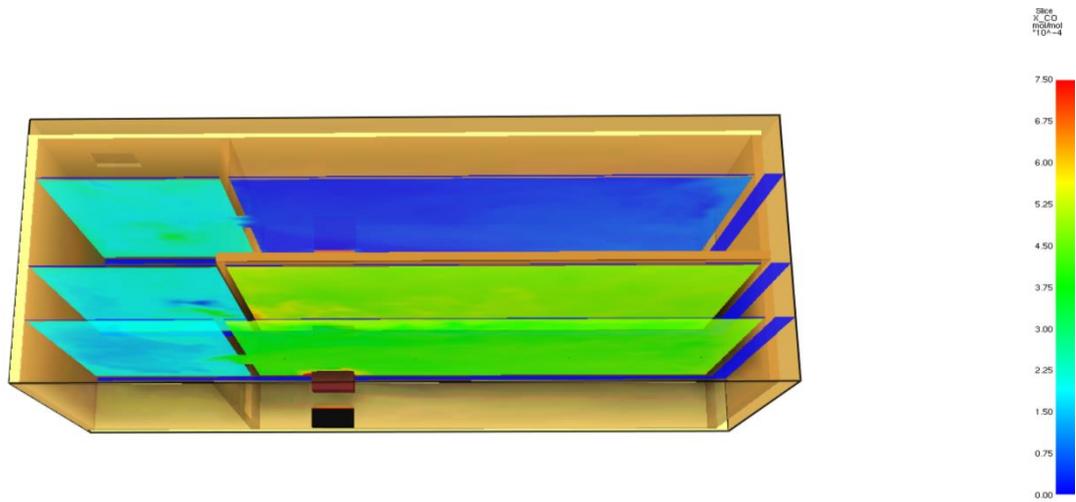


Figure 3.27 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas 3.1)

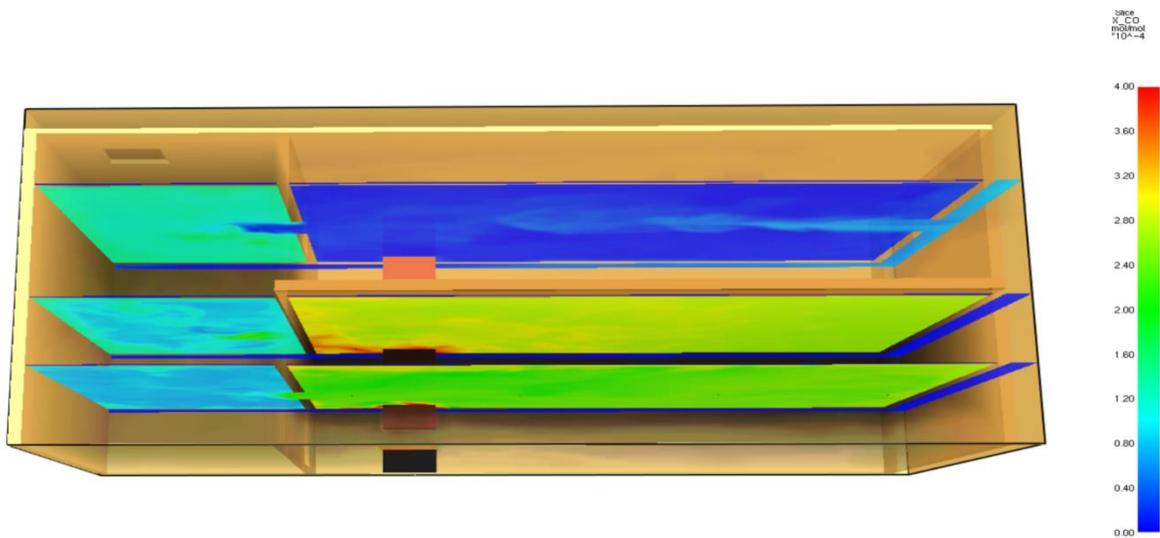


Figure 3.28 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.1)

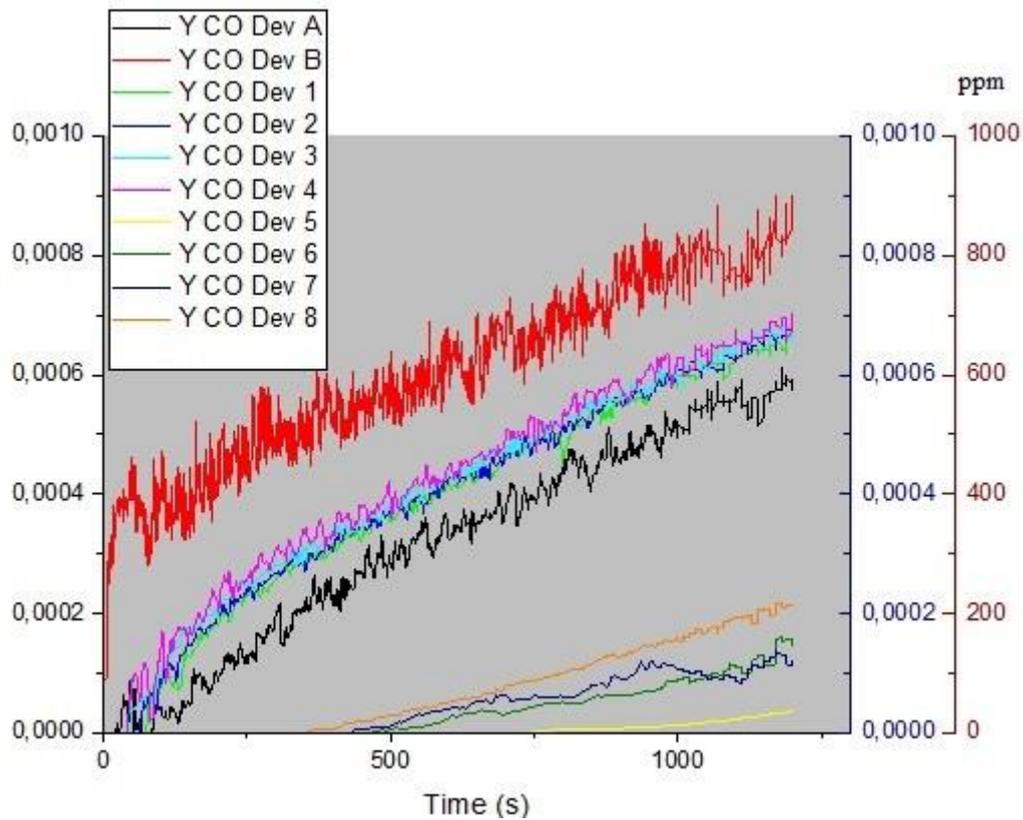


Figure 3.29 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.1)

Après 20 minutes, l'analyse du rendement du CO sur le graphe de (la figure 3.29) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du plafond dépasse 0.0009 équivalent à 900 ppm, tandis que les niveaux de CO entre 0.0006 et 0.0007, soit de 600 ppm à 700 ppm, sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau (1.1), il est conclu que l'inhalation prolongée pendant plus d'une heure provoque lourde mal de tête et nausées, principalement au niveau du plafond et la porte, tandis que les autres niveaux présentent un taux inférieur de dangerosité, la concentration de monoxyde de carbone mesurée dans les capteurs de niveau humain (capteurs 1,2,3,4) $z=1.5m$ est alarmante, indiquant des niveaux très élevés de ce gaz toxique, il faut ventiler la maison avant d'une heure et demie.

F. Le cas 3.2

Le cas 3.2 la porte de RDC, les deux fenêtres de R+1 et la trappe sont ouverts, le reste et fermé. $O=1.68 \times 10^{-2} (m^{0.5})$

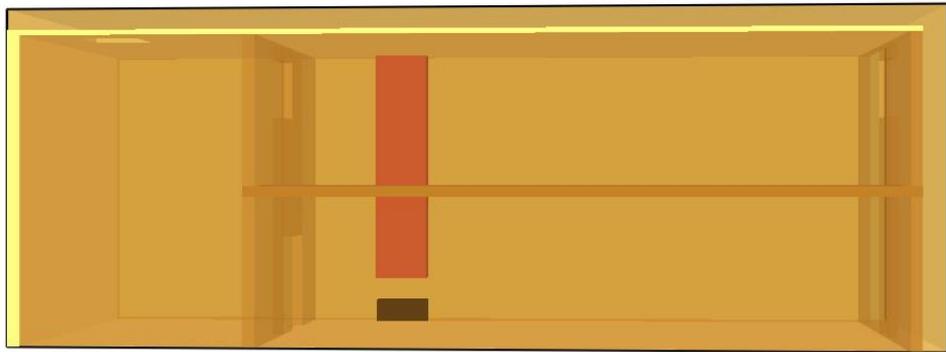


Figure 3.30 : Image montrant la conception de la maison (cas 3.2)

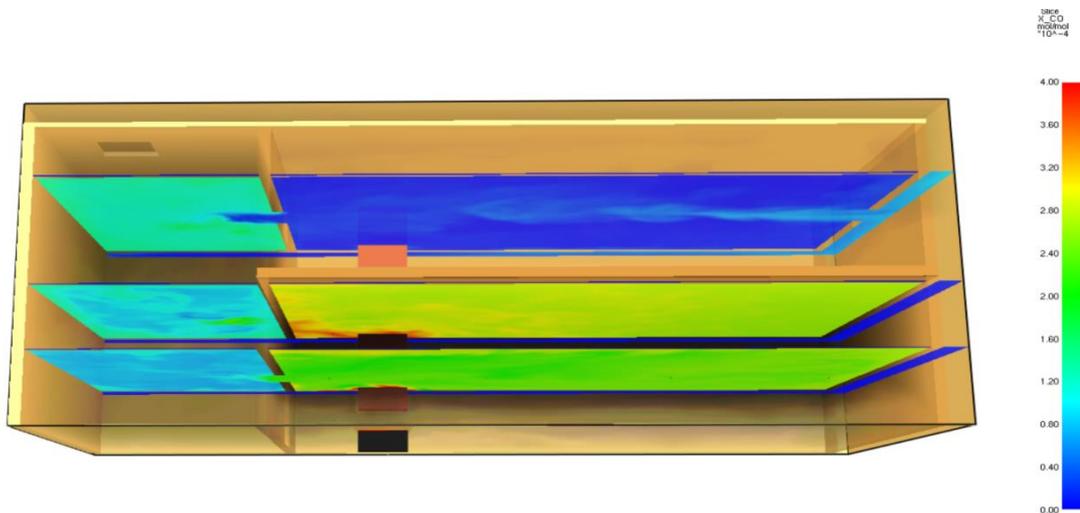


Figure 3.31 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas 3.2)

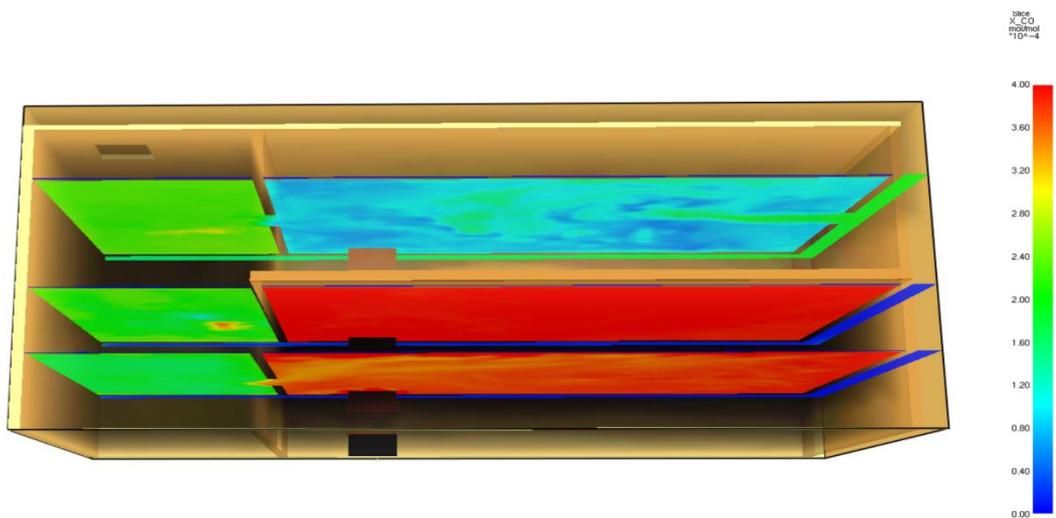


Figure 3.32 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.2)

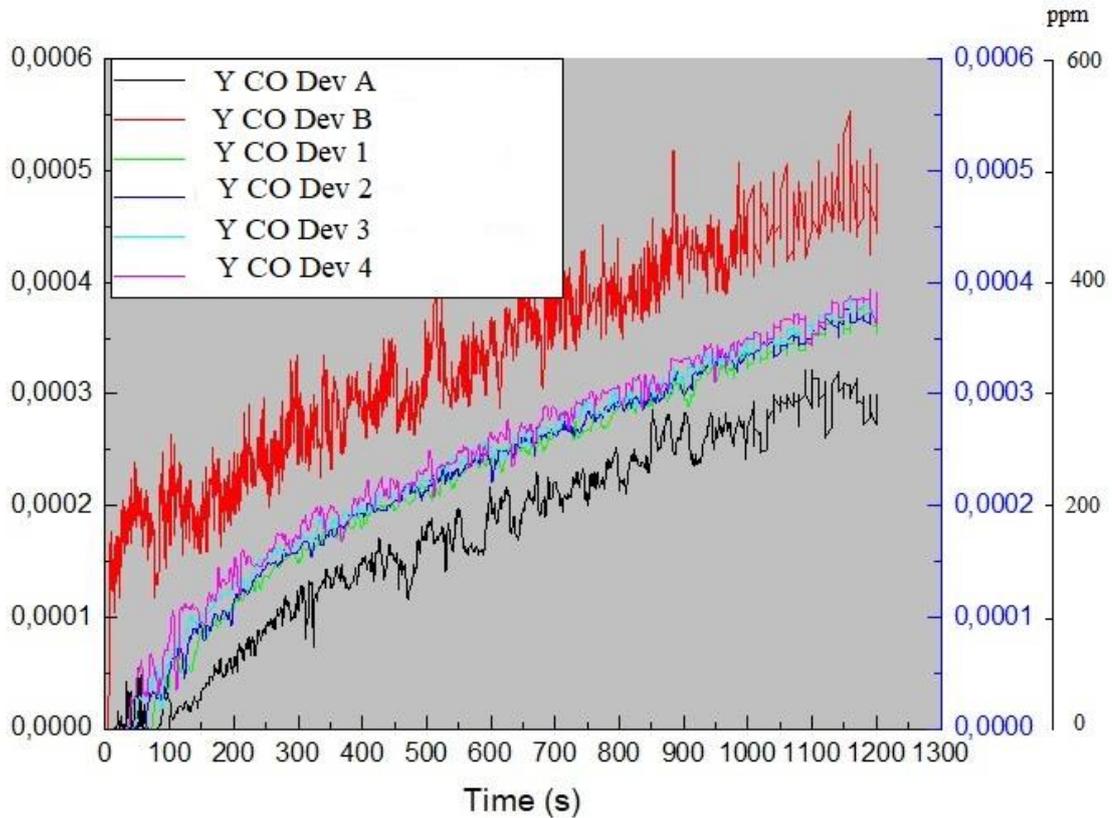


Figure 3.33 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.2)

Après 20 minutes, l'analyse du rendement du CO sur le graphe de (la figure 3.33) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du plafond et niveau de la porte dépasse 0.0005 équivalent à 500 ppm, tandis que les niveaux de CO entre 0.0003 et 0.0004, soit de 300 ppm à 400 ppm, sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau (1.1), il est conclu que l'inhalation prolongée pendant plus d'une heure provoquer mal de tête et nausées, principalement au niveau du plafond, tandis que les autres niveaux présentent un taux inférieur de dangerosité, la concentration de monoxyde de carbone mesurée dans les capteurs de niveau humain (capteurs 1,2,3,4) $z=1.5m$ est alarmante, indiquant des niveaux très élevés de ce gaz toxique

G. Le cas 3.4

Le cas 3.4 la porte de RDC et la gaine, les deux fenêtres de R+1 sont ouverts, le reste et fermé. $O=1.4 \times 10^{-2} (m^{0.5})$

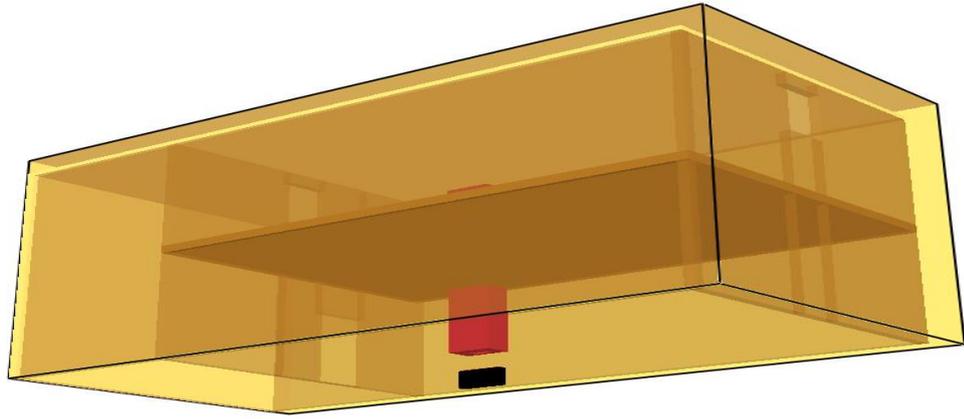


Figure 3.34 : Image montrant la conception de la maison (cas 3.4)

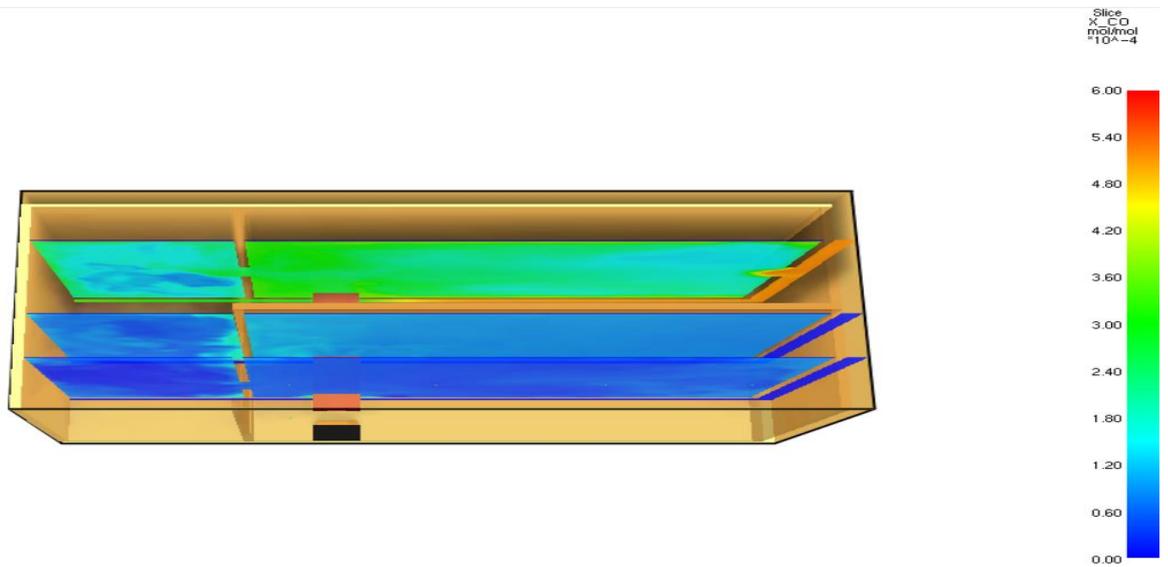


Figure 3.35 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 600s (cas 3.4)

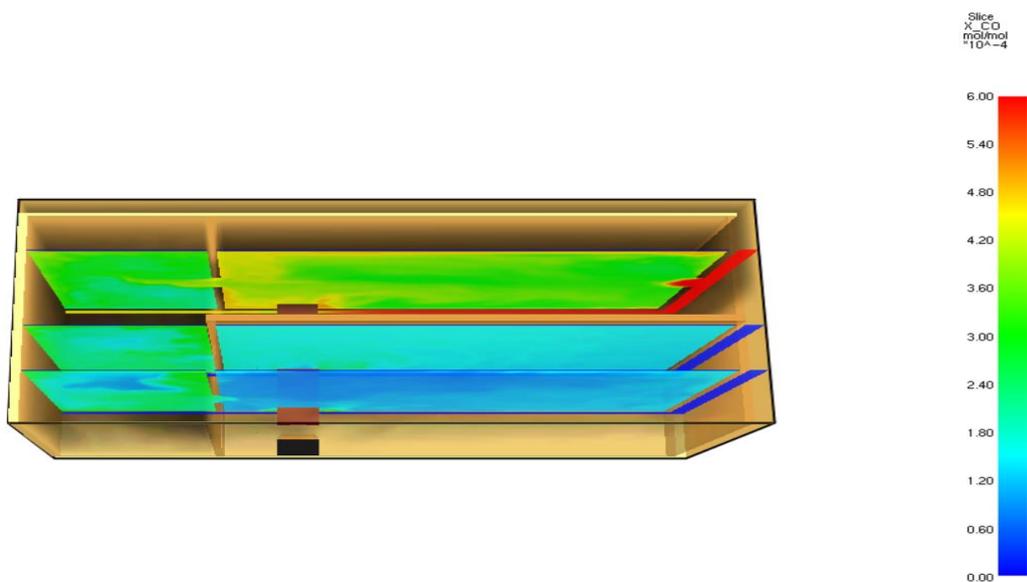


Figure 3.36 : Image des SLC de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.4)

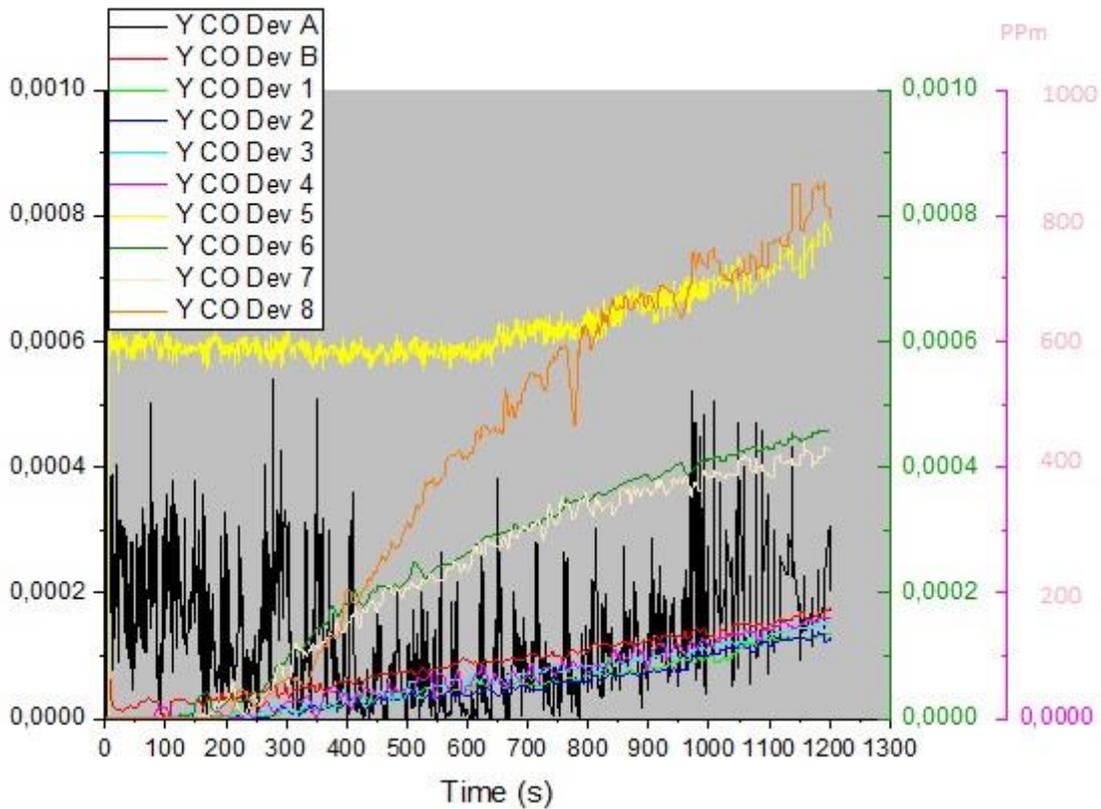


Figure 3.37 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.4)

Après 20 minutes, l'analyse du rendement du CO sur le graphe de (la figure 3.37) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du plafond et niveau de la porte dépasse 0.0002 équivalent à 200 ppm, tandis que les niveaux de CO entre 0.00014 et 0.00016, soit de 140 ppm à 150 ppm, sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau (1.1), il est conclu que l'inhalation prolongée pendant plus de 8 heures provoque un effet sur le sommeil, la mémoire et l'humeur, principalement aux capteurs de R+1 niveau humain (capteurs 8 et 5), tandis que les autres niveaux présentent un taux inférieur de dangerosité.

3.7.3 Analyse des résultats

Les cas 2.1 et 3.4 présentent des facteurs d'ouverture différents, ce qui peut influencer la distribution de monoxyde de carbone, dans le cas 2.1, le facteur d'ouverture est de 6.32×10^{-3} , ce qui est considéré comme le cas minimal des facteurs d'ouverture. Cela indique que l'ouverture des zones étudiées est relativement faible. On observe que la valeur maximale du CO est de 1000 ppm et se trouve dans le capteur B (figure 3.16).

Dans le cas 3.4, le facteur d'ouverture est de 1.4×10^{-2} , ce qui est considéré comme le cas maximal des facteurs d'ouvertures. Cela signifie que les zones étudiées ont une ouverture relativement plus grande par rapport au cas 2.1. On observe que la valeur maximale du CO est de 800 ppm et se trouve dans le capteur 8 (figure 3.40).

3.7.4 Diverses configurations du CO yield à la source

Dans ces situations, il convient de réaliser une étude en cas de dysfonctionnement du brûleur du système de chauffage, ce qui pourrait entraîner une combustion inefficace et une production élevée de monoxyde de carbone, à la source même du chauffage.

Cas 2.1 CO yield = 0.8

$$O=6.32 \times 10^{-3}$$

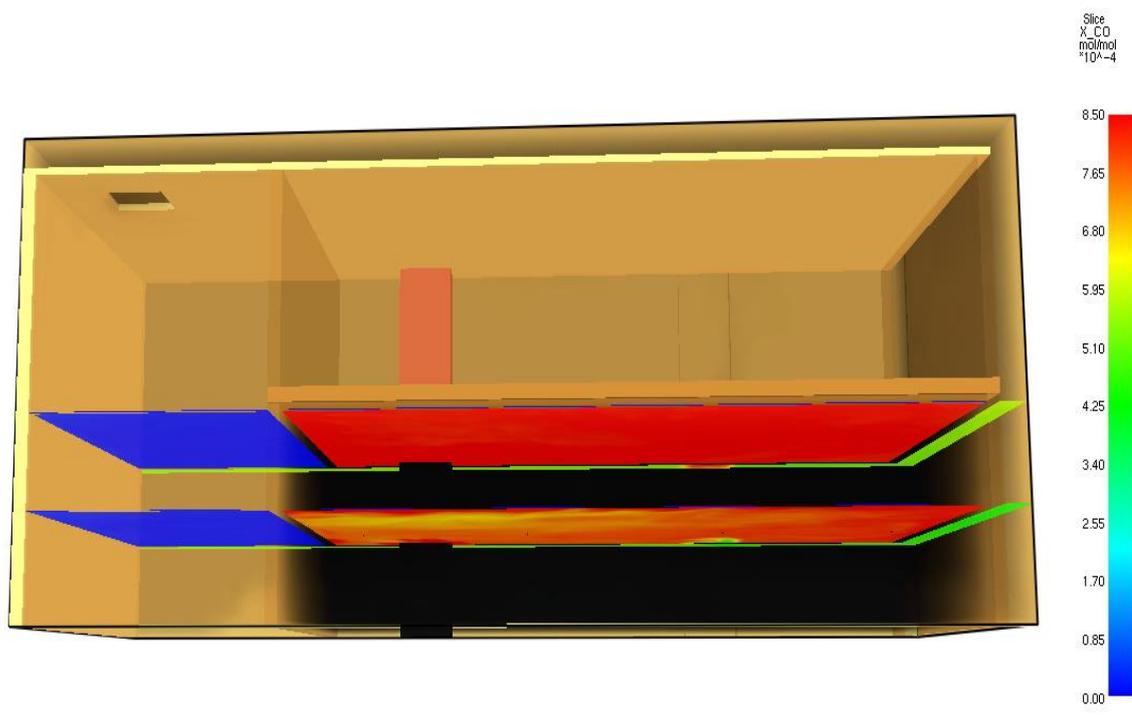


Figure 3.38: Contours spatiaux de monoxyde de carbone après 1200s (cas 2.1 CO Yield=0.8)

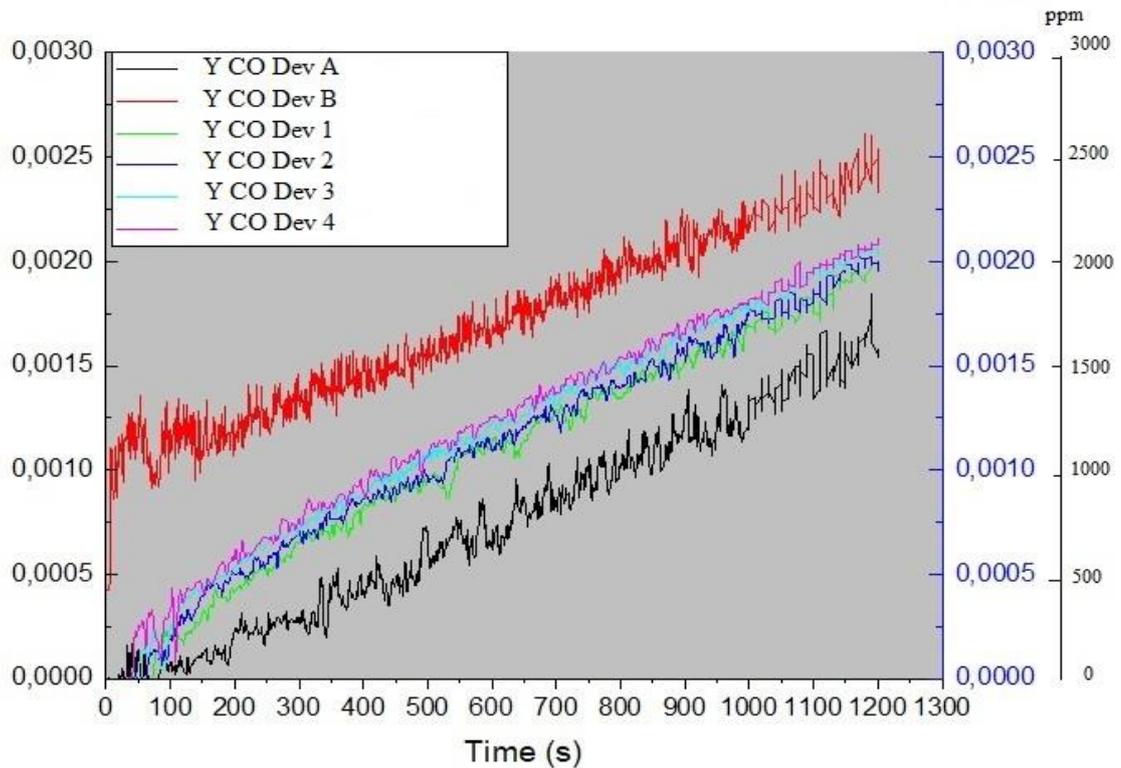


Figure 3.39 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.1 CO Yield=0.8)

Après une période de 20 minutes, l'analyse du rendement du monoxyde de carbone (CO) sur le graphique de la (figure3.39) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du capteur B dépasse 0,0025, soit l'équivalent de 2500 ppm, tandis que les niveaux de CO situés entre 0,0017 et 0,0020 (soit de 1700 ppm à 2000 ppm) sont observés dans les autres zones. En se référant au (tableau 1.1), il est conclu qu'une exposition prolongée de 20 minutes à ces niveaux de monoxyde de carbone entraînera mal de tête, nausées et étourdissements perte de conscience après 30 minutes, principalement au niveau du plafond, tandis que les autres niveaux présentent un risque de toxicité moins que le plafond, la concentration de monoxyde de carbone mesurée dans les capteurs de niveau humain (capteurs 1,2,3,4) $z=1.5m$ est alarmante, indiquant des niveaux très élevés de ce gaz toxique. Une exposition prolongée à de telles concentrations peut avoir des effets néfastes sur la santé.

Cas 2.1 CO yield =1.6

$$O=6.32 \times 10^{-3}$$



Figure 3.40 : Contours de monoxyde de carbone après 1200s (cas 2.1 CO Yield=1.6)

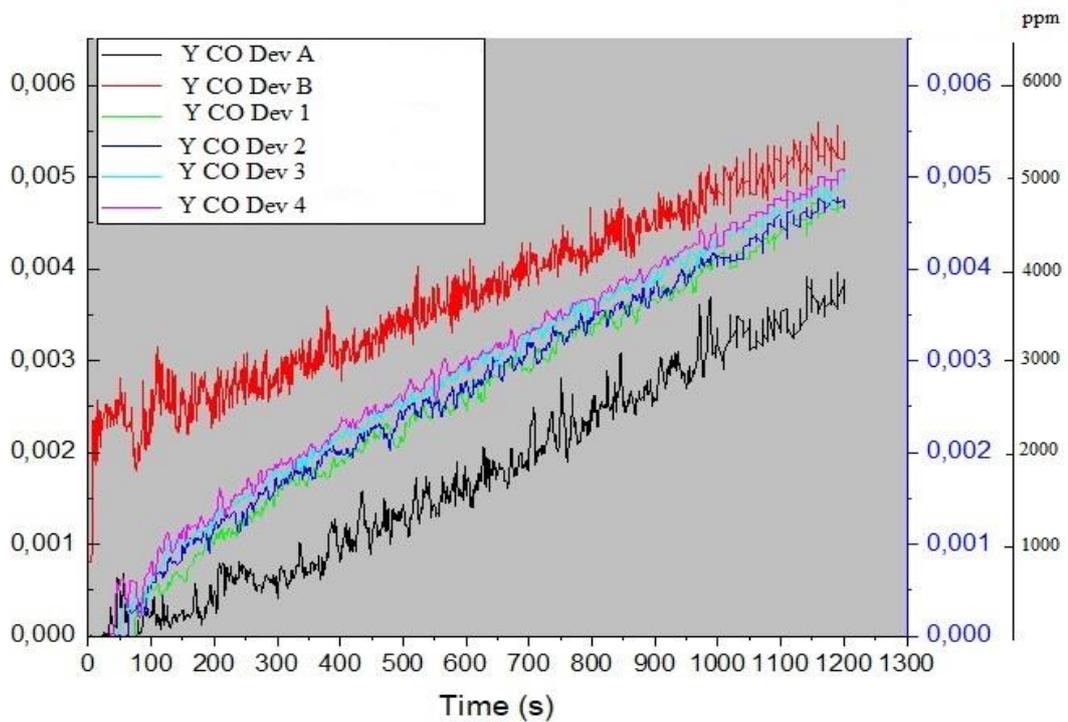


Figure 3.41 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 2.1 CO yield=1.6)

Après une période de 20 minutes, l'analyse du rendement du monoxyde de carbone (CO) sur le graphique de (la figure 3.41) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du capteur B dépasse 0,0055, soit l'équivalent de 5500 ppm, tandis que les niveaux de CO situés entre 0,004 et 0,005 (soit de 4000 ppm à 5000 ppm) sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau (1.1), il est conclu qu'une exposition prolongée de moins 20 minutes à ces niveaux de monoxyde de carbone entraînera mal de tête, nausées et étourdissements perte de conscience après 25 minutes, principalement au niveau du plafond, tandis que les autres niveaux présentent un risque de toxicité moins que le plafond, la concentration de monoxyde de carbone mesurée dans les capteurs de niveau humain (capteurs 1,2,3,4)

$z=1.5\text{m}$ est alarmante, indiquant des niveaux très élevés de ce gaz toxique. Une exposition prolongée à de telles concentrations peut avoir des effets néfastes sur la santé.

Cas 3.4 CO yield = 0.6

$$O=1.4 \times 10^{-2}$$

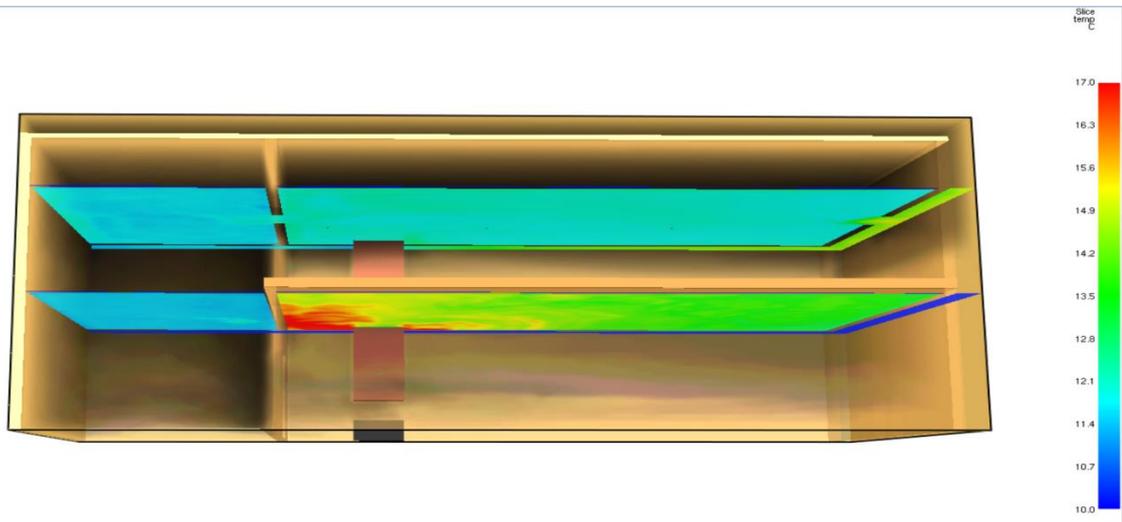


Figure 3.42 : Contours de la température après 1200s (cas 3.4 CO Yield=0.6)

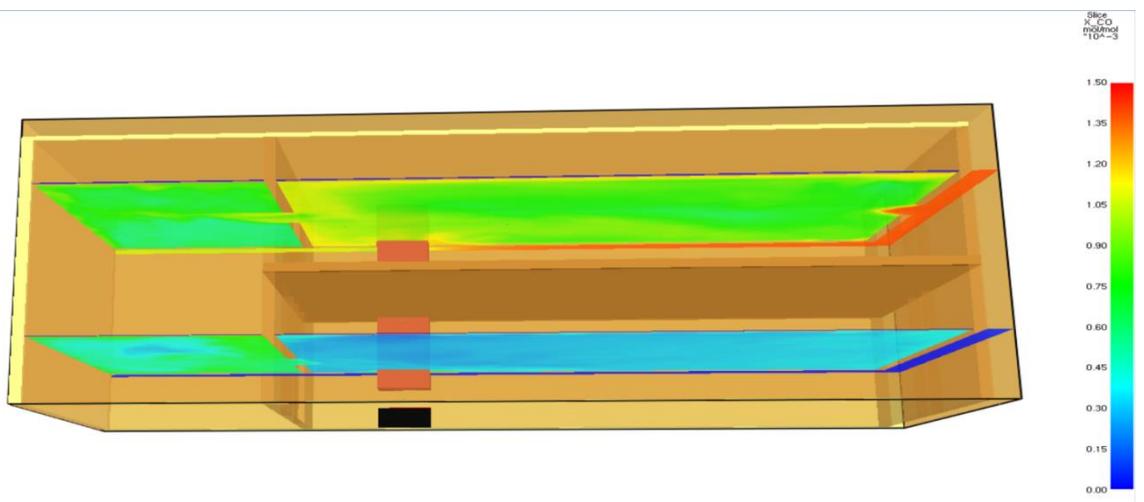


Figure 3.43 : Contours de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.4 CO Yield=0.6)

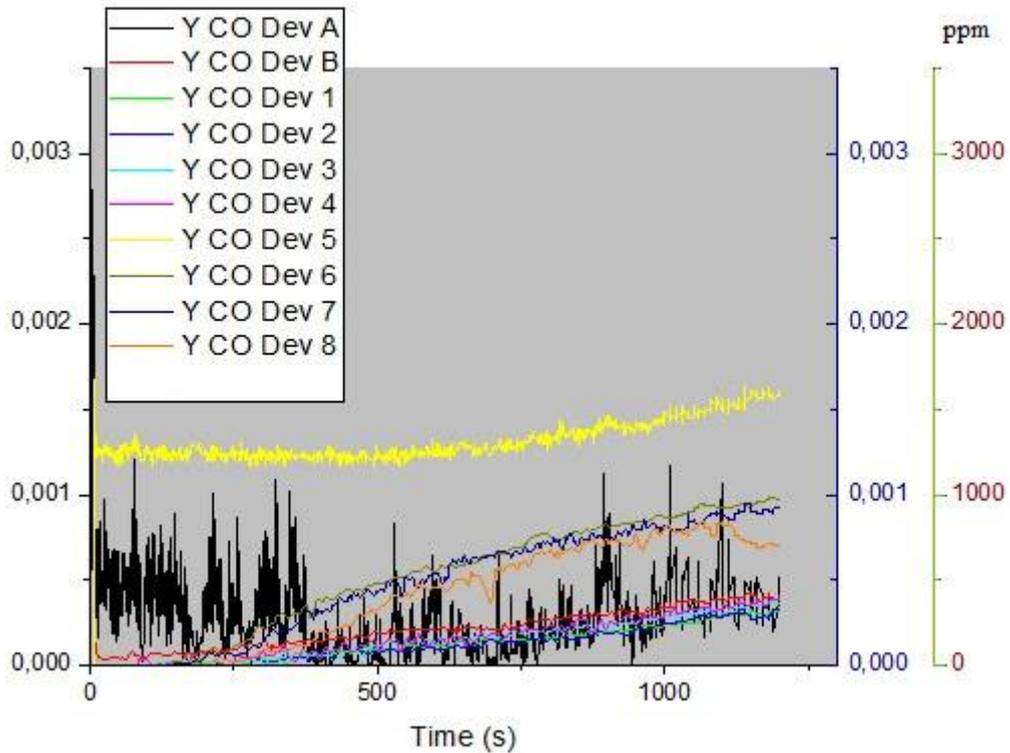


Figure 3.44 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.4 CO Yield=0.6)

Après une période de 20 minutes, l'analyse du rendement du monoxyde de carbone (CO) sur le graphique de (la figure 3.44) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du capteur A dans le début et de 0,0028, soit l'équivalent de 2800 ppm, tandis que les niveaux de CO situés entre 0,0015 et 0,005 (soit de 1500 ppm à 500 ppm) sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau (1.1), il est conclu qu'une exposition prolongée de moins 20 minutes à ces niveaux de monoxyde de carbone entraînera mal de tête, nausées et étourdissements perte de conscience après la première minute, en suite au niveau du capteurs de R+1 après 20 minutes, tandis que les capteurs du RDC présentent un risque de toxicité moins que les autres niveaux, , la concentration de monoxyde de carbone mesurée dans les capteurs de niveau humain (capteurs 1,2,3,4,6,7,8) $z=1.5m$ est alarmante, indiquant des niveaux très élevés de ce gaz toxique. Une exposition prolongée à de telles concentrations peut avoir des effets néfastes sur la santé.

La température observé dans le slc du RDC et grande par rapport la température du slc de R+1

Cas 3.4 CO yield=1.2

$$O=1.4 \times 10^{-2}$$

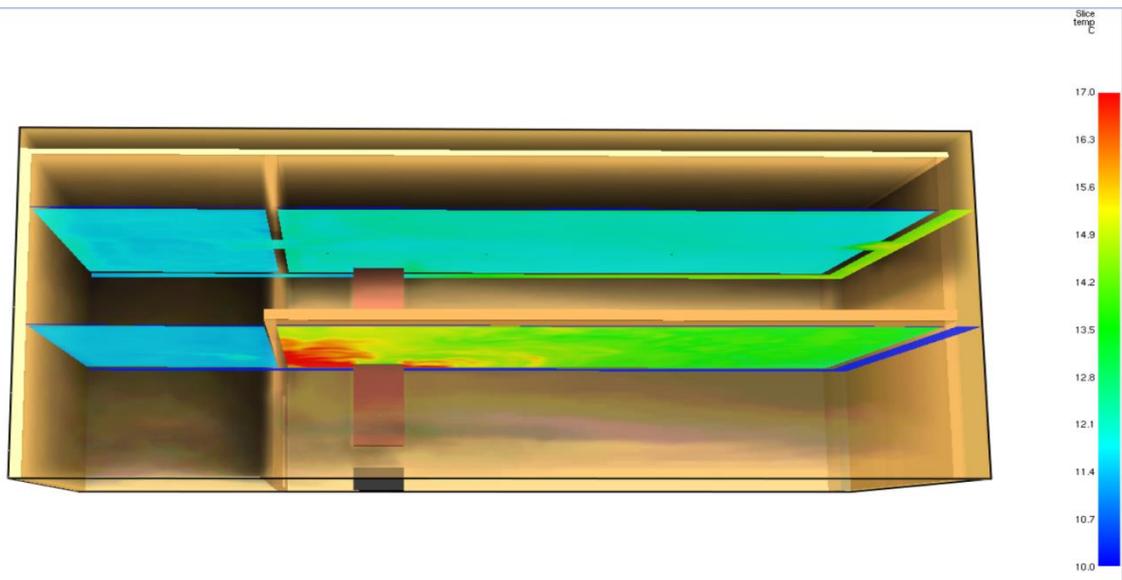


Figure 3.45 : Contours de monoxyde de température après 1200s (cas 3.4 CO Yield=1.2)

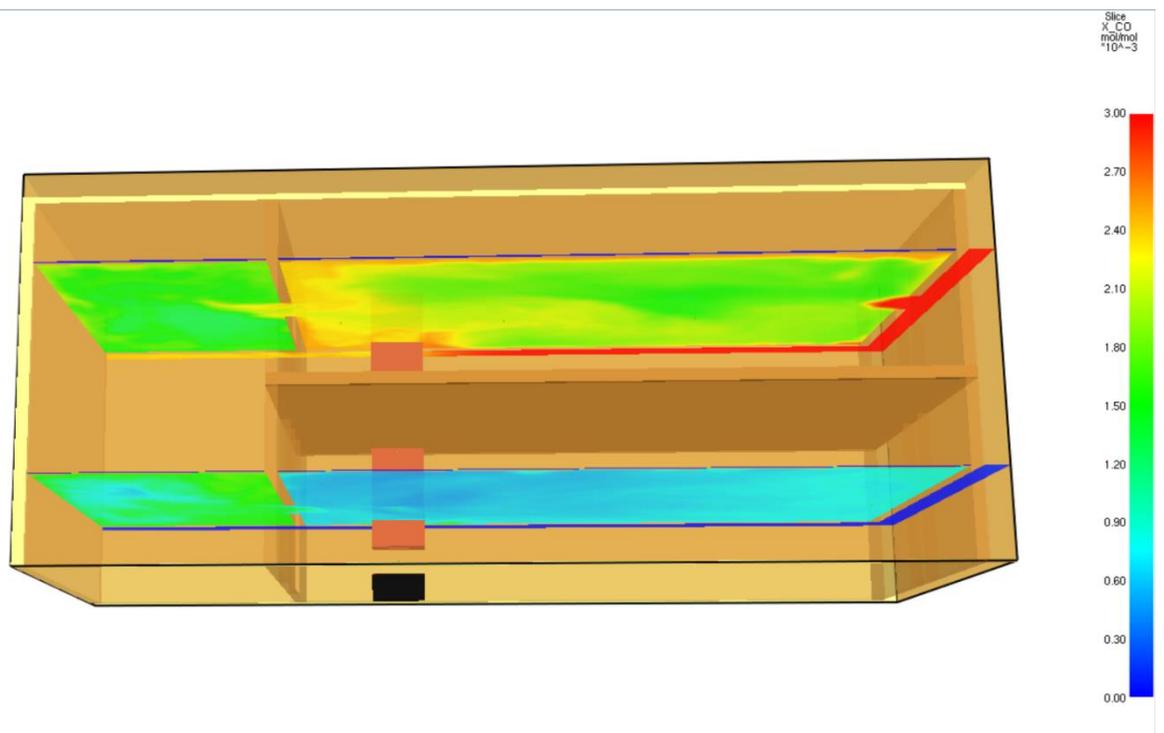


Figure 3.46 : Contours de monoxyde de carbone après 1200s (cas 3.4 CO Yield=1.2)

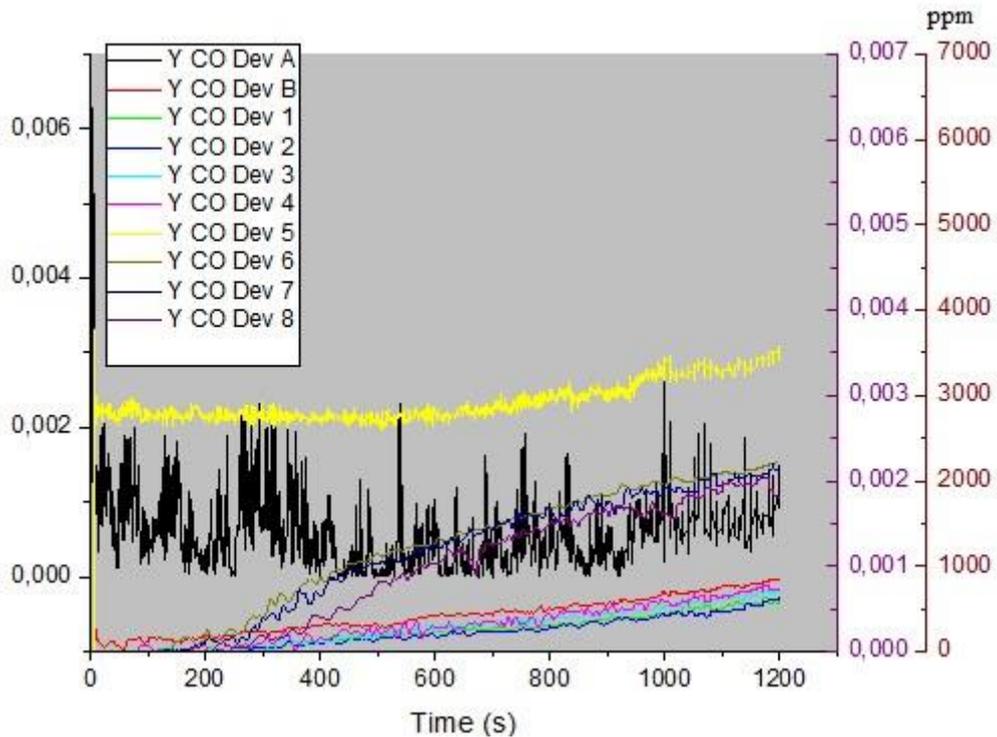


Figure 3.47 : Les résultats des capteurs de monoxyde de carbone CO (cas 3.4 CO Yield=1.2)

Après une période de 20 minutes, l'analyse du rendement du monoxyde de carbone (CO) sur le graphique de (la figure 3.47) révèle des résultats significatifs. La concentration de monoxyde de carbone au niveau du capteur A dans le début est de 0,0062, soit l'équivalent de 6200 ppm, tandis que les niveaux de CO situés entre 0,0035 et 0,007 (soit de 3500 ppm à 700 ppm) sont observés dans les autres zones. En se référant au tableau (1.1), il est conclu qu'une exposition prolongée de moins de 5 minutes à ces niveaux de monoxyde de carbone est très dangereuse et entraînera mal de tête, nausées et étourdissements, perte de conscience après la première minute, en suite au niveau des capteurs niveau humain de R+1 après 20 minutes, tandis que les capteurs du RDC présentent un risque de toxicité moins que les autres niveaux.

La température observée dans le slc du RDC est grande par rapport à la température du slc de R+1.

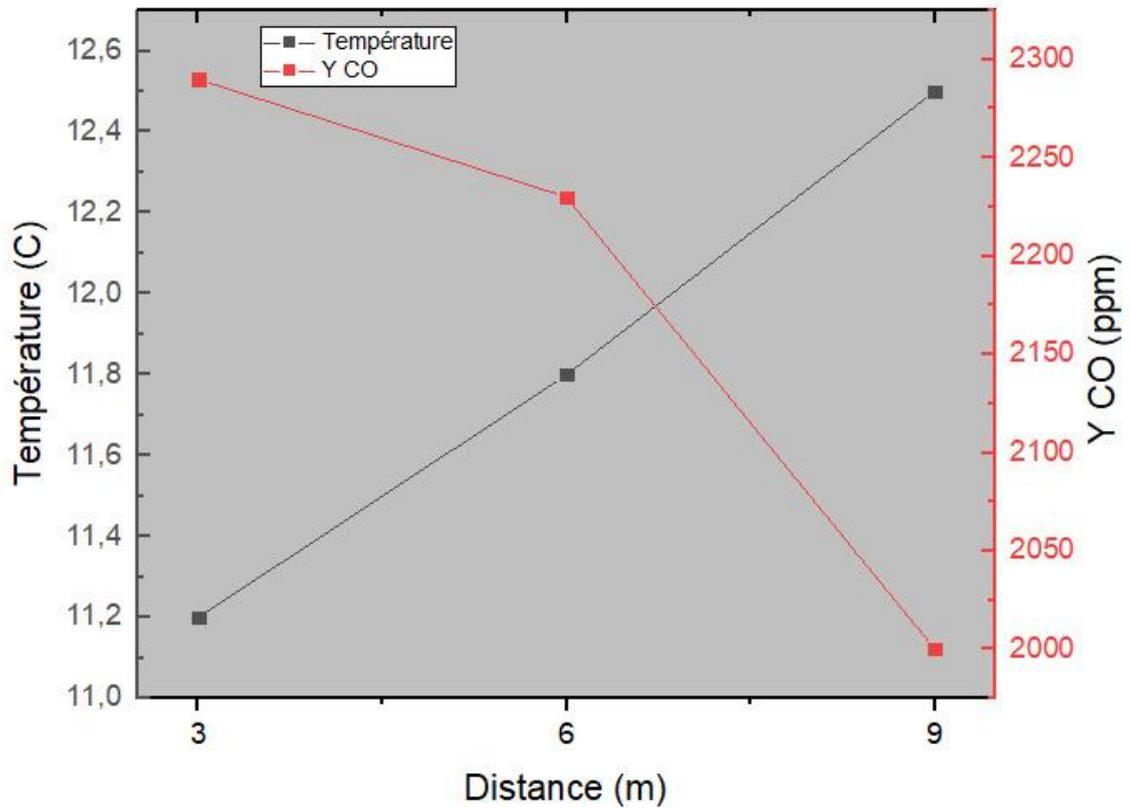


Figure 3.48 : Résultats de température et Y CO en fonction de la distance entre les capteurs $z = 1.5\text{m}$ de R+1

Conclusion

Dans le cadre de notre étude sur la production de monoxyde de carbone dans un local à usage d'habitation, nous avons effectué des simulations avec différentes configurations. L'un des paramètres étudiés était le facteur d'ouverture, qui représente le niveau de ventilation naturelle dans le local.

Nous avons observé que lorsque le facteur d'ouverture était plus grand, correspondant à une plus grande ouverture des zones étudiées, la concentration de monoxyde de carbone n'est pas très grande. Par exemple, dans le cas 3.4 avec un facteur d'ouverture de 1.4×10^{-2} nous avons constaté une concentration minimale de 110 ppm de monoxyde de carbone dans le capteur 2, tandis que la concentration maximale était de 800 ppm dans le capteur 8 et le cas 2.1 avec un facteur d'ouverture de 6.32×10^{-3} nous avons constaté une concentration minimale de 600ppm de monoxyde de carbone dans le capteur A tandis que la concentration maximale était de 1000ppm dans le capteur B.

Cette observation est expliquée par l'hypothèse que lorsque les ouvertures sont plus grandes, cela permet une meilleure ventilation et un échange d'air plus important. En conséquence, une plus grande quantité de monoxyde de carbone est évacuée plus rapidement, réduisant ainsi la stagnation de monoxyde de carbone dans l'environnement au fil du temps, malgré un facteur d'ouverture élevé dans notre étude, ce qui suggère une meilleure ventilation et une plus grande ouverture des zones étudiées, nous avons observé qu'il y avait toujours une quantité importante de monoxyde de carbone.

Cependant, il est important de souligner que cette interprétation est basée sur les résultats spécifiques de notre étude et dépend des hypothèses et des conditions de notre modèle de simulation. Autres facteurs, le CO yield de la combustion joue un rôle crucial tant dans la production que dans la dispersion du monoxyde de carbone. Nous avons observé que lorsque le CO yield était plus grande, la concentration de monoxyde de carbone est très grande. Par exemple, dans le cas 2.1 avec CO yield de 0.8 et 1.6 nous avons constaté une concentration maximale était de 2500ppm et 5600 ppm dans le capteur B et dans le cas 3.4 avec Co yield de 0.6 et 1.2 nous avons constaté une concentration maximale était de 2800ppm dans le capteur A et 6200 aussi dans le capteur A donc le CO yield dans la source de combustion entraîne des concentrations importantes de monoxyde de carbone, qui peuvent avoir des conséquences néfastes sur la santé et la sécurité. Par conséquent, il est essentiel de contrôler et d'optimiser le CO yield initial afin de minimiser les risques associés à la production et à la dispersion de ce gaz toxique et malgré des températures insuffisantes ou bien plus moins pour une production significative de monoxyde de carbone dans certaines zones (figure 3.48), la présence d'un CO Yield élevé conduit à la formation de ce gaz toxique.

Conclusion générale

En conclusion, ce projet de fin d'études s'est concentré sur la prédiction numérique de la dispersion du monoxyde de carbone dans un local résidentiel. Grâce à l'utilisation de techniques de modélisation et de simulation FDS-SMV, nous avons pu évaluer la propagation de ce gaz toxique, identifier les zones à risque élevé et proposer des mesures de sécurité appropriées.

La modélisation numérique s'est avérée être un outil précieux pour étudier la dispersion du monoxyde de carbone dans un contexte résidentiel. Elle permet de simuler différents scénarios et de prédire les concentrations de CO dans le local, ce qui facilite l'identification des sources d'émission, l'évaluation de l'efficacité des systèmes de ventilation et la formulation de recommandations de sécurité.

En utilisant un modèle en 3D du local et en intégrant des données pertinentes, nous avons pu obtenir des résultats précis et fiables sur la dispersion du monoxyde de carbone. L'analyse des concentrations de CO dans différentes zones du local nous a permis d'identifier les zones les plus exposées et de proposer des mesures spécifiques pour minimiser les risques pour les habitants.

Ce projet présente des implications importantes pour la sécurité dans les locaux à usage d'habitation. En comprenant mieux la dispersion du monoxyde de carbone, nous pouvons améliorer la conception des bâtiments, optimiser les systèmes de ventilation et mettre en place des procédures de sécurité plus efficaces. Cela contribue à réduire les risques d'intoxication au monoxyde de carbone et à protéger la santé et le bien-être des habitants.

Il est important de souligner que la modélisation numérique est un outil complémentaire aux études expérimentales et aux normes de sécurité existantes. Il est essentiel de valider les résultats de la simulation en les comparant à des données réelles et en les intégrant aux réglementations en vigueur.

Ce projet ouvre également la voie à de futures recherches et améliorations. Des travaux supplémentaires peuvent être entrepris pour affiner les modèles de simulation, tenir compte de différents scénarios et conditions, et étendre l'analyse à d'autres gaz toxiques présents dans les locaux à usage d'habitation.

Le projet de fin d'études, a permis de mettre en évidence l'importance de la prédiction numérique de la dispersion du monoxyde de carbone dans les locaux résidentiels. Grâce à une approche basée sur la simulation aux grandes échelles (L.E.S), nous avons pu améliorer notre compréhension des mécanismes de dispersion, identifier les zones à risque élevé, dans une optique future de proposer des mesures de sécurité adéquates.

Recherches Bibliographiques

- [1] Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), Incendie et lieu de travail, Article , 2007.
- [2] H. Douadi, « Prédiction des flux thermiques incidents sur le corps d'un sapeur – pompier ». Mémoire Master en option énergétique. Université H.B de Chlef ,2018
- [3] M. Labadie, L. Capaldo, A. Courtois, et B. Mégarbane, Mécanismes de toxicité des fumées d'incendie (monoxyde de carbone et cyanures exclus). Réanimation 25, 506–513, 2016.
- [4] Cours EDF
- [5] La plateforme de référence pour un environnement de travail sain et sécurisé, (Consulté le 28 Mars 2023)
- [6] Site web NFPA : National Fire Protection Association : <https://www.NFPA.org>; (Consulté le 28/03/ 2023)
- [7] Guide d'utilisateur du FDS.
- [8] Cretin. F, Carrau. A, « Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt », Rapport intermédiaire d'Opération Modélisation de l'incendie en milieu confiné, 2000.
- [9] Site web <https://www.protection-civile.org/> (Consulté le 29/03/ 2023)
- [10] S.Agred. « Control des écoulements des fumées dans les incendie en espace semi-confiné». Thèse doctorat en option génie mécanique .Université H.B de Chlef ,2019
- [11] Vytenis Barbarauskas, BFRL, National institute of Standards and Technology, Gaithersburg, article MD 20899, USA