



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Mécanique

Mémoire de Magister En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

MERIEM LOUIZA KHEDAOUJ
Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Intitulé

Etude Numérique du Terme Source lors d'un développement d'un incendie dans un local semi-confiné : Application à un scénario de feu dans une centrale hydroélectrique

Soutenue publiquement le 29 septembre 2012 devant le Jury Composé de :

Président :	Salah LARBI	Professeur	ENP
Rapporteur :	Bouzid BENKOUSSAS	MC Classe A	ENP
Examineurs :	Amor BOUHDJAR	DR	CDER
	Boussad BOUMEDDANE	Professeur	U.BLIDA

ENP 2012

ملخص:

هذا العمل عبارة عن دراسة رقمية لسريان و استخراج الأدخنة في حالة نشوب حريق في محطة كهرومائية ذات طابقين أحدهما تحت الأرض , وتتمثل هذه الدراسة في البحث عن أنسب طريقة لاستخراج الأدخنة و ذلك في عدة وضعيات لمصدر الحريق مع استخدام منهجية المكيفات الهوائية في السقف و المسربات بهدف ضمان سلامة أمن الأشخاص العاملين و المنقذين. إضافة إلى الحفاظ على الهياكل الصناعية و هذا باستخدام برنامج للمحاكاة الرقمية FDS.

كلمات مفتاحية :

الوقاية من الحريق – مصدر الحرارة – استخراج الأدخنة – دخان – انتشار – محطة كهرومائية .

Résumé :

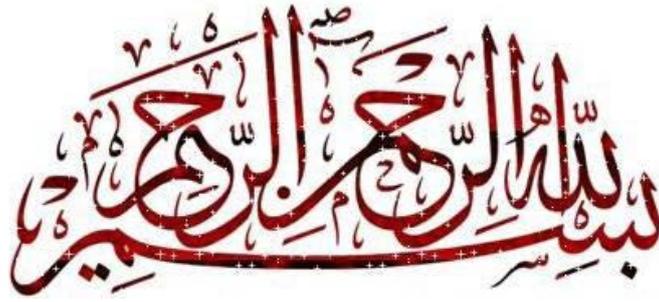
Le présent travail est une étude numérique de la propagation des fumées et de désenfumage en cas d'incendie dans une centrale hydro-électrique à deux niveaux avec un niveau au sous sol. Le travail consiste à rechercher les meilleures stratégies de désenfumage pour différents cas de la position de la source de feu, par rapport à la position des trappes d'évacuation des fumées et des différentes ouvertures de service. Cette optimisation permet d'assurer la sécurité des personnes lors des opérations d'évacuation et de sauvetage ainsi que des biens matériels utilisés pour la gestion de la centrale. Les simulations numériques sont faites à l'aide du code de calcul « Fire Dynamic Simulator » (FDS). La source de chaleur, paramètre clé dans la modélisation du phénomène, a été modélisée à l'aide de relations empiriques de la littérature.

Mots clés : Simulation, fumée, propagation, centrale hydroélectrique, désenfumage, source de chaleur.

Abstract:

This work is a numerical study of the spread and extraction of smoke in case of fire in a two levels hydro-electric unit with one at the underground. The work consists to find the best means to extract smoke for different cases with respect to the position of the source fire in order to ensure the safety of persons during the evacuation and rescue. The implementation of the Code of calculation Fire Dynamic Simulator (FDS) for a smoke was carried out in order to demonstrate the effectiveness of the operation with respect to the position of the traps and the position of the source of fire. The source fire has been modeled with empirical relations from literature.

Key words: Simulation, smoke propagation, hydro electric unit, smoke Smoke extraction,.



Je remercie avant tout Allah le tout puissant pour m' avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Remerciements

Au terme de ce projet de Mémoire de Magister, il m'est indispensable de m'acquitter d'une dette de reconnaissance auprès de toutes les personnes dont l'intervention a favorisé son aboutissement.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur B.BENKOUSSAS pour les conseils, la patience et pour le soutien et l'attention apportés tout le long de la réalisation de ce travail. **Qu'**il trouve ici ma profonde gratitude et mes respects les plus profonds.

Comme je tiens particulièrement à remercier Monsieur le Président du jury de m' avoir fait l'honneur de présider la soutenance, ainsi que les membres du jury, qui ont consacré une part importante de leur temps à la lecture et à l'évaluation de ce rapport.

Merci aux enseignants du département de Génie Mécanique qui ont participé à ma formation tout au long de ces trois ans.

Enfin, c'est dans un état d'esprit mitigé que je rédige ces quelques lignes afin de remercier toutes les personnes qui ont contribué implicitement ou explicitement à l'ensemble de ce travail.

Je remercie ma famille, mes amis et mes collègues pour leurs encouragements et leur soutien.

Dédicaces

A ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me soutenir,
A ceux qui leur amour m'a donné la volonté d'aller toujours de l'avant,
A mes très chers parents, qu'Allah les protège. **Je** vous dédie ce travail, avec
toute ma gratitude, mes salutations et mes respects les plus profonds.

A mes frères

A Mohamed Amine

A toute ma famille et tous mes amis

Je dédie ce travail

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Nomenclature

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : Généralités et Définition de la Problématique	
1. Introduction	3
2. Les risques d'incendie dans les milieux semi confinés.....	3
3. Les principales sources d'incendie en milieux confinés et semi confinés	4
4. Caractéristiques d'un feu en intérieur.....	4
5. Développement de l'incendie dans un milieu confiné.....	5
5.1. Phénomènes inhérent aux incendies en milieu confiné.....	5
5.1.1 L'allumage.....	5
5.1.2 La progression pré-flash over.....	6
5.1.3 Le flash over.....	6
5.1.4 Le post-flash over.....	6
5.1.5 L'extinction.....	7
5.2 .L'incendie pleinement développé.....	7
5.3. Phénomènes particuliers liés aux locaux sous-ventilés	7
5.3.1 Le phénomène de pulsation	7
5.3.2 Le back-draft	7
5.3.3 Phénomène de reprise du développement.....	8
6. Incendies en milieux confinés et production des fumées.....	8
7. Dynamique du mouvement des fumées.....	10
7.1. Poussée d'Archimède (force de flottabilité).....	10
7.2. Surpression causée par le feu.....	11

7.3 .Dilatation thermique.....	12
7.4 Différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment.....	13
7.5 Différences de pression en fonction de la hauteur d'un bâtiment.....	14
7.6 Densité et composition de la fumée.....	15
8. Influence de la charge combustible et de la ventilation sur les incendies	16
9.Incendies en milieux confinés et semi-confinés.....	16
9.1.Feu en milieu clos ou semi-ouvert	16
9.2. Feux en installations industrielles	17
10. Désenfumage des installations industrielles.....	18
10.1. Principes de désenfumage.....	18
10.2. Rôles de la ventilation.....	18
10.3 Types de ventilations.....	19

CHAPITRE 2 : Revue Bibliographique

1. Introduction.....	22
2. Propagation des fumées dans des milieux confinés.....	23
3. Comparaison faites avec d'autres théories et données expérimental	31

CHAPITRE 3 : SOURCE DE CHALEUR DE L'INCENDIE

1. Introduction	36
2. Equations d'un feu de compartiment	37
2.1. Equation de bilan d'énergie simplifiée.....	37
2.2. Approximation du taux de chaleur au carré du temps du feu.....	41
3. Taux de chaleur libérée associé aux différentes étapes et sur la durée du feu.....	42
4. Caractéristiques d'une flamme de feu turbulente.....	44
4.1 Flamme idéale	45
4.2 Equations de flammes basées sur l'expérience.....	47
4.2.1. Flamme de zukoski.....	47

4.2.2. Flamme de heskestad.....	47
4.2.3. Flamme de macffery	48
4.2.4. Flamme de thomas	49
5. Interaction entre la flamme avec le mur et l'angle.....	49

CHAPITRE 4 : Présentation du code de calcul et étude numérique

1. Introduction.....	51
2. Classification des logiciels d'incendie.....	51
2.1. Modèle de Zones.....	51
2.2. Modèles de champs - Simulation Numérique (CFD).....	51
3. Description du code FDS.....	52
3.1 Principe et objectifs du modèle.....	52
3.2 Potentialités et limitations de FDS	53
3.3 Modèles Mathématiques présents dans FDS.....	54
3.3.1. Modèle hydrodynamique	54
3.3.2. Utilisation de la méthode LES dans FDS.....	55
3.3.3. Modèle de combustion.....	56
4. Etude numérique	56
4.1. Maillage et hypothèses générales.....	57
4.2. Définition de la configuration de l'étude.....	60
4.3. Exposition des scénarios.....	62

CHAPITRE 5 : Résultats et Interprétations

5.1. Présentation et Résultats du 1 ^{ier} scénario (feu dans l'angle).....	66
5.1.1. La 1 ^{ere} stratégie	68
5.1.2. La 2 ^{eme} stratégie.....	72
5.1.3. La 3 ^{eme} stratégie	77
5.1.4. La 4 ^{eme} stratégie	81
5.2. Présentation et Résultats du 2 ^{eme} scénario (feu près du mur).....	85

5.2.1. La 1 ^{ère} stratégie	85
5.2.2. La 2 ^{ème} stratégie.....	90
5.2.3. La 3 ^{ème} stratégie	94
5.2.4. La 4 ^{ème} stratégie	97
5. 3. Présentation et Résultats du 3 ^{ème} scénario (feu sur la 1 ^{ère} turbine).....	102
5.3.1. La 1 ^{ère} stratégie	102
5.3.2. La 2 ^{ème} stratégie.....	107
5.3.3. La 3 ^{ème} stratégie	112
5.3.4. La 4 ^{ème} stratégie	116
5. 4. Présentation et Résultats du 4 ^{ème} scénario (feu sur la 2 ^{ème} turbine).....	122
5. 5. Présentation et Résultats du 5 ^{ème} scénario (feu sur la 3 ^{ème} turbine).....	122
5.5.1. La 1 ^{ère} stratégie	122
5.5.2. La 2 ^{ème} stratégie.....	125
5.5.3. La 3 ^{ème} stratégie	129
5.5.4. La 4 ^{ème} stratégie	132
Conclusion générale	137
Références bibliographique	139
ANNEXE.....	141

LISTE DES FIGURES

Fig.1.1 : Phénomènes inhérent aux incendies en milieu confiné

Fig.1.2 : La production des fumées dans un feu confiné

Fig.1.3 : Poussée d'Archimède

Fig.1.4 : Mouvement d'air par différence de pression dans un milieu fermé

Fig.1.5 : Dilatation thermique

Fig. 1.6 : Mouvement de l'air en fonction de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment

Fig. 1.7 : Les quatre étapes d'un incendie en intérieur

Fig.1.8 : ventilation longitudinale avec accélérateurs

Fig.1.9 : ventilation transversale

Fig. 1.10 : Schéma des différents systèmes de ventilation en situation normale d'exploitation

Fig 2.1: le modèle physique du CFD

Fig.2.2: schéma d'un tunnel en feu

Fig.3.1 : diagramme de la balance d'énergie pour la couche chaude dans un compartiment

Fig.3.2 : la variation du taux de chaleur libéré avec le temps

Fig.3.3 : les trois zones d'une flamme flottante axisymétrique

Fig.3.4 : L'origine virtuelle d'une flamme

Fig.3.5 : la source de chaleur près du mur et dans l'angle

Fig.4.1 : Evolution de la température pour les cas simulés

Fig.4.2 : le temps de calcul pour les cas simulés

Fig.4.3: définition du domaine d'étude

Fig.4.4 : les différents niveaux de la centrale

Fig.4.5: les différentes ouvertures

Fig.4.6: présentation du niveau du personnel

Fig.4.7:1^{ère} stratégie sans ouverture (sauf la porte du personnel)

Fig 4.8: 2^{ème} stratégie avec les portes ouvertes (l'ascenseur est ouvert)

Fig 4.9: 3^{ème} stratégie avec un débit d'extraction sur les trappes et la présence de trémies

Fig 4.10 : 4^{ème} stratégie avec un débit d'extraction sur les trappes et 3 évacuateurs

Fig.5.1: 1^{ier} scénario sans ouverture (sauf la porte du personnel)

Fig.5.2 : 1^{er} scénario avec les portes ouvertes (l'élévateur est ouvert)

Fig.5.3: 1^{er} scénario avec un débit d'extraction sur les trappes et la présence de trémies

Fig.5.4 : 1^{er} scénario avec un débit d'extraction sur les trappes et 3 évacuateurs

Figures du 1^{er} scénario (feu dans l'angle)

Fig 5.5 propagation de la fumée à t = 30s et t = 60s pour S1

Fig 5.6 propagation de la fumée à t = 90s et t = 120s pour S1

Fig 5.7: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S1

Fig 5.8 : distribution de la température à une hauteur 1.5m à t =60s et t =120s pour S1

Fig 5.9 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S1

Fig 5.10: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S1

Fig 5.11: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t=60s et t = 120s pour S1

Fig 5.12 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S1

Fig 5.13 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t = 60s et t=120s pour S1

Fig 5.14 : les points de mesure le long de la hauteur devant la porte

Fig 5.15 : Distribution de la température près de la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S1

Fig5.16 : les points de mesure le long de la hauteur au milieu des escaliers

Fig 5.17 : Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à t = 60s et t=120s pour S1

Fig 5.18 propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S2

Fig 5.19: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S2

Fig 5.20: distribution de la température à une hauteur 1.5m à t =60s et t =120s pour S2

Fig 5.21: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S2

Fig 5.22: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t= 120s pour S2

Fig 5.23: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t =60s et t=120s pour S2

Fig 5.24: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S2

Fig 5.25 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t = 60s et t = 120s pour S2

Fig 5.26 : Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.27 : Distribution de la température au milieu des escaliers à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig5.28 : propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.29: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.30: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.31 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.32 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig5.33 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.34: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.35: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.36: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig5.37 : Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.38 propagation de la fumée à $t = 90s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.39: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.40: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.41: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.42: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.43 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.44 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig5.45 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.46: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.47: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.48: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 60s$

Fig 5.49: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 120s$

Figures du 2^{ème} scénario (feu près du mur)

Fig 5.50 propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.51: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.52 : distribution de la température à une hauteur 1.5m à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.53: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.54: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.55: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.56 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.57 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.58 : Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.59 : Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.60 propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.61: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.62: distribution de la température à une hauteur 1.5m à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.63: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.64: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.65: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.66: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.67 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.68 : Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.69 : Distribution de la température au milieu des escaliers à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.70: propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.71: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.72: Distribution de la température à une hauteur 1.5 du sol à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.73 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.74 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig5.75: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.76: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.77: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.78: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig5.79: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.80 : propagation de la fumée à $t = 90s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.81: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.82: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.83: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.84: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.85 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.86 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig5.87: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.88: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.89: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.90: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 60s$

Fig 5.91: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 120s$

Figures du 3^{ème} scénario (feu sur 1^{ère} turbine)

Fig 5.92 propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.93: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.94 : distribution de la température à une hauteur 1.5m à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.95 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.96: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.97: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.98: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.99 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.100 : Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.101: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.102 propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.103: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.104: distribution de la température à une hauteur 1.5m à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.105: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.106: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.107: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.108 Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.109: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.110: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.111 : Distribution de la température au milieu des escaliers à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.112: propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.113: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.114: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.115 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.116 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.117: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.118: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.119: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.120: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig5.121: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.122 propagation de la fumée à $t = 90s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.123: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.124: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.125: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.126: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.127 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.128 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig5.129: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.130: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.131: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.132: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 60s$

Fig 5.133: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 120s$

Fig 5.134: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 60s$

Fig 5.135: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 120s$

Figures du 5^{ème} scénario (feu sur 3^{ème} turbine)

Fig 5.136 : propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.137: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.138 : distribution de la température à une hauteur 1.5m à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.139 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.140: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.141: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t=60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.142: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.143 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t=120s$ pour S1

Fig 5.144 : Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Fig 5.145: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t=120s$ pour S1

Fig 5.146 propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.147: distribution de la température à $t =60s$ et $t =120s$ pour S2

Fig 5.148: distribution de la température à une hauteur 1.5m à $t =60s$ et $t =120s$ pour S2

Fig 5.149: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.150: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t= 120s$ pour S2

Fig 5.151: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t =60s$ et $t=120s$ pour S2

Fig 5.152 Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.153: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.154: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.155 : Distribution de la température au milieu des escaliers à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Fig 5.156 propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.157: distribution de la température à $t =60s$ et $t =120s$ pour S3

Fig 5.158: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol à $t =60s$ et $t =120s$ pour S3

Fig 5.159 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.160 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig5.161: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.162: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.163: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.164: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig5.165: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

Fig 5.166 : propagation de la fumée à $t = 90s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.167: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.168: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.169: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.170: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.171 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.172 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig5.173: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.174: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.175: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Fig 5.176: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 60s$

Fig 5.177: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 120s$

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : les valeurs de α pour différents taux d'accroissement.....

Tableau 3.2 : les différentes valeurs des constantes κ et η

Tableau 4.1 : Résultats de la simulation pour différents cas de maillages.....

Tableau 4.2 : la validation du maillage avec les équations.....

Tableau 5.1 : la variation de la température à une hauteur de 1.5 m du sol le long de la centrale.....

Nomenclature

t Temps (s)

t_p Temps de pénétration thermique (s)

\dot{Q} Flux de chaleur libérée (W)

\dot{m}_g Débit massique des gaz (kg/s)

c_p Chaleur spécifique des gaz, (J/kg K)

T_g Température de la couche supérieure chaude (°C)

T_a Température ambiante des gaz (°C)

h_k Coefficient de transfert de chaleur (W/m²K)

A_0 Surface de l'ouverture (m²)

A_T Surface limite du domaine considéré pour le transfert de chaleur (m²)

H_0 Hauteur de l'ouverture (m)

H_N Hauteur à la couche neutre (m)

W Largeur de l'ouverture (m)

C_d Coefficient de décharge

α Diffusivité thermique (m²/s)

δ Epaisseur de l'interface (m)

α Facteur de développement de feu (kW/s²)

\dot{Q}_{FO} Taux de chaleur libéré 'flash-over' (kW)

t_{FO} Temps au 'flash-over'

E Chaleur de combustion complète des objets (J)

\dot{Q}_{FD} Flux de chaleur libérée pour un feu complètement développé (W)

t_{FD} Temps pour un feu complètement développé (s)

E_d Énergie libérée durant le déclin (W)

t_{decay} Temps de déclin (s)

\dot{m}_p Débit massique de la flamme (kg/s)

Z Hauteur (m)

Z_0 Origine virtuel (m)

L Hauteur de la flamme (m)

D Diamètre de la base de feu (m)

\dot{Q}_c Taux de chaleur convective relâché (W)

z Hauteur au dessus de la base de feu (m)

z_0 Hauteur de l'origine virtuelle au dessus de la base de feu (m)

κ et η constantes de La flamme de maccffery

\dot{m}_p Débit massique de la flamme (kg/s)

$\dot{m}_{p,corner}$ Débit massique de la flamme dans l'angle (kg/s)

$\dot{m}_{p,wall}$ Débit massique de la flamme près du mur (kg/s)

P Périmètre du feu (m)

Fr Nombre de froude

ΔT_{max} Température max (°C)

ρ_a Masse volumique de l'air ambiant (kg/s)

U_c Vitesse critique du vent (m/s)

U_c^* Vitesse critique du vent adimensionnelle

Q^* Taux de chaleur libérée adimensionnelle

W largeur du tunnel (m)

H Hauteur (m)

V_c Vitesse critique (m/s)

$U_{c,W}$ Vitesse critique du vent du mur (m/s)

$U_{c,C}$ Vitesse critique du vent dans l'angle (m/s)

K Facteur de correction

Ri_c Nombre de Richardson

INTRODUCTION GENERALE

Le feu est un phénomène connu depuis des centaines de milliers d'années et si l'homme semble en maîtriser l'usage, il lui arrive aussi de ne pas le contrôler. Actuellement le fonctionnement physico-chimique du feu n'est pas complètement élucidé, et cela malgré de très nombreuses études.

La connaissance et la maîtrise du risque incendie en milieux confinés, que l'on appelle couramment feux de compartiments, passent par la compréhension des phénomènes mis en jeu dans un feu, en particulier, les phénomènes thermiques, aérodynamiques et chimiques qui en régissent le développement et la propagation.

Ces incendies ont coûté beaucoup de vies humaines, et nous ont permis d'apprendre aspects qui n'étaient pas connus ou attendus auparavant. Parmi les nouveaux enseignements, le développement extrêmement rapide du feu, combiné avec une croissance de la température jusqu'à des niveaux très élevés, ainsi qu'une émission énorme de fumée dès le début de l'incendie. Le deuxième enseignement a été la transmission de l'incendie d'un milieu à un autre même si les distances qui les séparent sont grandes (de l'ordre 200 m), comme dans le cas du tunnel du Mont-Blanc [1]. Le troisième enseignement, le plus marquant, a été le comportement des nombreux usagers dans les endroits fermés tels que les tunnels routiers et les infrastructures souterraines. Aussi un autre aspect important est la perte économique causée par les incendies.

La menace principale d'un incendie est l'espace souterrain confiné gênant l'évacuation de la fumée et de la chaleur. Ces incendies ont conduit à une nouvelle prise de conscience et à de nombreuses initiatives visant à développer plus les recherches afin de mieux comprendre le comportement du feu, le mouvement des fumées et l'augmentation de la température, pour diminuer les risques et améliorer les systèmes existants.

Pour réaliser ces recherches, diverses méthodes existent. On peut notamment réaliser des expériences en grandeur nature, sur maquettes, ou faire des simulations numériques. Ces dernières ont pendant longtemps été très consommatrices en ressources informatiques mais l'accroissement des capacités de calcul durant les dix dernières années a permis d'en diminuer le coût et elles se sont généralisées.

La température n'est généralement pas considérée comme un danger direct très important, sauf dans les environs immédiats du foyer ou lors d'incendies de très fortes puissances. Cependant les températures peuvent atteindre en revanche plusieurs centaines de degrés, ce qui peut entraîner un danger indirect dont le premier est le rayonnement émis par ces gaz chauds qui peuvent affecter les usagers, le second est le risque de chute d'équipements d'exploitation situés au plafond des ces infrastructures par suite de rupture (chemins de câbles, appareils d'éclairage, accélérateur ou élément de génie civil etc...).

L'objectif global de l'étude menée dans ce travail est la détermination de la température maximale atteinte dans un incendie de centrales hydroélectriques souterraines complétée par une comparaison des résultats de simulation obtenus numériquement, ainsi que le désenfumage de cette installation. Ceci nous permettra d'acquérir une base de données sur le développement et La propagation de la fumée dans les milieux confinés de cette catégorie d'infrastructures.

Ce mémoire est composé de cinq chapitres :

Après une introduction, dans un premier chapitre on présentera la problématique du feu dans les installations industrielles et quelques généralités. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différents travaux effectués dans le domaine, les études menées sur la propagation des feux dans des milieux confinés, la stratification et les modèles mathématiques ainsi que les codes numériques utilisés. Dans le troisième chapitre, nous présentons les techniques empiriques de modélisation de la source de chaleur, trouvées dans la littérature. Une synthèse détaillée sur la modélisation de la source de chaleur a été réalisée et un choix est porté sur deux relations principales selon que le feu se situe au niveau des parois ou au milieu du domaine.

Dans le quatrième chapitre, on décrira la simulation numérique du domaine choisi avec une présentation globale du code de calcul. Il s'agit ici du code FDS ainsi que la mise en équations du phénomène.

En cinquième chapitre, on présentera des résultats de simulation et leurs interprétations.

Finalement la conclusion de l'étude sera présentée, avec une projection sur les perspectives.

CHAPITRE 1

Définition de la Problématique

et

Généralités

1. Introduction

Les incendies dans les infrastructures souterraines représentent une lourde menace pour la vie des personnes. Il existe trois bonnes raisons de protéger les infrastructures souterraines (centrale souterraine ou réseaux souterrains) contre l'incendie, en premier lieu, pour protéger les vies humaines, ce qui ne dépend pas nécessairement des performances des structures, mais aussi davantage du fonctionnement des dispositifs de secours, des systèmes d'évacuations des fumées, de la ventilation, du maintien de l'alimentation électrique (câbles et réseaux électriques) et de la communication.

En second lieu, pour protéger l'environnement immédiat de ces structures, l'effondrement de l'infrastructure elle-même peut mettre en danger les personnes à proximité, (Eclatement important de la structure en béton du tunnel du mont blanc lors de l'incendie de 2002, une section complète de 100 m de la structure s'est effondrée lors de l'incendie du tunnel de St Gotthard en 2001 [1]).

Enfin en troisième lieu, viennent les pertes économiques résultantes de la défaillance de la structure. La baisse d'activité due à la déviation du trafic, les réparations ou la reconstruction engendrent des pertes économiques assez importantes.

2. Les risques d'incendie dans les milieux semi confinés

Lors d'un incendie en milieu confiné, le risque principal est la perte de visibilité due à l'opacité des fumées. Le déplacement des personnes est ralenti et les issues de secours deviennent difficiles à repérer. Ensuite vient le problème de toxicité des fumées, qui même à faible concentration, peut s'avérer mortel à une exposition prolongée.

La hausse de la température loin du foyer n'arrive qu'en troisième position, car le rayonnement des fumées ne devient excessif que quand l'atmosphère est déjà irrespirable. À proximité du foyer le rayonnement de la flamme est tout de suite très important, mais il diminue rapidement avec la distance.

Les équipements (accélérateurs, éclairage, câbles) et le génie civil (voûte, gaines de ventilation) subissent aussi des dommages pendant l'incendie, à cause de l'augmentation de la température des fumées et de la densité des gaz corrosifs présents dans ces fumées. Ces

équipements doivent résister à l'influence de ces paramètres pendant la durée d'évacuation et de secours. Selon les normes, ils doivent résister pendant une durée minimale, suivant le cas, d'une à deux heures à des températures de 200 à 400°C pour permettre l'évacuation des personnes et l'intervention des secours [2].

3. Les principales sources d'incendie en milieux confinés et en milieux semi confinés

Les sources potentielles d'incendie dans une installation de transport ou industrielle sont les matériaux et les équipements dans l'espace lui-même. La puissance thermique de l'incendie peut atteindre des niveaux variables, selon les matériaux enflammés existant dans ces milieux. L'incendie dans les lieux professionnels peut atteindre des puissances plus élevées. Ces lieux étant presque totalement fermés, la dynamique de l'incendie est très différente de celle dans un tunnel (milieu semi confiné).

L'incendie peut se produire en tout endroit et pour tous types d'équipements. Les caractéristiques de l'incendie seront fortement variables d'un cas à l'autre. La puissance thermique d'un incendie varie de 2 MW (petite incendie de véhicule de tourisme) à 200 MW (incendie d'une citerne d'hydrocarbure, centrales électriques qui utilisent des carburants hautement inflammables). La plupart de ces incendies sont causés par une inflammation spontanée par défaillance technique (échauffement anormale, court-circuit,...).

La puissance d'un incendie varie beaucoup avec les circonstances de l'incendie, selon les objets impliqués et leur chargement, mais aussi de manière fondamentale selon les conditions d'alimentation en air frais et selon la surface de contact et l'endroit où il se produit. Un feu au milieu d'une installation n'a pas les mêmes caractéristiques que celui qui se produit à proximité des murs du local.

4. Caractéristiques d'un feu en intérieur

Les feux en intérieur sont influencés par le confinement des écoulements, les caractéristiques thermiques des parois et l'apport en oxygène dans le local. Le développement des panaches et de la zone chaude est influencé par la présence du plafond et des parois latérales. Le confinement de la zone chaude accélère la dégradation des combustibles. Les écoulements à travers les ouvertures verticales ou horizontales sont déterminants pour l'apport d'oxygène et la propagation des fumées.

Pour les feux en compartiments équipés d'une ventilation mécanique, l'apport d'air est un facteur déterminant pour le développement du feu. Son contrôle peut permettre la maîtrise du développement de l'incendie et par conséquent de la propagation de la fumée.

5. Développement de l'incendie dans un milieu confiné

5.1 Phénomènes inhérents aux incendies en milieu confiné

Grâce au retour à l'accidentologie et aux expériences vécues, il est possible, et malgré la complexité des phénomènes mis en jeu, d'identifier les différentes phases du développement d'un incendie en milieu confiné. Toutefois différentes évolutions peuvent être observées en fonction de la ventilation des locaux, de l'infrastructure et des produits de combustion et leurs agencement. Les différentes étapes d'un développement de feu sont représentées et décrites sur la figure (1.1):

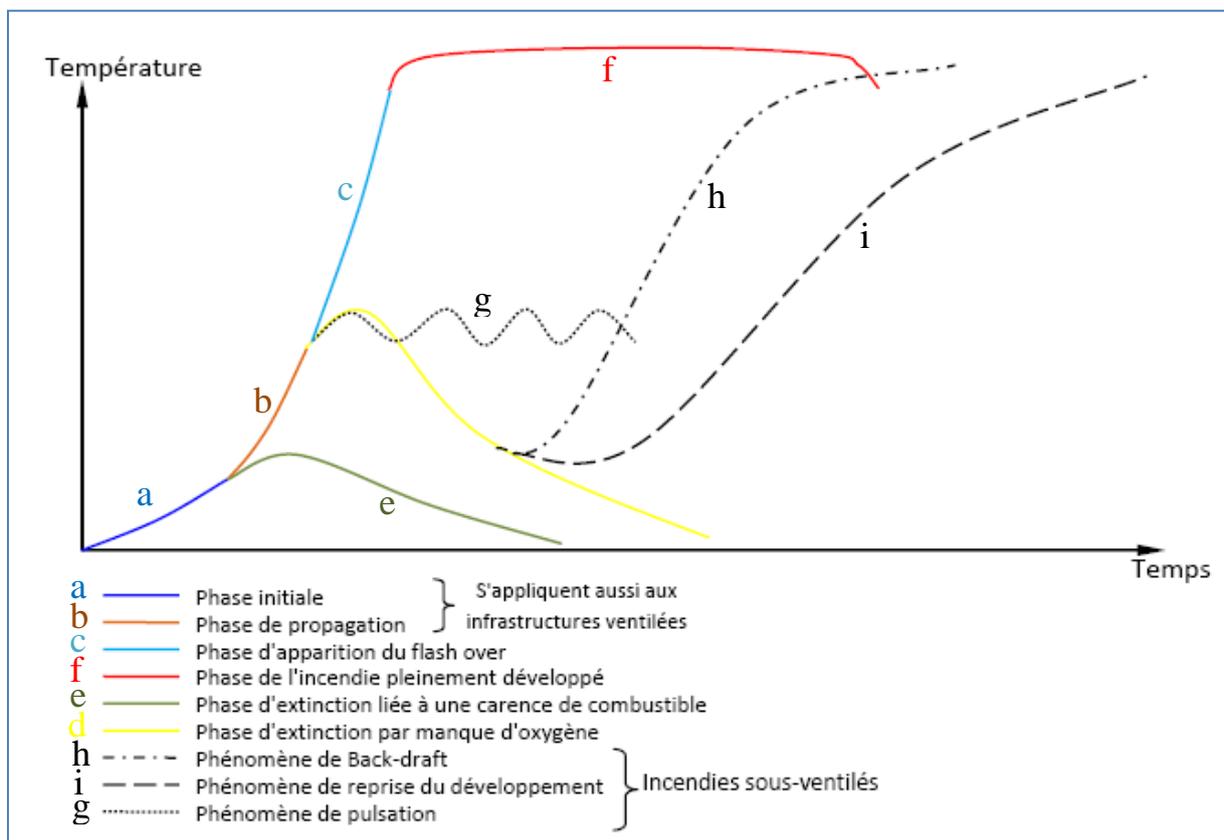


Fig.1.1 : Phénomènes inhérent aux incendies en milieu confiné

5.1.1 L'allumage

L'initiateur d'un incendie peut avoir des origines variées : accident, point chaud, court-circuit, etc. Le rôle et la puissance de la source initiale ne sont pas sans conséquences sur les

suites de l'incendie: vitesse de développement, auto extinction. C'est le processus d'inflammation qui peut être très rapide ou très lent selon l'état physique du combustible (gaz, liquide ou solide), (figure (1.1), tronçon a).

5.1.2 La progression pré-flash over

Le feu se propage de la source initiale puis se transmet par échauffement ou pyrolyse aux sources environnantes. La disposition des éléments combustibles joue un rôle capital, car elle permettra la propagation et le développement ou non de l'incendie. Dans cette phase le feu est progressif et il est souvent facile à éteindre, (figure (1.1), tronçon b).

La progression se caractérise par la montée rapide de la température suite à la montée en puissance de l'incendie. Dans cette phase, en effet, si le combustible se trouve en petite quantité insuffisante, l'extinction peut avoir lieu, due à la carence de combustible. Dans le cas des incendies en milieux ouverts, la combustion peut se propager de deux façons différentes : soit par transmission de chaleur, soit par transport des substances en combustion.

5.1.3 Le flash over

La courbe de puissance du feu s'accélère rapidement. Tous les matériaux inflammables présents dans le local entrent en combustion lorsque l'apport en air frais est suffisant. Plusieurs auteurs ont définis dans leurs travaux le 'flash over' comme étant une progression à l'exponentiel d'une phase d'un incendie. L'incendie poursuit sa progression jusqu'à un stade particulier se traduisant par une élévation importante de la température d'environ 500°C. Ce phénomène a été très largement étudié depuis les années 1970 autant d'un point de vue expérimental que numérique. Les conditions d'occurrence de ce phénomène se résument en l'existence d'une part d'une couche chaude constituée de fumées et gaz de combustion partiellement brûlés d'un côté du local en feu, et d'autre par l'existence d'une couche d'air frais dans l'autre côté du local. Pour que cela arrive, le local doit être suffisamment ventilé pour alimenter le feu en oxygène lors de phase de croissance car la combustion devient difficile en dessous d'un taux d'oxygène inférieur à 12%, [3]. Dans le cas contraire, on se retrouve sur la partie qui représente la phase d'extinction (figure (1.1), tronçon c) par manque d'oxygène. Cette situation va générer une grande production des gaz imbrûlés et toxiques.

5.1.4 Le post-flash over

L'embrasement généralisé, (figure (1.1), tronçon d) qui s'ensuit, entraîne dans le local une consommation de plus en plus rapide de l'oxygène présent. Rapidement, le régime du foyer n'est plus déterminé par l'apport de combustible mais par l'apport d'oxygène aux

ouvertures. Si celui-ci est suffisant, le feu entre dans la phase stabilisée. Les gaz de pyrolyse imbrûlés se propagent dans le local.

5.1.5 L'extinction

Le combustible et/ou l'oxygène s'épuisent et le foyer s'éteint, (figure (1.1), tronçon e). Dans le cas de faible ventilation, le foyer peut rester couvant sur une longue période. Le rendement de la combustion étant bas, on retrouve une grande quantité de gaz toxiques et d'imbrûlés dans les gaz. On risque alors un phénomène d'explosion des fumées 'back-draft' à un apport d'oxygène. Dans un milieu homogène, on considère qu'il y aura extinction pour un pourcentage d'oxygène inférieur à 12%.

5.2 L'incendie pleinement développé

Cette étape suit l'étape d'embrasement généralisé et correspond au pic de puissance de l'incendie, (figure (1.1), tronçon f). Elle peut durer plusieurs heures en fonction de la quantité de combustible disponible. Elle est caractérisée par une température maximale du feu. Elle suppose que l'apport d'air frais dans le local est suffisant pour assurer la combustion de l'ensemble des matériaux inflammables contenus dans l'enceinte en feu.

5.3 Phénomènes particuliers liés aux locaux sous-ventilés

Différents phénomènes spécifiques peuvent être observés lorsque l'incendie est fortement confiné car son développement est ainsi entièrement contrôlé par la quantité d'air disponible dans le local en feu. Il est important de rappeler qu'à ce stade, la combustion devient très difficile pour une concentration en oxygène dans le milieu inférieure à 12%. Ces phénomènes sont les suivants :

5.3.1 Le phénomène de pulsation

Par manque d'oxygène, la température dans le local chute. Cela conduit à une dépression qui entraîne l'admission d'air frais de l'extérieur. Cet air permet une reprise de la combustion et une augmentation de la température et par suite une surpression dans le local. L'apport d'air frais ainsi s'arrête et le processus se répète successivement, (figure (1.1), tronçon g).

5.3.2 Le back-draft

Le 'back-draft' peut se développer à partir de feux de matériaux combustibles solides ou de liquides inflammables qui, en s'appauvrissant en oxygène, génèrent une atmosphère riche en combustibles. Si de l'air se retrouve injecté soudainement dans l'espace contenant

cette atmosphère viciée par l'ouverture d'une porte ou par une fenêtre brisée, un courant d'air frais s'écoulera par gravité dans le local tandis que les gaz, riches en combustibles, plus chauds, s'évacueront vers l'extérieur par la partie haute de l'ouverture. L'air et les gaz riches en combustibles se mélangeront le long de l'interface entre les deux écoulements de gaz et d'air frais.

Si, localement, un mélange inflammable se forme, une déflagration peut se produire dès que le mélange entre en contact avec une source d'inflammation. La déflagration provoquera le réchauffement des gaz et leur expansion, poussant ainsi les gaz imbrûlés à l'extérieur du local devant le front de flamme. Ces gaz se mélangeront avec l'air extérieur à l'espace en feu. Comme la flamme traverse le local et passe par l'ouverture, elle enflamme au passage le mélange très riche en gaz imbrûlés situés à l'extérieur du local provoquant ainsi l'occurrence d'une boule de feu et d'une onde de pression, (figure (1.1), tronçon h) [4].

5.3.3 Phénomène de reprise du développement

Ce phénomène apparaît dans les mêmes conditions qu'un 'backdraft' suite à un apport soudain d'air frais dans le local à l'exception que la température initiale des imbrûlés est supérieure à la température d'auto-inflammation. Ces gaz s'enflamment donc rapidement au contact de l'air. Le processus de mélange formant un nuage explosif tel que défini dans le 'backdraft' n'a donc pas le temps de se réaliser. Le phénomène explosif n'apparaît donc pas et s'apparente plutôt au phénomène du 'flash-over', (figure (1.1), tronçon i).

6. Incendies en milieux confinés et production des fumées

Les incendies en milieu confiné sont connus pour leur grande production de fumée noire et dense. Généralement on l'explique par le fait que, dans ces incendies, le feu se trouve sous ventilé mais en réalité cela n'est pas tout à fait exact, et le phénomène de production de fumées est plus complexe. Le feu et la production de fumées dans un local passe par trois étapes:

Première étape : Au début, le feu est de petite taille, il produit des gaz de combustion incolores qui montent et se trouvent bloqués par le plafond. Tant que le feu est encore petit, il reste correctement alimenté en oxygène et prend de l'ampleur, la flamme augmente donc en diamètre et en hauteur.

Deuxième étape : Au bout de quelques instants, le haut de la flamme va atteindre la zone dans laquelle le comburant aura été remplacé par les produits de la combustion qui, à ce stade

sont toujours invisibles. Mais nous avons ici une flamme de diffusion, donc une flamme qui capte son comburant par sa périphérie. La partie basse de la flamme capte toujours du comburant, puisqu'elle est dans une zone correctement ventilée. Par contre, le haut de la flamme va commencer à manquer de comburant dont elle a besoin. Visuellement, cela se remarque, le bas de la flamme est jaune, tandis que le haut est orange. Le carbone, présent dans la partie basse de la flamme, réagit donc correctement puisqu'il est associé à une quantité suffisante d'oxygène, mais le carbone qui est dans le haut de la flamme, ne peut plus réagir correctement puisqu'il ne dispose pas d'assez d'oxygène. Ce carbone va donc commencer à s'échapper sans avoir réagi et va commencer à former une couche de fumée visible.

Troisième étape : A ce stade, le feu a déjà pris une bonne ampleur. Le cycle séchage pyrolyse inflammation est devenu très rapide et le feu prend de l'ampleur, de seconde en seconde. L'étape durant laquelle la flamme ne touche pas encore le plafond, tout en ayant sa partie haute sous-oxygénée, dure en fait très peu de temps. En quelques instants, le feu a continué à progresser et désormais la flamme touche le plafond. D'un seul coup, la situation va se dégrader car la flamme de diffusion va maintenant être détériorée «mécaniquement» par le plafond, et la quantité de fumée produite devient excessive. Pour comprendre cette dégradation soudaine des conditions, il suffit de prendre une bougie qui, habituellement ne fume pas. Mais, dès qu'on la touche avec la lame d'un couteau, un filet de fumée noire apparaît, et ce n'est qu'avec une flamme de bougie d'un peu plus d'1cm de haut et de quelques millimètres de diamètres. En imaginant que cette flamme fasse 1m de diamètre et plusieurs mètres de haut, on aurait une idée de la quantité de fumée produite, figure (1.2).

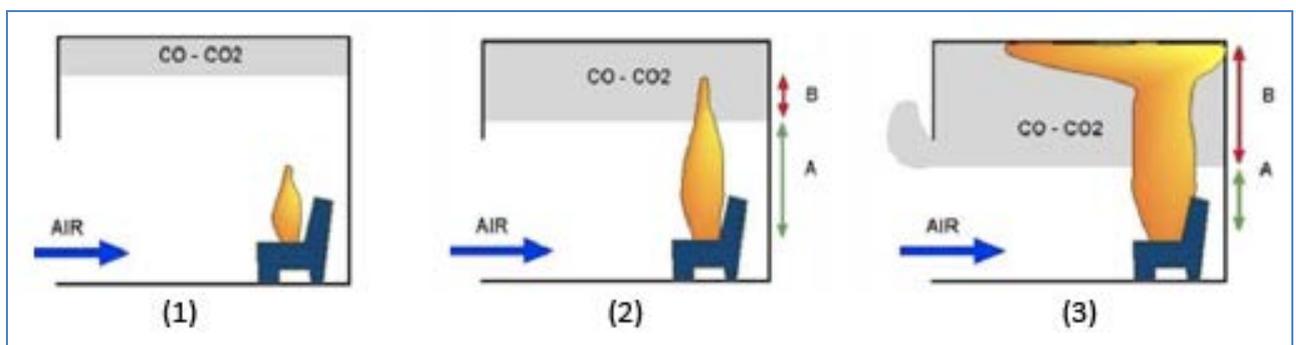


Fig.1.2 : La production des fumées dans un feu confiné

7. La dynamique du mouvement des fumées

En dépit de la composition toxique de la fumée, les risques d'embrasement généralisé et d'explosion de fumée sont des causes qui rendent la fumée très dangereuse et certainement son déplacement rapide, surnois et difficile à prévoir dans un bâtiment en feu. Contournant les obstacles, la fumée transmet sa chaleur et endommage les matériaux qu'elle affleure. Elle diminue la visibilité et asphyxie et intoxique les occupants.

La compréhension du mouvement des fumées donc est essentielle non seulement pour les intervenants qui doivent combattre un incendie et sauver des personnes, mais aussi pour les ingénieurs spécialisés dans la sécurité incendie et qui espèrent la mise en place de dispositifs efficaces de contrôle des fumées.

Pour pouvoir prédire la propagation des fumées dans un bâtiment, il faut tenir compte principalement:

- Des ouvertures présentes.
- Des dispositions des pièces, types de plafonds, ouvertures verticales.
- Des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation.
- Des conditions climatiques extérieures.

Comme tous les fluides, la fumée s'écoule sous l'action des forces extérieures et intérieures. En l'absence de courant d'air, son écoulement est laminaire jusqu'à une hauteur critique, au-delà de laquelle son écoulement devient turbulent. Dans le cas d'un incendie, l'écoulement de la fumée est toujours turbulent, en raison de l'ampleur du feu et de l'énorme pression engendrée. Les forces en cause dans le déplacement des fumées sont essentiellement [5] :

7.1 La poussée d'Archimède (force de flottabilité)

Lorsqu'un feu prend naissance, la chaleur qu'il dégage réchauffe l'air ambiant et crée un courant ascendant d'air chaud (des gaz inertes (Azote, Argon...), un gaz oxydant (Oxygène) et des produits de combustion (fumées)). En montant, ce courant d'air chaud entraîne un courant d'air frais qui alimente la base du feu (figure 1.3). La différence de densités entre l'air chaud et l'air froid engendre des mouvements de convection, c'est-à-dire des déplacements d'air causés par des différences de températures. Etant plus léger que l'air frais, l'air chaud monte par la poussée d'Archimède qui est une force permettant d'élever les

objets dont la densité est plus faible que celle de l'air. Au contraire, l'air frais est plus dense que l'air chaud et la gravité provoque sa descente [3].



Fig.1.3 : Poussée d'Archimède

Les mouvements de convection engendrés par ces deux forces opposées expliquent des phénomènes tels que la forme pointue des flammes en V inversée d'un panache de fumée, la propagation d'un incendie aux étages supérieurs d'un bâtiment en laissant le milieu intact, de même que l'effet de roulement de la fumée au plafond. Cet effet est obtenu surtout au début d'un incendie, lorsque la fumée transmet sa chaleur au plafond par diffusion, provoquant ainsi son refroidissement et sa descente. En descendant, la fumée refroidie se mélange encore par diffusion avec les gaz chauds qui montent, ce qui la fait monter à nouveau. Ce mouvement de montée/descente continue jusqu'à ce que la température au plafond atteigne la même température que la fumée.

7.2. La surpression causée par le feu

Dans un incendie, la fumée s'accumule au plafond pour former une couche de fumée et créer une hausse de pression (pression positive ou surpression), expliquée par la loi des gaz parfaits (ou la loi de Gay Lussac). Cette loi dit que l'augmentation de température T d'un volume V de gaz engendre directement une élévation de sa pression P .

Cette surpression en hauteur engendre une baisse de pression au niveau du sol (Pression négative ou dépression), créant ainsi un mouvement d'air qui entraîne l'air frais vers le haut.

En milieu fermé, l'air frais est aspiré par les ouvertures à des niveaux inférieurs, comme le bas des portes, les fenêtres et les pertes d'étanchéité d'un bâtiment (figure.1.4). On appelle ce mouvement d'aspiration d'air frais un appel d'air. Lorsqu'un équilibre de pression

est atteint, c'est-à-dire lorsqu'il y a autant de fumée qui quitte la pièce que d'air frais qui entre, le niveau de la couche de fumée se stabilise.

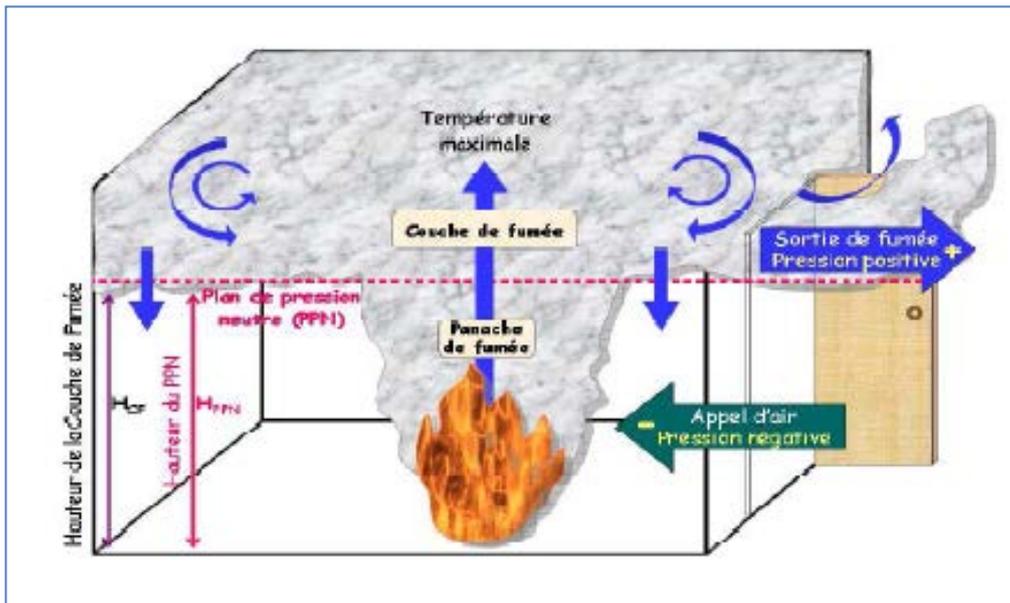


Fig.1.4 : Mouvement d'air par différence de pression dans un milieu fermé

7.3 La dilatation thermique

La chaleur engendrée par un incendie augmente la température de l'air ambiant. Ainsi réchauffée, les molécules gazeuses de l'air et de la fumée s'agitent et leurs collisions créent une dilatation de leurs volumes (figure 1.5), cette expansion des gaz chauds s'explique également par la loi des gaz parfaits (ou la loi de Charles).

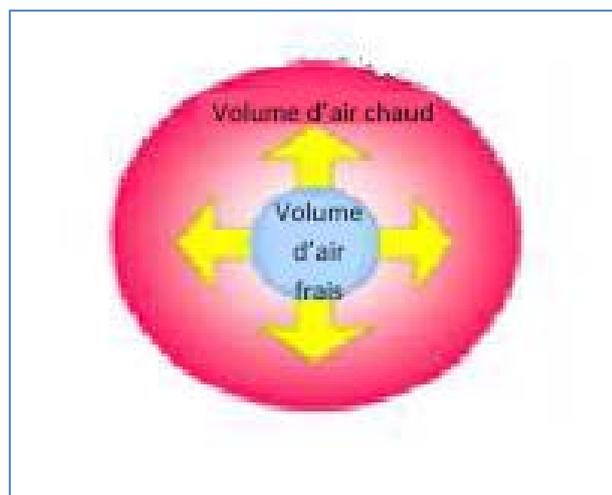


Fig.1.5 : Dilatation thermique

Toujours selon la loi des gaz parfaits, à chaque élévation de température de 1 Kelvin , un gaz se dilate de $1/273$ de son volume initial. Donc, si on prend par exemple un incendie

provoquant une élévation de température de 800°C (1073 K) dans l'air ambiant, cela voudrait dire que l'air se dilaterait jusqu'à environ 4 fois par rapport à son volume initial. De façon générale, on pourrait supposer que dans la plus part des incendies, le volume des gaz chauds devrait au moins tripler par rapport au volume de l'air frais au départ.

Cette augmentation importante de volume des gaz chauds provoque ainsi l'expulsion des autres gaz présents au début de l'incendie et elle continue aussi longtemps que la température augmente. Le phénomène de dilatation thermique explique en partie la rapidité de propagation de la fumée, de même que l'abaissement de la couche de fumée dans un milieu fermé [4].

7.4 La différence de pressions entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment

La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment crée une différence de pression puisque, toujours selon la loi des gaz parfaits, une augmentation de température engendre directement une augmentation de pression. Lorsqu'il fait plus chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur, comme par exemple en hiver, la pression devient alors plus positive dans le haut d'un bâtiment. Un appel d'air est alors créé dans la partie inférieure et l'air est aspiré vers l'intérieur (figure 1.6).

Dans une pièce ou un bâtiment, le plan de pression neutre (PPN) ou "zone neutre" correspond à la hauteur à laquelle la pression est la même en dehors qu'en dedans, lorsqu'il n'y a pas de vent. Au-dessous du PPN d'un édifice, l'écart de pression fait pénétrer l'air à l'intérieur et la pression devient négative. Au-dessus du PPN, l'air est expulsé à l'extérieur et la pression devient donc positive. Lors d'un incendie la chaleur intense et la pression engendrée font déplacer le PPN vers le bas et il se propage ensuite vers le haut ou vers le bas en fonction des baisses ou des hausses de chaleur.

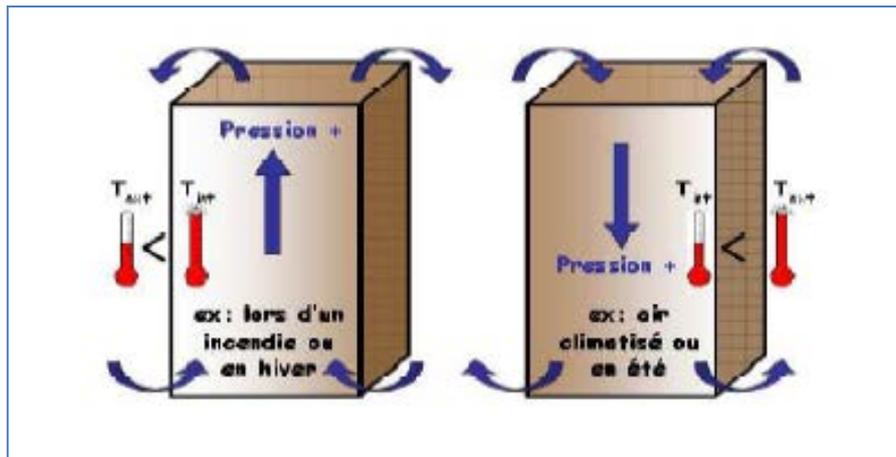


Fig. 1.6 : Mouvement de l'air en fonction de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment

Les variations de hauteur du PPN peuvent servir d'indication visuelle des phases d'incendie. Par exemple, un PPN très bas dans une pièce peut indiquer qu'un incendie est dans une phase très avancée et qu'il risque d'engendrer une explosion de fumée. Un PPN très haut peut au contraire indiquer le début d'un incendie. La vitesse de déplacement du PPN peut également donner des indices sur les variations d'intensité de l'incendie.

7.5 Les différences de pression en fonction de la hauteur d'un bâtiment

Lorsqu'un incendie prend naissance aux niveaux inférieurs d'un bâtiment de grande hauteur (BGH), la fumée a tendance à se propager rapidement vers les niveaux supérieurs par les ouvertures verticales telles que les cages d'escaliers et les puits de lumière. Ce mouvement général de la fumée vers le haut est d'autant plus rapide que l'édifice est élevé, car un autre phénomène se superpose à celui de l'ascendance normale des fluides : l'effet de cheminée, appelé aussi effet de tirage.

En effet, un appel d'air est créé du bas vers le haut en raison d'une décroissance de la pression en fonction de la hauteur, elle-même causée par une diminution du poids total de l'air par unité de surface. On compare cet appel d'air dans les cages ouvertes à celui d'un effet de tirage dans une cheminée, c'est pourquoi il est nommé « effet de cheminée ». Cet effet dépend essentiellement de deux facteurs : la hauteur du bâtiment, de même que la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Dans le cas d'un incendie dans un BGH en hiver, la différence de température entre la fumée et l'air extérieur étant plus grande, l'appel d'air devient donc plus important. Durant l'été, on peut observer le phénomène inverse lorsqu'il fait très chaud ; la fumée a tendance à s'écouler vers le bas au début de l'incendie [4].

7.6 La densité et la composition de la fumée

Lorsqu'un combustible organique (contenant du carbone) est suffisamment chauffé, comme par exemple du bois, il se déshydrate et se décompose à sa surface en milliers de fragments minuscules par un phénomène appelé pyrolyse. Ces fragments légers composés d'acétylène, de méthane, de benzène, de radicaux H , OH , etc., s'élèvent sous l'action de la poussée d'Archimède et s'écoulent dans l'air. Les produits qui n'ont pas réussi à brûler complètement et les produits de combustion s'échappent alors dans l'air ambiant en produisant un aérosol appelé fumée. Lorsque ces fragments gazeux s'éloignent de leur zone de combustion, ils ont tendance à se regrouper et à grossir au fur et à mesure que la température diminue. En s'agglomérant à la sorte, les fragments forment des particules solides carbonées de composition divers appelées suies, les constituants majeurs de la fumée.

Les suies jouent un rôle non négligeable dans la propagation de la fumée, puisque leur taille influence la densité de la fumée. Plus une fumée contient de suie, plus elle est lourde et elle aura tendance à s'écouler vers le sol. Voici quelques caractéristiques physico-chimiques des suies :

- Particules combustibles (oxydables) plus ou moins sphériques.
- Leurs dimensions varient ; lorsque la température diminue, elles se regroupent jusqu'à l'obtention d'un diamètre d'environ 20 nm par un processus d'agglomération.
- Leur composition chimique varie : elles sont formées principalement de carbone (d'où leur couleur noire) et d'hydrogène.
- Peuvent se lier par absorption grâce à des liaisons chimiques ou physiques et transporter d'autres molécules présentes dans l'air, comme les gaz toxiques.
- Deviennent lumineuses lorsqu'elles sont suffisamment chauffées.
- Leur production croît avec la richesse du mélange combustible : les combustibles riches en carbone et faible en oxygène (ex : diesel) produisent plus de suie que ceux qui sont plus pauvres en carbone ou riches en oxygène (ex : méthanol CH_3OH).
- Plus les particules sont petites, plus elles risquent d'être toxiques pour les personnes.

En résumé, il y a plusieurs facteurs qui influencent le mouvement des fumées lors d'un incendie et certains mécanismes sont encore mal élucidés. Prévoir les déplacements de la fumée demeure donc un art pour un intervenant en incendie. Pour devenir maître de cet art, il est donc nécessaire de maîtriser plusieurs concepts de physique et de chimie, additionnés à une bonne compréhension des bases de la combustion et de l'environnement de l'incendie.

8. Influence de la charge combustible et de la ventilation sur les incendies

Le développement d'un incendie est lié à deux paramètres principaux : l'importance de la charge combustible contenue dans le local en feu et la surface des ouvertures du local sur l'extérieur. L'augmentation des surfaces d'ouverture permet une meilleure ventilation et se traduit donc par des pics de température moins élevés et par une phase de décroissance plus rapide. Si l'alimentation en air est suffisante, ce qui entraîne un feu contrôlé par le combustible, ce sont l'importance et la disposition de la charge qui exercent une influence décisive sur la sévérité du feu.

Pour cela les incendies en espace intérieur ont pour principale particularité le manque relatif d'apport en comburant (le plus souvent l'oxygène présent dans l'air), avec pour conséquence des comportements difficiles à prévoir. Suivant les cas, le feu peut s'éteindre de lui-même ou alors il peut survenir un embrasement total d'une pièce quasi-instantanément 'flash over' lors d'une arrivée d'air frais.

D'autres phénomènes plus complexes surviennent dans des conditions particulières comme les flammes fantômes 'ghost flames' dont le processus physico-chimique est encore très mal connu, qui peuvent se produire dans des conditions de confinement particulier. Plusieurs expérimentations ont été réalisées dans le but de mieux appréhender ce phénomène [5].

Un foyer brûle d'un côté d'une pièce vide ne comportant qu'une petite ouverture en haut du mur opposé afin de réunir des conditions de sous-ventilation. L'air chaud peut ainsi s'échapper mais l'air frais ne peut entrer, la combustion est alors complètement confinée. Dans cette situation, la flamme s'étouffe rapidement par le manque d'apport en oxygène puis se détache de son foyer pour parcourir lentement la pièce et s'approcher de l'ouverture. Le phénomène a une probabilité de se produire proportionnelle à l'augmentation du flux thermique. Mais, lorsqu'il apparaît, il est très difficile de prévoir si la flamme va s'éteindre d'elle-même ou réussir à sortir de l'ouverture, dans quel cas elle se trouvera renforcée et pourra alors propager facilement le feu à l'extérieur.

9 Les incendies en milieux confinés et semi-confinés

9.1 Feu en milieu clos ou semi-ouvert

Les premières simulations de feu en intérieur se sont contentées de décrire l'évolution d'un feu dans une seule pièce, de par leurs simplicités. Pourtant, il existe énormément de

phénomènes à prendre en considération. Par exemple, le feu se propage plus rapidement sur les surfaces verticales en milieu intérieur et la présence d'un plafond accélère le processus.

Une description générale de l'évolution d'un feu dans une pièce où la porte est ouverte a été proposée [6] par une décomposition en quatre étapes (figure 1.7) : la prise de feu avec l'élévation du panache vers le plafond, l'enfumage de la partie haute de la pièce, jusqu'à l'arrivée des conditions nécessaires pour parvenir à l'embrasement total 'flash over' et une augmentation rapide de la chaleur et des fumées.

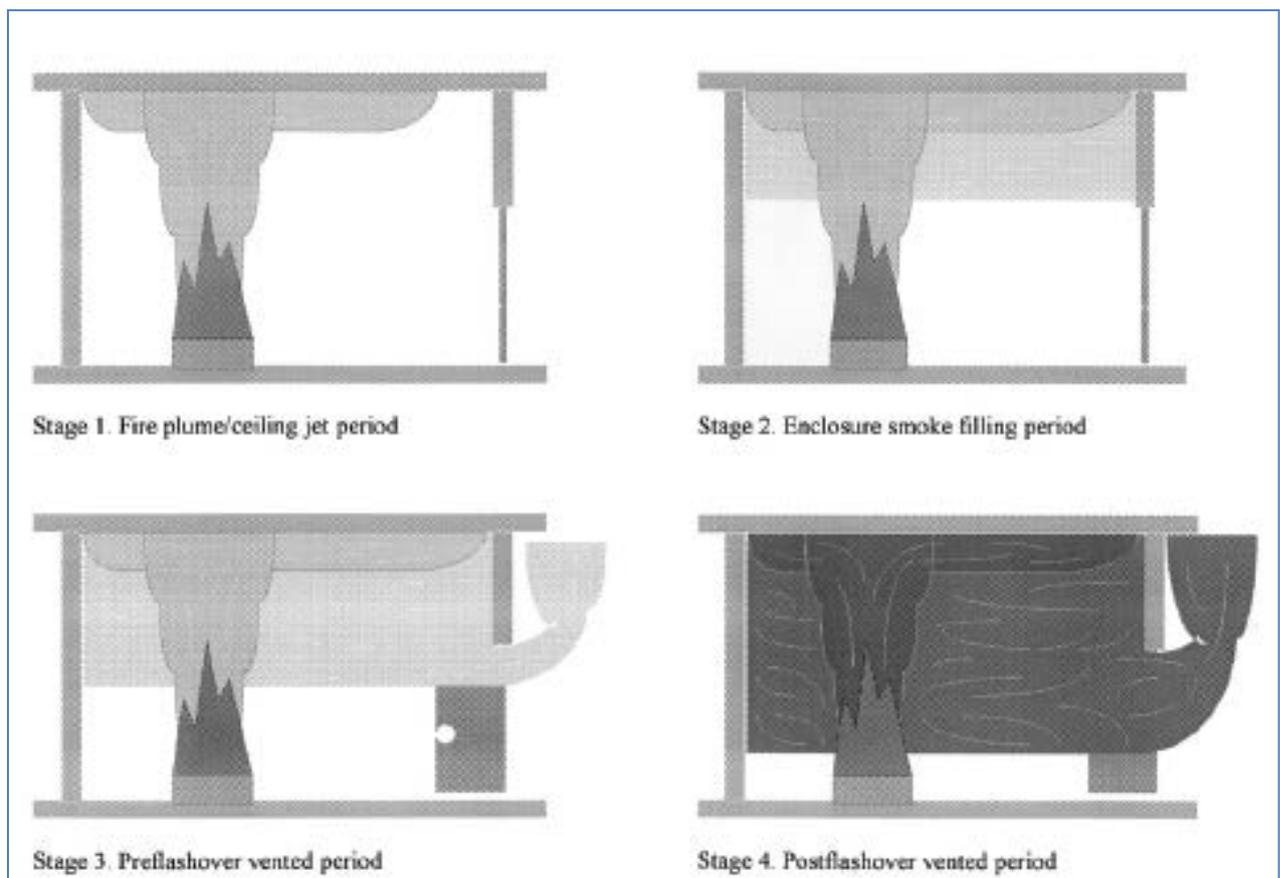


Fig. 1.7 : Les quatre étapes d'un incendie en intérieur

9.2 Les feux en installations industrielles

Les incendies en installations industrielles (électriques ou nucléaires) se caractérisent par leur dimensionnement en comparaison aux feux en bâtiment. Une conséquence directe est l'apport plus élevé en comburant (oxygène) en plus du confinement alors que les fumées disposent de plus d'espace pour se disperser. La diversité et la sévérité des produits présents rendent délicate une généralisation de la propagation de ces feux. C'est une des raisons pour

lesquelles les informations sur les incendies dans ces installations sont rares et difficilement exploitables.

10. Le désenfumage des installations industrielles

10.1 Principes de désenfumage

Le désenfumage peut se réaliser naturellement ou mécaniquement suivant l'une des méthodes suivantes:

- soit par balayage de l'espace que l'on veut rendre praticable par apport d'air neuf et évacuation des fumées.
- soit par différence des pressions entre le volume que l'on veut protéger et le volume sinistré mis en dépression relative.
- soit par combinaison des deux méthodes.

Le désenfumage par tirage naturel est réalisé par des amenées d'air et des évacuations de fumées communiquant, soit directement soit au moyen de conduits, avec l'extérieur et disposées de manière à assurer un balayage satisfaisant du local.

Le désenfumage par tirage mécanique est assuré par des extractions mécaniques des fumées et des amenées d'air naturelles ou mécaniques disposées de manière à assurer un balayage du volume à désenfumer. Ce balayage peut être complété par une mise en surpression relative des espaces à protéger des fumées.

Les extractions et amenées d'air mécaniques sont réalisées au moyen de bouches reliées par des conduits à des ventilateurs et suivant les principes définis dans la réglementation de la sécurité des locaux industriels.

Un système de ventilation permanent (renouvellement d'air, chauffage ou conditionnement d'air) peut être utilisé pour le désenfumage, dans la mesure où il répond aux principes présentés [2].

10.2 Rôles de la ventilation

La ventilation a pour objectif, en situation normale d'exploitation, de maintenir la qualité de l'air à un niveau requis. En cas d'incendie, elle a pour rôle de mettre les personnages à l'abri des fumées pour qu'ils puissent évacuer le local et, dans un second temps, de permettre l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie. La ventilation d'une structure constitue un système complexe, car il est dépend du comportement aérodynamique de l'ouvrage. Un local est un tout, et tous ses éléments peuvent avoir une incidence sur les

choix en matière de ventilation. En particulier, la longueur, le type d'activité, la façon dont est assurée l'exploitation ont une influence déterminante.

10.3 Les type de ventilations

Certains locaux ne nécessitent pas de ventilation mécanique on parle alors de ventilation naturelle. Quand une ventilation mécanique est nécessaire, plusieurs choix sont possibles.

- *Le système longitudinal* : pour lequel des ventilateurs généralement appelés accélérateurs ou ventilateurs de jet poussent la masse d'air, sans apport d'air frais ni sortie d'air vicié autrement que par les sorties existantes (figure 1.8). En général il est bien adapté aux structures unidirectionnelles sans congestion récurrente.

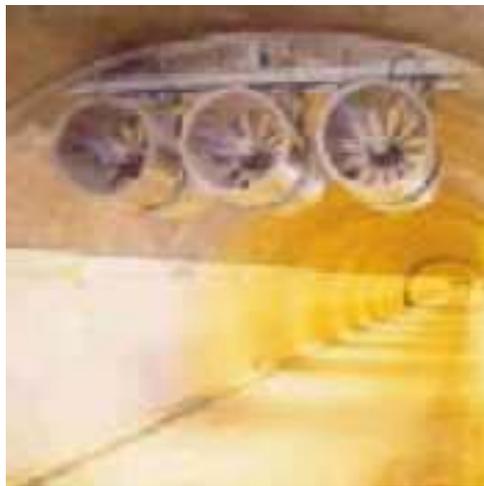


Fig.1.8 : ventilation longitudinal avec accélérateurs

- *le système transversal* : pour lequel on injecte et/ou extrait de l'air à intervalles réguliers au moyen de gaines de ventilation ; selon les cas, on parlera de système transversal pur où le débit extrait est égal au débit insufflé, de système semi-transversal dans ce cas, il n'y a pas d'extraction d'air vicié, ou de système transversal partiel avec lequel le débit d'extraction est plus faible que le débit d'insufflation (figure 1.9). La ventilation transversale est utilisée en général pour les structures bidirectionnelles ou unidirectionnelles avec congestion récurrente.



Fig.1.9 : ventilation transversal

En cas d'incendie, le but de la ventilation est dans un premier temps de protéger les usagers des fumées pour qu'ils puissent évacuer le milieu, et dans un second temps de permettre aux services de secours et de lutte contre l'incendie d'intervenir. Pour ce faire, la stratégie est :

- de pousser les fumées vers une zone où il n'y a pas de personnes,
- ou de maintenir la stratification des fumées et d'extraire celles-ci en plafond ; il est nécessaire dans ce cas que la vitesse longitudinale de l'air soit faible (on parle de contrôle du courant d'air).

Le système longitudinal se prête bien à la première stratégie. Dans un certain nombre de cas, si une stratégie de désenfumage longitudinale est adoptée, il est nécessaire de prévoir des extractions massives de fumée. Par ailleurs, par le jeu des insufflations et extractions d'air, on peut piloter un local ventilé transversalement de manière à appliquer la stratégie longitudinale.

La seconde stratégie nécessite un système transversal. Pour assurer le contrôle du courant d'air dans la seconde stratégie, on joue en général sur les débits d'insufflation et d'extraction des différents cantons. Dans certains cas, il peut être nécessaire de mettre en place des ventilateurs spécifiques pour assurer le contrôle du courant d'air.

Dans certains cas où le local est équipé de ventilation longitudinale et donc n'a pas de gaine d'extraction d'air vicié mais où il y a un risque que la stratégie consistant à pousser les fumées dans une direction mette en danger des usagers (cas des tunnels bidirectionnels ou unidirectionnels congestionnés), on s'efforce dans un premier temps de limiter le courant d'air longitudinal afin de favoriser la stratification des fumées et de permettre aux personnes d'être d'évacué, puis en second temps, permettre l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie (figure 1.10).

On applique la stratégie qui consiste à pousser les fumées dans une direction, donc on à :

- système longitudinal : système de ventilation dans lequel on pousse l'air longitudinalement dans le tunnel (figure (1.10.a)).
- système transversal : système de ventilation comportant à la fois un réseau d'insufflation d'air frais et un réseau d'extraction d'air vicié ou des fumées d'incendie, que ce réseau soit utilisé en exploitation normale ou pas (figure (1.10.b)).
- système semi-transversal réversible : système semi-transversal dans lequel le réseau de soufflage peut, en tout ou partie, être transformé en réseau d'extraction pour le désenfumage par inversion du sens d'écoulement de l'air dans les conduits de ventilation (figure (1.10.b1)).
- système semi-transversal : système de ventilation comportant un réseau de soufflage permettant de distribuer de l'air frais sur toute la longueur de l'ouvrage ; ce système est en principe exclu car il n'offre aucune possibilité d'extraction (figure (1.10.b2)).

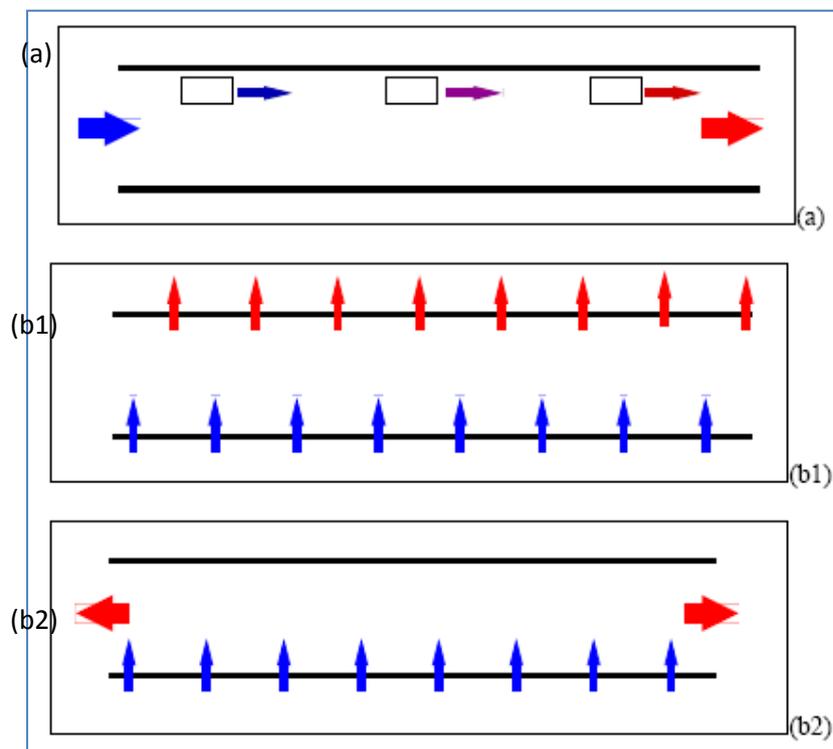


Fig. 1.10 : Schéma des différents systèmes de ventilation en situation normale d'exploitation

Les flèches représentent le mouvement de l'air (air frais en bleu, air vicié en rouge)

(a) : système longitudinal ; (b) système transversal : (b1) transversal pur ou partiel ;

(b2) : semi-transversal

CHAPITRE 2

Revue Bibliographique

1. Introduction

La puissance dégagée par les combustibles peut être obtenue, pour la plupart d'entre eux, de façon relativement immédiate dans des conditions bien ventilées à l'aide d'essais dans des calorimètres à petite, moyenne ou grande échelle. Par ailleurs, dans la plupart des logiciels de calcul traitant des feux dans un compartiment, l'introduction dans le jeu de données de la puissance du feu mesurée expérimentalement permet d'obtenir un accord acceptable entre calcul et expérience pour les principaux paramètres caractérisant les conséquences d'un incendie, comme la température des gaz.

Cependant, dans les cas réels d'incendie dans une installation, la connaissance de la puissance du foyer concerné en atmosphère libre n'est pas suffisante pour prédire son évolution au cours du temps en milieu confiné, du fait de l'interaction forte qui existe entre la combustion et la ventilation du local dans lequel le feu se développe. En effet, le confinement modifie de façon significative certains paramètres physico-chimiques clés qui environnent le foyer, comme le taux d'oxygène ou la température des murs et celle des gaz et, d'une façon plus générale, le flux de chaleur à la surface du combustible. En retour, ces paramètres affectent à la fois la vitesse de pyrolyse du combustible et la chaleur de combustion, à partir desquelles on détermine la puissance du feu. Cette rétroaction présente encore des difficultés de modélisation.

Le confinement du feu joue aussi un rôle sur sa durée, qui est un des paramètres importants d'un incendie puisque les équipements contribuant à la sûreté, comme les portes coupe-feu, ne sont conçus que pour résister un temps limité à une agression thermique.

Le retour d'expérience sur les situations accidentelles en tunnels montre que les conditions de dispersion de fumées d'incendie ou de substances toxiques et en particulier les phénomènes de stratification sont d'une importance capitale pour la sécurité.

La maîtrise de l'ambiance thermique à proximité d'un incendie revêt un caractère particulièrement important dans les tunnels puisqu'il s'agit de produire localement des conditions favorables à l'évacuation des personnes et à l'action des secours. Ceci est également vrai pour d'autres domaines industriels confinés tels que les centrales souterraines, les entrepôts, les parkings.

2. Propagation des fumées dans des milieux confinés

Hu, et al (2003) [7], ont étudié la température maximal des fumées au dessous du plafond dans un tunnel en feu. Expérimentalement et numériquement, des tests complets avec et sans la ventilation longitudinal sont faits .Permettant de faire une comparaison entre les résultats relevés de l'expérience et celles calculés avec les équations empiriques.

Kurioka et al (2003) [8], ont présenté une équation empirique pour prédire la température max comme suit:

$$\frac{\Delta T_{max}}{T_a} = \gamma \left(\frac{Q'^{2/3}}{Fr^1} \right)^\varepsilon \quad (2.1)$$

Ou Q' est le taux de chaleur relâché par le feu donné par :

$$Q' = Q / (\rho_a C_p T_a g^{1/2} H_d^{5/2}) \quad (2.2)$$

Fr le nombre de Froude

$$Fr = u^2 / (g H_d) \quad (2.3)$$

Gamma et epsilon dépendent:

$$Q'^{2/3} / Fr^{1/3} < 1.35, \gamma = 1.77, \varepsilon = 6/5 \quad (2.4)$$

$$1.35 \leq Q'^{2/3} / Fr^{1/3}, \gamma = 2.54, \varepsilon = 0 \quad (2.5)$$

Le taux de chaleur libérée des cuves en feu dans le modèle réel est calculé du taux de masse libérée du combustible, comparé au taux de chaleur libérée calculé par la méthode de l'oxygène consommée, l'efficacité de combustion de ses cuves est déduite, elle est de 0.7. Il est précisé que la géométrie et la ventilation longitudinale affectent le taux de chaleur relâchée.

Comme conclusion, la température max prédite par FDS comparer avec celle obtenu de l'équation empirique de kurioka et al s'accorde avec des résultats plus élevés.

Hu et al, (2008) [9] dans leur étude, ont présenté une estimation de la vitesse critique nécessaire pour arrêter les gaz brûlés et la fumée d'un feu qui se produit près des murs dans un tunnel. Un cas complètement différent de celui où le feu est au milieu du tunnel.

Des analyses théoriques et une simulation avec un CFD sont effectuées dans ce domaine, montrant que le rapport de vitesse critique d'un feu près du mur et celui qui ce produit au centre est de 1,26 par analyse théorique et de 1,18 par une simulation CFD. On a besoin d'une valeur de vitesse critique plus élevée pour arrêter la dispersion et le retour de l'air chaud et de la fumée d'un feu qui ce produit au centre du tunnel.

O.Vauquelin (2005) [10]a rapporté que beaucoup de modèles pour prédire la vitesse critique ont été établis. La plupart d'entre eux sont basés sur Froude ou le modèle de Richardson, avec l'hypothèse, qu'un équilibre entre l'énergie de l'air frais entrant et l'air chaud flottant de la source de chaleur dans les conditions critiques.

Ces modèles ont des formes similaires, parmi eux :

P.H Thomas (1958 et 1968) [11] la formule proposer est donnée par :

$$U_c = \left(\frac{g H Q}{\rho_0 T_0 C_p A} \right)^{1/3} \quad (2.6)$$

Avec, g l'accélération, H la hauteur, Q le taux de chaleur libérée, ρ_0 densité de l'aire ambiant, C_p le coefficient de chaleur et A la surface du tunnel.

N.H Danziger et W.D Kennedy (1982) [12] Leur modèle proposé est :

$$U_c = \left(\frac{g H Q}{\rho_0 T_0 C_p A Ri_c} \right)^{1/3} \quad (2.7)$$

Avec Ri_c le nombre critique de Richardson, obtenu des mesures expérimentales ;

Y .Oka et G.T Atkinson (1995) [13], ont développé le modèle :

$$U_c^* = 0.35 \left(\frac{Q^*}{0.124} \right)^{1/3} \quad \text{pour } Q^* < 0.124 \quad (2.8)$$

$$U_c^* = 0.35 \quad \text{pour } Q^* > 0.124 \quad (2.9)$$

Avec U_c^* est la vitesse critique du vent adimensionnel

$$U_c^* = U_c / \sqrt{gH} \quad (2.10)$$

$$\text{et } Q^* = Q / (\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} H^{1/2} A) \quad (2.11)$$

Wu et Bakar (2000) [14], ont proposé le modèle suivant :

$$U_c^* = 0.40 \left(\frac{Q'}{0.2} \right)^{1/3} \text{ Pour } Q' \leq 0.20 \quad (2.12)$$

$$U_c^* = 0.40 \text{ Pour } Q' > 0.20 \quad (2.13)$$

Avec :

$$U_c^* = U_c / \sqrt{gH} \quad (2.14)$$

$$\text{Et } Q^* = Q / (\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} H^{5/2}) \quad (2.15)$$

avec un diamètre hydraulique au lieu de la hauteur H.

J.P Kunsch (1999-2002) [15], basé sur des modèles physiques, son modèle relie la vitesse critique à la température de la flamme (mèche) maximum au dessus de l'ambient.

$$C_1 = \frac{1-0.1(H/W)}{1+0.1(H/W)} [1 + 0.1(H/W) - 0.015(H/W)^2] \cong 1 - 0.1(H/W) \quad (2.16)$$

$$C_2 = \frac{1-0.1\left(\frac{H}{W}\right)}{1+0.1\left(\frac{H}{W}\right)} 0.574 \left(1 - 0.2 \left(\frac{H}{W} \right) \right) \quad (2.17)$$

$$C_3 = 0.613 \quad (2.18)$$

Et la vitesse est donnée par :

$$U_c = C_3 \sqrt{C_1 \Delta T_0^*} \frac{\sqrt{1 + (1 - C_2/C_1) \Delta T_0^* Q''^{2/3}}}{1 + \Delta T_0^* Q''^{2/3}} Q''^{1/3} \quad (2.19)$$

Où, ΔT_0^* est une constante adimensionnel avec la valeur de 6.13, et Q'' donné.

$$Q'' = Q / (\gamma / (\gamma - 1) P \sqrt{gH^{5/2}}) \quad (2.21)$$

O Vauquelin (2005) [16], a établi une comparaison, déduisant que le modèle de Kunsch était le plus proche des valeurs expérimentales mais avec une surestimation de 10%. de même le model de Thomas apparait en bonne accord avec les valeurs expérimentales pour des feux de petites tailles, mais avec une sous estimation de la vitesse critique du vent.

D'autres auteurs Hu et al (2004) et KARLSSON (1999) (cité par Hu et al, (2008) [9]) se sont intéressés plus particulièrement à l'interaction entre la flamme (mèche de feu) et un mur ou bien un angle. L'effet Miroir a été considéré dans ces conditions. Les résultats de leur étude montre qu'une flamme attachée au mur se développe comme une $\frac{1}{2}$ flamme mais avec les propriétés d'une flamme ayant 2 fois le taux de chaleur libérée.

On se basant sur le modèle de Kunsch où $\Delta T_0^* Q''^{2/3}$ est inférieur à 1, ils ont fait une approximation :

$$U_{C,W}/U_{C,C} = (2Q/Q)^{1/3} = 1.26 \quad (2.22)$$

Le modèle physique est effectué pour un tunnel routier avec une longueur de 25 m et une section transversale mesurée pour une largeur de 10 m et une hauteur de 7,2 m figure (2.1):

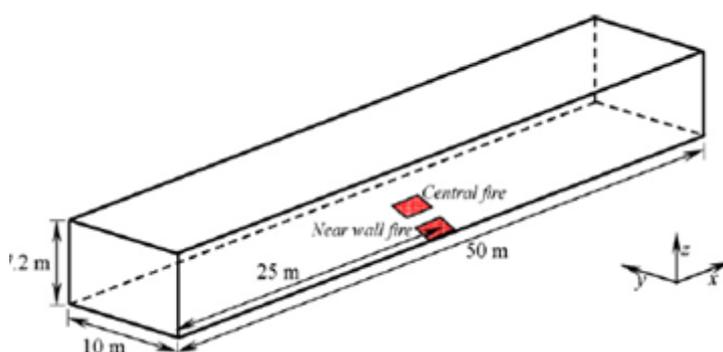


Fig 2.1: le modèle physique du CFD

Les deux extrémités sont ouvertes, et une vitesse uniforme longitudinale est initialisée au début de la simulation, avec des conditions aux limites. La source de chaleur est placée dans deux endroits, au centre et très proche du mur avec des cuves carrées, et un feu variant de 0.5, 8 et 12 MW et un taux de chaleur libérée (HRR) de 1MWm^{-2} .

Ingason et Lonnermark (2005) [17], ont étudié le taux de chaleur libérée (HRR) pour 4 tests, où des camions poids lourds avec remorque sont utilisés. Une ventilation de 2.8 à 3.2 m/s est utilisée, le pic du taux de chaleur libérée (HRR) est variant de 66-202MW, il est obtenu après 7.1 et 18.4 min de l'allumage dans les différents tests. Le HGV est chargé de différentes marchandises pour chaque tests et couvert avec un trampoline en polyester et l'allumage se fait en amont. Le but de ces tests de mesure est d'obtenir des connaissances sur

le développement des feux dans les différents HGV. L'utilisation de la ventilation longitudinale nous permet de mesurer le taux de chaleur libérée (HRR) avec la technique de la consommation d'oxygène ;

Une étude similaire sur l'interaction entre le débit de ventilation et le HRR mené par Carvel et Al (2001) (cité par Ingason et Lonnermark (2005)), montre que :

Le HRR d'un HGV doit augmenter beaucoup plus avec un facteur de 4 pour un débit longitudinal (flow rate) de 3m/s et d'un facteur de 10 pour 10m/s.

Mais d'après Grant et Drysdale, (cité par Ingason et Lonnermark (2005)), la corrélation entre le taux de génération des différents produits de combustion et le HRR, est trop dépendant du combustible utilisé et non de la méthode de l'oxygène consommé.

D'abord pour calculer le débit de masse de l'air on divise le domaine en 5 segments égaux ou chaque segment est relié à un thermocouple et une sonde. Le débit \dot{m} est déterminé par l'équation:

$$\dot{m} = \sum_N \zeta_k \frac{T_0 \rho_0}{T_k} u_k \Delta A_k \quad (2.23)$$

k est un facteur de correction dépendant de la variation de la température et de la vitesse avec :

$$\frac{u}{U_{max}} = \left(\frac{y}{Y_{max}} \right)^{1/n} \quad (2.24)$$

et
$$\varepsilon = \frac{u}{U_{max}} \quad (2.25)$$

La vitesse des gaz était obtenue avec l'aide de la différence de pression mesurée ΔP , alors la vitesse est obtenue par l'équation :

$$u = \frac{1}{k(R_e)} \sqrt{\frac{2\Delta P T}{\rho_0 T_0}} \quad (2.25)$$

$k(R_e)$ est un coefficient de correction donnée par McCaffrey et Heskestad .

Pour déterminer le taux de chaleur libérée pour chaque segment, la corrélation donnée par Newman (cité par Ingason et Lonnermark (2005)) était utilisée :

$$X_{i,h} = X_{i,avg} \frac{\Delta T_h}{\Delta T_{avg}} \quad (2.26)$$

Et pour valider la corrélation précédente, les données de mesure à 2 points sont utilisées pour prédire la valeur du 3^{ème} point, et de bons accords sont obtenus. En combinaison avec les équations précédentes, le taux de chaleur libérée (HRR) peut être calculé de l'équation donnée par :

$$\dot{Q} = \frac{E \dot{m} (M_{O_2} / M_{air}) (1 - X_{H_2O}^0)}{\frac{\alpha-1}{X_{O_2}^0} + \frac{1 - (X_{O_2} / (1 - X_{CO_2}))}{X_{O_2}^0 - (X_{O_2} (1 - X_{CO_2}^0) / (1 - X_{CO_2}))}} \quad (2.27)$$

Le taux de chaleur libérée est calculé pour chaque segment et la somme des 5 segments donne le taux de chaleur libérée total.

Les facteurs qui ont influencé ces résultats sont en premier lieu, les incertitudes de la méthode, et les pulsations et leur influence. Ajoutant aussi les valeurs théoriques utilisées qui sont extraites de la littérature et l'incertitude dans la détermination de la masse totale du combustible.

La méthode pour estimer le taux de chaleur libérée comprend beaucoup d'incertitude, 6.7% du au débit du volume mesuré, 2.1% les mesures de O₂ et 2% pour le facteur E, et d'autre facteur sont plus bas que 1%.

J.P Kunsch (2002) [15], a présenté un modèle pour décrire le comportement des gaz propageant d'un feu, dans la direction opposé de l'air frais produit par ventilation, qui est nécessaire pour se prévenir du retour du back luyering , en déduisant que la vitesse critique de ventilation dépend du taux de chaleur libérée et de la hauteur du tunnel ,déjà proposé par d'autre théorie. Le modèle est validé par une comparaison avec des données expérimentales obtenues des tests de feu.

Le Modèle physique est un objet brulant, schématisé comme un point source (F), la propagation des gaz se fait dans différentes zones figure (2.2).

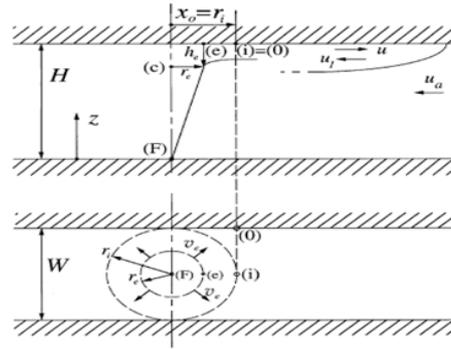


Fig.2.2: schéma d'un tunnel en feu

La température maximale de la flamme (au point C avant la déclinaison) est donnée par la relation semi-empirique adimensionnelle de Heskestad et Delichtasios (cité J.P Kunsch (2002) [15]) :

$$\frac{\Delta T_{Max}}{T_a} = \frac{T_{Max} - T_a}{T_a} = \Delta T_0^* Q_0^{*2/3} \quad (2.28)$$

Avec

$$Q_0^* = \frac{q}{\gamma / (\gamma - 1) p \sqrt{g} H^{5/2}} \quad (2.29)$$

Le taux de ventilation critique est la vitesse de ventilation minimale, nécessaire pour arrêter complètement les gaz résultants du feu donc pour stopper le 'back layering'.

On a:

$$u_a^2 = C_3^2 \left(C_1 - C_2 \frac{\Delta \rho_{Max}}{\rho_a} \right) \frac{\Delta \rho_{Max}}{\rho_a} gH \quad (2.25)$$

Avec : C₁, C₂ et C₃ sont donnés par les équations (2.16), (2.17) et (2.18)

$$C_1 = \frac{1 - 0.10 (H/W)}{1 + 0.10 (H/W)} [1 + 0.10 (H/W) - 0.015 (H/W)^2] \cong 1 - 0.10 (H/W) \quad (2.16)$$

$$C_2 = \frac{1 - 0.10 (H/W)}{1 + 0.10 (H/W)} 0.574 (1 - 0.20 (H/W)) \quad (2.17)$$

$$C_3 = 0.613 \quad (2.18)$$

Quand la loi des gaz réels est appliquée, la diminution de la densité peut être relié à l'augmentation de la température par :

$$\frac{\Delta\rho_{Max}}{\rho_a} = \frac{x}{1+x} \quad (2.26)$$

Avec

$$x = \frac{\Delta T_{Max}}{T_a} \quad (2.27)$$

L'équation (2.25) précédente devient :

$$u_a^2 = C_3^2 C_1 \frac{1+(1-C_2/C_1)x}{(1+x)^2} x g H \quad (2.28)$$

Et quand la température maximale de la plume augmente, elle est exprimée en fonction du taux de chaleur libérée alors :

$$U_a^* = C_3 \sqrt{C_1 \Delta T_0^*} \frac{\sqrt{1+(1-C_2/C_1)\Delta T_0^* Q_0^{*2/3}}}{1+\Delta T_0^* Q_0^{*2/3}} Q_0^{*1/3} \quad (2.29)$$

u_a^* vitesse adimensionnel est donnée par :

$$u_a^* = u_a / \sqrt{gH} \quad (2.28)$$

En choisissant $(H/W) = 1$, elle devient :

$$u_a^* = 1.44 \frac{\sqrt{1+3.57 Q_0^{*2/3}}}{1+6.13 Q_0^{*2/3}} Q_0^{*1/3} \quad (2.30)$$

En cas où $(H/W) = 0.5$ alors les coefficients 1.44 et 3.57 sont remplacés par 1.48 et 3.11.

Grant et Jagger (1998) (cité J.P Kunsch (2002) [11]) ont défini un facteur de flottabilité B :

$$B = (QgH/c_p T_a \rho_a A)^{1/3} \quad (2.31)$$

D'où l'augmentation de la température peut être exprimée par :

$$\frac{\Delta T_{Max}}{T_a} = \Delta T_0^* Q_0^{*2/3} = \frac{C_4}{gH} B^2 \quad (2.32)$$

Avec :

$$C_4 = \Delta T_0^* \left(\frac{W}{H}\right)^{2/3} \quad (2.33)$$

A, est la superficie de la section transversal, ou $A = H W$ (d'un rectangulaire), alors :

$$u_a = C_3 \sqrt{C_1 C_4} \frac{\sqrt{1 + (1 - C_2 / C_1) C_4 B^2 / gH}}{1 + C_4 B^2 / gH} \quad (2.34)$$

Il y a des rapprochements dans le cas d'un petit taux de chaleur libérée, alors :

$$u_a \cong C_3 \sqrt{C_1 C_4} B \quad (2.35)$$

Et quand le taux de chaleur libérée est grand, la vitesse critique devient indépendante du facteur de flottabilité B :

$$u_a \cong C_3 \sqrt{C_1 - C_2} \sqrt{gH} \quad (2.36)$$

3. Comparaison faites avec d'autres théories et données expérimental :

J.P Kunsch (2002) [15], définit une marge critique du nombre de Richardson après lequel aucun retour de feu n'est produit. Elle est trouvée expérimentalement .sa valeur la plus basse de ce rang correspond a une valeur estimé de la vitesse critique, elle est de 4,5:

$$Ri_c = \frac{gH(\rho_a - \rho) / \rho_a}{u_a^2} = 4.5 \quad (2.37)$$

Ou le nombre de Richardson est relié à Froude par la relation :

$$Fr_c = 1 / \sqrt{Ri_c} \quad (2.38)$$

Une chaleur globale pour le débit d'air qui ne revient pas, donne l'augmentation de la température. Quand le taux de chaleur relâchée est donné :

$$T = T_a + \frac{Q}{\rho_a c_p u_a A} \quad (2.39)$$

Quand la densité est reliée à la température par la loi des gaz parfait, $\rho / \rho_a = T_a / T$. L'équation est donnée par :

$$u_a = \frac{1}{Ri_c^{1/3}} \frac{B}{(1 + B^3 / (u_a g H))^{1/3}} \quad (2.40)$$

Avec le facteur B cette équation devient :

$$u_a^* = \frac{1}{Ri_C^{1/3}} \frac{Q_0^{*1/3} (H/W)^{1/3}}{(1 + (H/W) Q_0^*/u_a^*)^{1/3}} \quad (2.41)$$

Cette équation doit être résolue itérativement pour obtenir la vitesse critique u_a^* parce qu'elle est présentée des deux cotés de l'équation.

Roh et al (2007) [18], ont présenté une étude détaillée pour l'estimation de la vitesse critique de ventilation pour des taux de combustion différents avec la ventilation longitudinale, bien que le taux de combustion du carburant soit influencé par les conditions de ventilation, donc on a besoin d'une étude (back layering) entre le taux de chaleur libérée avec une ventilation naturelle, et celui avec une ventilation longitudinale variante.

Cette expérience est d'une échelle réduite de 1/20, utilisant la méthode Froude, est dirigée pour examiner la différence entre le taux de chaleur libérée (HRR) avec une ventilation naturelle et une vitesse longitudinal. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenus numériquement et avec des résultats de simulation avec FDS.

La vitesse critique est définie comme étant la vitesse de ventilation longitudinale minimale, requise pour éviter le retour en amont du débit de fumées (back layering qui est la fumée qui circule dans la direction opposée du système de ventilation). Donc il est très important de prédire la valeur de la vitesse de ventilation critique, pour toute taille de feu représentée par son taux de chaleur libérée (HRR) dans un système de vitesse longitudinale.

La méthode pour prédire la valeur de la vitesse de ventilation critique était basée sur la relation empirique obtenue du nombre de Froude.

Le nombre de Froude est défini :

$$Fr = \frac{v^2}{gD} = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{force de gravité}} \quad (2.42)$$

D'autres études théoriques ont proposés plusieurs corrélations

Thomas 1968, (Roh et al (2007) [13]), a utilisé une théorie basée sur le nombre de Froude, et a suggéré que le nombre de Richardson sont très près de l'unité dans les conditions critique, le nombre de Richardson est :

$$Ri = \frac{gD}{v^2} \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{Fr} \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2.43)$$

La vitesse de ventilation critique est :

$$V_c = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g H} \quad (2.44)$$

Il a aussi exprimé la vitesse critique en fonction de taux de chaleur libérée (HRR) :

$$V_c \approx \left(\frac{gHQ}{\rho_0 c_p T_0 A} \right)^{1/3} \quad (2.45)$$

Heselden (1976) (Roh et al (2007) [13]), développe une autre formule basée sur la théorie pour calculer la vitesse de ventilation critique :

$$V_c = CK \left(\frac{gQT}{\rho_0 c_p T_0^2 B} \right)^{1/3} \quad (2.46)$$

C et K sont des constantes obtenues des expériences dans un tunnel de chemin de fer. Ces résultats ont été les plus largement utilisés pour prédire la vitesse de ventilation critique

Oka et Atkinson (1995) [14], ont effectué des mesures avec une combustion de carburant pour une large gamme de taux de chaleur libérée adimensionnel (HRR), mais leur formule ne peut pas être utilisée pour des tunnels avec des sections différentes.

Wu and Baker (2000) (Roh et al (2007) [13]), après leurs séries d'expériences tests dans 5 modèles de tunnel, avec la même hauteur mais avec différentes sections, ont étudié l'effet de la géométrie sur la vitesse critique. Ils proposent d'utiliser la hauteur hydraulique du tunnel. Il était possible de dériver une corrélation universelle pour prédire la vitesse de ventilation critique pour les différentes sections:

$$\text{Pour : } Q'' < 0.2, V'' = 0.4(0.2)^{-1/3}(Q'')^{1/3} \quad (2.47)$$

$$\text{pour : } Q'' > 0.2, V'' = 0.4 \quad (2.48)$$

Avec :

$$Q'' = \frac{Q}{\rho_0 T_0 C_p g^{1/2} H^{5/2}} \quad (2.49)$$

$$\text{et } V'' = \frac{V}{\sqrt{g H}} \quad (2.50)$$

Maccaffery et Quintiere (1977) (Roh et al (2007) [13], ont trouvé que la nature générale du débit de flottabilité ne dépend pas de l'échelle. Ce concept de la similarité dans la physique des maquettes est important, pour faire le rapport entre un modèle et l'échelle réelle.

Le nombre de Froude doit être préservé d'après Quintiere

$$Fr = \frac{V_M^2}{g L_M} = \frac{V_F^2}{g L_F} \quad (2.51)$$

Où M est pour le modèle et F pour l'échelle réelle, alors pour la vitesse et le taux de chaleur relâché :

$$V_M = V_F \sqrt{\frac{L_M}{L_F}} \quad (2.52)$$

$$\text{et } Q_M = Q_F \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{5/2} \quad (2.53)$$

Le modèle du tunnel (expérience) : Un modèle de tunnel est utilisé avec un rapport de 1/20 de l'échelle réelle, 200m de long, avec 8 m de hauteur, et avec la même forme que le tunnel réel. Les expériences sont accomplies avec l'Heptane (C7H16). Les cuves utilisées ont ,4.5 ,5.5, 6.5 et 8.5cm et de hauteur de 2cm

Le taux de combustion et le taux de chaleur relâchée obtenu de l'échelle réduite sont calculés par la formule de (Kim2003) :

$$\dot{m}''_{EXP} = \frac{\Delta W_f}{\Delta t \cdot A_f} \quad (2.54)$$

$$\dot{Q}_{EXP} = \dot{m}''_{EXP} \cdot A_f \cdot \Delta H_c \quad (2.55)$$

\dot{Q}_{EXP} et \dot{m}''_{EXP} Varient avec le temps.

Aralt et Nilsen (2009) [19], ont présenté un test dans le Runehamar, dans un tunnel de 1,65 Km de long. Le but est d'examiner la détection de la fumée, et de la chaleur et quel type de détection est la mieux adaptée. Pour cela les tests se font avec une cuve pleine de Heptane qui varie entre 0,16 et 1 m², donnant un taux de chaleur relâchée de 0,2 à 2,4 MW, et un feu de voiture de 3 à 5MW, avec des conditions de vent variant de 1,1 à 1,6ms⁻¹. La taille des feux a été choisie de manière 'impossible à détecter.

CHAPITRE 3

SOURCE DE CHALEUR DE L'INCENDIE

1. Introduction

Le développement d'un incendie dans un local résulte du couplage de plusieurs phénomènes, la dégradation et la combustion d'une source combustible, les transferts par convection et rayonnement et la production des fumées. Le dégagement de chaleur est le moteur de tous ces processus. Sa modélisation n'est pas actuellement satisfaisante. Si pour réaliser la modélisation complète du développement de l'incendie dans un local, la source est prescrite (puissance et évolution en temps), les résultats, c'est à dire les températures et la quantité de fumée produite, peuvent être déterminées. Si cette modélisation passe par un calcul de la dégradation et de la pyrolyse de la source, cela donne très souvent un emballement de la pyrolyse, ce qui se traduit par des évolutions de feux non réalistes, comme par exemple des extinctions précoces. D'autre part, la propagation de la flamme sur le matériau est très souvent mal déterminée. Il y a deux explications. D'une part, on ne connaît pas bien les lois de dégradations thermiques et les flux de pyrolyses des matériaux. D'autre part, la puissance des machines de calcul est telle qu'on ne peut pas utiliser un maillage aussi fin que possible pour prédire correctement les processus près de la source.

Le terme feu de compartiment est utilisé pour définir un feu qui est confiné dans une chambre, ou un endroit fermé dans un immeuble. Quand un élément brûle dans un milieu confiné, deux gros facteurs influencent, l'énergie libérée et le taux de combustion. Premièrement, les gaz chauds s'accumulent au niveau du plafond, chauffent le plafond et les murs. Ces surfaces et la couche du gaz chaud transmettent de la chaleur vers la surface de carburant, ce qui fait augmenter le taux de combustion. Deuxièmement, si les ouvertures du local sont fermées (portes, fenêtres), elles peuvent restreindre l'oxygène nécessaire pour la combustion. L'insuffisance d'air va causer une diminution de la combustion du combustible conduisant à une diminution du taux de l'énergie libérée et une augmentation de la concentration des gaz imbrulés.

Un feu dans un espace ouvert libère moins d'énergie qu'un feu dans un espace fermé avec ouvertures. Les surfaces chaudes et les gaz transmettent de la chaleur au combustible, ainsi le taux de combustion est augmenté. Si cependant, l'ouverture est très petite, la disponibilité limitée d'oxygène va donner une combustion incomplète, ce qui est traduit par une diminution du taux d'énergie libérée, qui en revanche cause une baisse de la température des gaz et donc moins de chaleur transférée vers le combustible.

Le combustible continuera à produire des gaz volatiles avec un taux plus au moins faible. Seule la partie des gaz qui a brûlé, libère de l'énergie. Les gaz imbrulés seront collectés au niveau du plafond. Ces derniers, en s'écoulant à travers les ouvertures, se mélangeront avec l'air, et peuvent s'enflammer.

En résumé, le transfert de chaleur dans un compartiment peut augmenter la perte de masse du combustible tandis que, dans les compartiments confinés, l'air disponible est près du sol, d'une certaine manière il ne participe pas à la combustion du combustible d'où la diminution de la perte de masse de ce dernier. Le taux avec lequel, l'énergie est libérée dans un feu dépend principalement du type, de la quantité, et de l'orientation du combustible et des effets qu'un confinement peut avoir sur le taux de chaleur libérée [20].

2. Les équations d'un feu de compartiment

2.1 Equation de bilan d'énergie simplifiée

Considérons un feu de compartiment avec une ouverture d'une hauteur H_0 et une surface A_0 . \dot{Q} représente le taux de chaleur libérée dans un compartiment. Le débit massique du flux (air et produits de combustion) qui s'écoule à travers l'ouverture est \dot{m}_g . T_g et T_a sont les températures de la couche supérieure (chaude), et la température ambiante atmosphérique respectivement. Il est supposé que la couche chaude est à une température uniforme. Le bilan d'énergie dans le compartiment en feu est présenté dans la figure (3.1) et s'écrit [20]:

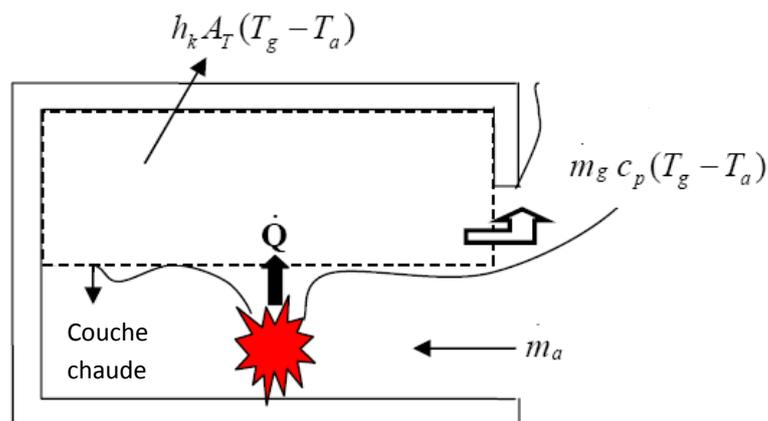


Fig.3.1 : diagramme du bilan d'énergie pour la couche chaude dans un compartiment

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_g - T_a) + h_k A_T (T_g - T_a) \quad (3.1)$$

Où \dot{Q} est le taux d'énergie libérée, \dot{m}_g le débit massique sortant à travers l'ouverture, c_p la chaleur spécifique des gaz, T_g et T_a sont la température de la couche supérieure chaude, et la température ambiante des gaz et h_k est le coefficient de transfert de chaleur (terme de transfert conductif à la surface des particules de suies), A_T est la surface limite du domaine considéré pour le transfert de chaleur. Dans cette situation, l'énergie libérée est supposée connue. Par contre dans les situations où des expériences peuvent être effectuées, le taux de chaleur libérée est soit mesuré ou bien calculée à partir de la perte de masse en fonction du temps du combustible.

Le deuxième terme du membre droit de l'équation (3.1), exprime le taux de chaleur perdu aux limites (frontière du domaine). Le transfert de chaleur par rayonnement et par convection se produit à la limite du domaine dont la surface est constituée par les particules de suies, suivi par une conduction de chaleur dans le solide. Des pertes de chaleur par rayonnement se produisent aussi au niveau des ouvertures. Le mode de transfert dominant dans ce système est la conduction à travers le solide. Le paramètre h_k est donc défini comme étant un coefficient effectif de conduction dans l'expression (3.1).

Le débit massique d'écoulement des gaz chaud à travers les ouvertures doit être connu pour calculer l'énergie perdu à travers les ouvertures. Il est obtenu approximativement par l'équation suivante [21] [ANEXE1] :

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \rho_a \left[2 g \frac{T_a}{T_g} \left(1 - \frac{T_a}{T_g} \right) \right]^{1/2} (H_0 - H_N)^{3/2} \quad (3.2)$$

Où H_0 est la hauteur de l'ouverture, H_N est la hauteur à la couche neutre, W est la largeur de l'ouverture, C_d le coefficient de décharge [21] Puisque H_N dans l'équation (3.2) est inconnue, \dot{m}_g doit être écrit en fonction de variables connues [ANNEXE 2].

Notant que $W.H_N^{3/2}$ peut s'écrire sous la forme $A_0 \sqrt{H_0}$ (terme qui définit le facteur de ventilation). A_0 est la surface de l'ouverture. L'équation suivante peut être obtenue :

$$\dot{m}_g = \rho_a g^{1/2} A_0 \sqrt{H_0} \cdot f(T_g, \dot{Q}, A_0, H_0) \quad (3.3)$$

L'équation (3.1) peut être réarrangée en terme d'augmentation de la température $\Delta T = T_g - T_a$:

$$\frac{\Delta T}{T_a} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p T_a + h_k A_T T_a} = \frac{\dot{Q} / \dot{m}_g c_p T_a}{1 + \frac{h_k A_T}{\dot{m}_g c_p}} \quad (3.4)$$

En substituant les groupements connus de l'équation (3.3) dans l'équation (3.4), $\frac{\Delta T}{T_a}$ peut être exprimé comme une fonction de deux groupes adimensionnels:

$$\frac{\Delta T}{T_a} = f \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_a g^{1/2} c_p T_a A_0 H_0^{1/2}}, \frac{h_k A_T}{\rho_a g^{1/2} c_p A_0 H_0^{1/2}} \right) \quad (3.5)$$

Ces deux groupes adimensionnels peuvent être désignés par X_1 et X_2 , et la relation suivante peut être donnée pour l'augmentation de la température adimensionnelle :

$$\frac{\Delta T}{T_a} = C \cdot X_1^N \cdot X_2^M \quad (3.6)$$

Pour déterminer les valeurs numériques appropriées des coefficients C, N et M, McCaffrey et al [22] ont analysé des données de plus de 100 expériences de feu dans lesquels le taux de combustion établi est atteint, mais la température de la couche supérieure des gaz n'a pas dépassé 600°C. À travers une analyse régressive des données expérimentales, les constantes C, N et M sont trouvées, alors, l'équation (3.5) peut être écrite :

$$\frac{\Delta T}{T_a} = 1.63 \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_a g^{1/2} c_p T_a A_0 H_0^{1/2}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{\rho_a g^{1/2} c_p A_0 H_0^{1/2}} \right)^{-1/3} \quad (3.7)$$

Une équation plus pratique que l'équation (3.7) est obtenue après l'utilisation des valeurs des constantes ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $T_a = 293 \text{ K}$, et $c_p = 1.05 \text{ kJ/kg K}$) :

$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_0 H_0^{1/2} h_k A_T} \right)^{1/3} \quad (3.8)$$

Dans l'équation (3.8), des unités spécifiques doivent être utilisées, \dot{Q} en kW, h_k (kW/m²K), la surface en (m²) et la hauteur de l'ouverture en (m).

Il est très important d'obtenir des valeurs appropriées pour h_k . Elles dépendent de la durée du feu et des caractéristiques thermiques des bordures du compartiment. Le temps pour lequel la conduction peut être considérée comme étant proche de l'état stationnaire est exprimé par un terme appelé temps de pénétration thermique t_p qui est donné par :

$$t_p = \frac{\delta^2}{4 \alpha} \quad (3.9)$$

Il indique le temps nécessaire pour qui est un transfert de chaleur (de 15%) du coté exposé au feu à l'autre coté extérieur du solide. α utilisé dans l'équation précédente représente la diffusivité thermique, donnée par $\alpha = k/\rho c$ en m^2/s et δ l'épaisseur de l'interface en (m).

McCaffery et ses collègues ont analysé la surface des matériaux utilisés dans les expériences et ont défini h_k de la manière suivante :

$$\text{Pour : } t < t_p \quad h_k = \sqrt{\frac{k \rho c}{t}} \quad (3.10)$$

$$\text{Pour : } t \geq t_p \quad h_k = \frac{k}{\delta} \quad (3.11)$$

Pour une enceinte délimitée par des cloisons de différents matériaux, la valeur de h_k doit être déterminée par rapport aux surfaces. Comme exemple, si les murs et les plafonds (M, P) sont faits de matériaux différents de celui du sol (S), la valeur de h_k est calculée :

$$\text{Pour : } t < t_p \quad h_k = \frac{A_{M,P}}{A_T} \sqrt{\frac{(k \rho c)_{M,P}}{t}} + \frac{A_S}{A_T} \sqrt{\frac{(k \rho c)_S}{t}} \quad (3.12)$$

$$\text{Pour : } t \geq t_p \quad h_k = \frac{A_{M,P}}{A_T} \frac{k_{M,P}}{\delta_{M,P}} + \frac{A_S}{A_T} \frac{k_S}{\delta_S} \quad (3.13)$$

Si T_a est prise égale à 295K l'équation (3.7) peut s'écrire :

$$\Delta T = 480 \cdot X_1^{2/3} \cdot X_2^{-1/3} \quad (3.14)$$

L'équation (3.14) est utilisée pour estimer l'intensité du feu nécessaire pour que l'embrasement général se produise 'flashover'. Si une augmentation de température de 500K est prise comme un critère circonspect pour la température de la couche supérieure du gaz au début du 'flashover', alors, en remplaçant X_1 et X_2 dans l'équation (3.14), on trouve après réarrangement :

$$\dot{Q} = \left[g^{1/2} (c_p \rho_a) T_a^2 \left(\frac{\Delta T}{480} \right)^3 \right]^{1/2} (h_k A_T A_0 H_0^{1/2})^{1/2} \quad (3.15)$$

Avec $\Delta T = 500K$ et les valeurs appropriés pour ; g , c_p et ρ_a , etc.....

$$\dot{Q}_{FO} = 610 (h_k A_T A_0 \sqrt{H_0})^{1/2} \quad (3.16)$$

Notant que h_k est en (kW/m²K), A_T et A_0 en (m²), H_0 en (m). \dot{Q}_{FO} en (kW) est le taux de chaleur libérée nécessaire pour produire une couche chaude de 500° au dessous du plafond. La dépendance de la racine carrée indique que si il y'a une augmentation de 100% d'un des paramètres h_k , A_T ou A_0 , alors le feu augmenterait la chaleur libérée seulement de 40% pour atteindre le critère du 'flash-over' comme défini précédemment.

2.2 L'approximation du taux de chaleur au carré du temps du feu

Les études précédentes intéressées par le développement de description de taux de chaleur libérée par feu ont utilisé l'approximation au carré du temps de feu 'T-squared approximation'. Le temps initial de développement d'un feu est toujours croissant. Le taux de combustion varie proportionnellement avec le carré du temps. En utilisant un facteur α appelé facteur de développement de feu, plusieurs vitesses de croissance peuvent être simulées. Par conséquent le taux d'énergie libérée peut s'écrire :

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (3.17)$$

Où α est en (kW/s²) et t , le temps de feu depuis un allumage établi en (s). Cette relation a été validée pour différents matériaux.

L'approche a été utilisée particulièrement dans la conception des systèmes de détection et de guidage pour des valeurs de temps de développement associé à différents matériaux disponibles [20] Les feux considérés à travers cette approche sont classés dans les catégories : ultra rapide, rapide, moyen, et lent selon les valeurs du facteur α . Dans le tableau (3.1) on donne les valeurs de α et le temps nécessaire pour atteindre une puissance de 1055kW [21].

facteur de développement	α (kW/s ²)	Le temps nécessaire pour atteindre 1055kW
ultra rapide	0.19	75
rapide	0.047	150
Moyen	0.012	300
lent	0.003	600

Tableau 3.1 : les valeurs de α pour différents taux d'accroissement

3. Taux de chaleur libérée associé aux différentes étapes et sur la durée du feu

La variation du taux de chaleur libérée en fonction du temps peut être représentée par le diagramme de la figure (3.2) [6] :

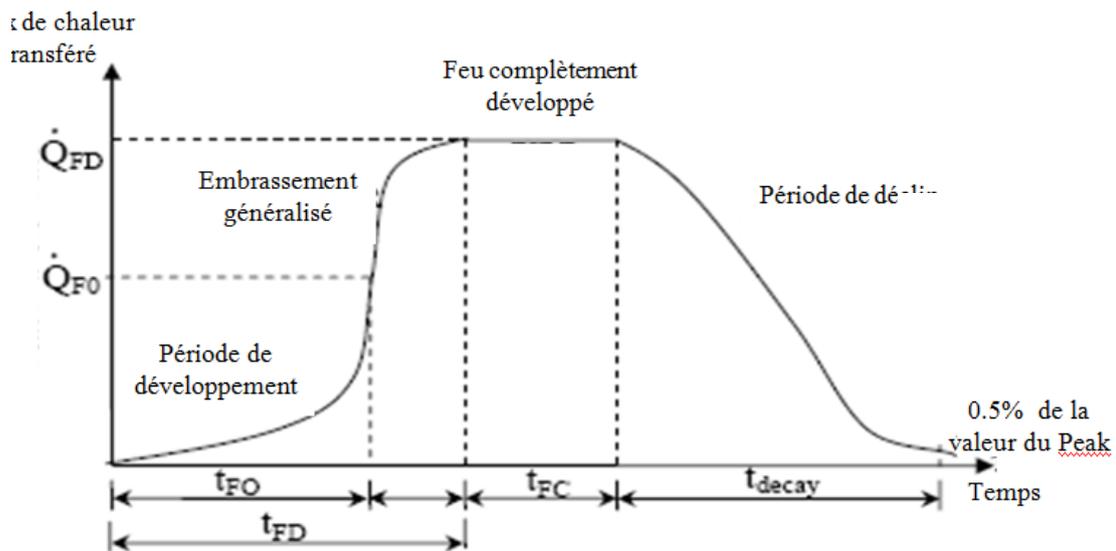


Fig.3.2 : Variation du taux de chaleur libérée avec le temps

Le taux de chaleur libérée à la limite inférieure de la phase 'flash-over', \dot{Q}_{FO} est donné par la relation (3.16) selon l'approche théorique d'un feu de compartiment :

$$\dot{Q}_{FO} = 610 (h_k A_T A_0 \sqrt{H_0})^{1/2}$$

La modélisation de la variation du taux de chaleur libérée dans la phase initiale (phase de croissance) est exprimée par la loi de l'approximation du temps au carré 'T-squared approximation' équation (3.17) :

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (3.17)$$

α dépend du compartiment et de son contenu. Pour le cas considéré dans notre étude ce paramètre, doit être estimé, à partir des matériaux existant dans le local. Le temps au 'flash-over' peut être exprimé [17]:

$$t_{FO} = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{FO}}{\alpha}} \quad (3.18)$$

En général les valeurs du taux de combustion des matériaux combustibles dans les différentes phases d'un feu de compartiment sont les suivantes. Au point où le feu arrive à un développement complet, 20% des produits de combustible sont brûlés. Pendant la phase de développement complet du feu, quand le taux de chaleur libérée est constant, la quantité de combustible diminue de 80% à 30%. Dans cette phase, un état de combustion établi l'emporte, toutes les surfaces du combustible sont impliquées dans le feu. Les 30% restants du combustible sont consommés durant l'état de décroissance du feu (déclin). De ces informations les équations du taux de chaleur libérée et le temps de chacune de ses phases, sont résumées comme suit :

$$t_{FD} = \left[\frac{0.6 E}{\alpha} \right]^{1/3} \quad (3.19)$$

Où t_{FD} est le temps pour un feu complètement développé et E la chaleur de combustion complète des objets dans la combustion confinée. Donc le taux de chaleur relâchée dans un feu complètement développé sera donné:

$$\dot{Q}_{FD} = \alpha t_{FD}^2 \quad (3.20)$$

Et le temps pour un feu complètement développé est calculé de l'équation donnée précédemment :

$$t_{FD} = \frac{0.5 E}{\alpha} \quad (3.21)$$

Et en prenant la phase de déclin comme exponentiel :

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{FD} e^{-\beta t_d} \quad (3.22)$$

Et l'énergie libérée durant le déclin est :

$$E_d = \int_0^{\infty} \dot{Q}_{FD} e^{-\beta t_d} dt_d \quad (3.23)$$

Résolue, on obtient :

$$E_d = \frac{\dot{Q}_{FD}}{\beta} \quad (3.24)$$

Quand 30% de l'énergie est relâchée durant le déclin :

$$\beta = \frac{\dot{Q}_{FD}}{0.3 E} \quad (3.25)$$

Et le temps pour la phase où le taux de chaleur relâché du feu est 0.5%, du peak de le HRR est :

$$t_{decay} = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{\dot{Q}_{FD}}{\dot{Q}_{0.005}} \right) \quad (3.26)$$

La somme des 3 temps, t_{FD} , t_{FC} et t_{decay} , donne la durée total du feux , et de tel pour le taux de chaleur relâchée[21] , [22].

4. Les caractéristiques d'une flamme de feu turbulente

Lorsque une quantité (masse) de gaz chaud est entourée de gaz froid, le plus chaud et dense en masse va remonter (s'élever) à cause de la différence de densité ou plutôt due à la flottabilité. C'est ce qui se produit dans une combustion, au dessous d'une source de combustible, et le débit flottant, de n'importe quelle flamme, est reporté étant une flamme de feu. Lorsque les gaz chauds remontent (s'élèvent), l'air frais est entraîné vers la flamme, causant la formation d'une couche de gaz chauds.

Plusieurs applications dans la sécurité des incendies doivent savoir estimer les propriétés de la couche chaude et le taux de combustion. Elles dépendent directement de la quantité de masse et l'énergie transportée par la flamme aux couches supérieures.

La flamme d'un feu peut être caractérisée de différentes manières, suivant le scenario étudié. Dans cette étude, on se concentrera sur la flamme flottante axisymétrique, causée par une flamme de diffusion formé au dessus du combustible brulé. Les flammes de diffusion se réfèrent au cas où le combustible et l'oxygène sont initialement séparés, et mélangés à travers le processus de diffusion.

La combustion et l'inflammation se produisent dans la partie où la concentration du mélange est favorable pour la combustion, bien que le carburant et l'oxydant, doivent se faire ensemble à travers un mélange turbulent. C'est le processus dans le quel les molécules sont transportés d'une haute à basse concentration.

Les flammes de feu accidentel sont toujours prises comme étant des flammes de diffusion, un axe de symétrie est supposé existé sur la longueur verticale. Cette flamme axisymétrique est devisée en 3 zones comme présenté dans la figure (2.4) :

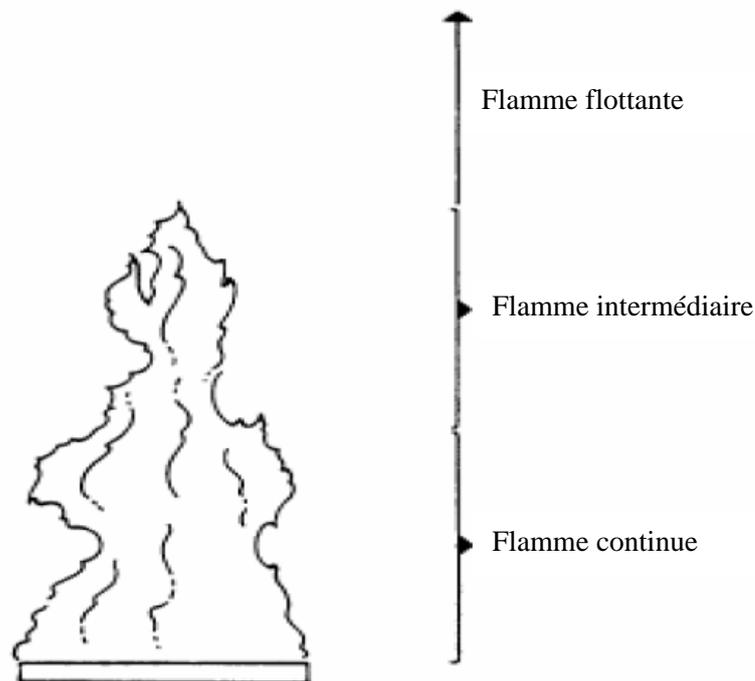


Fig.3.3 : les trois zones d'une flamme flottante axisymétrique

Dans la zone de la flamme continue, la vitesse d'élévation est égale à 0 à la base et augmente avec l'hauteur. Dans la zone intermédiaire, la vitesse est relativement constante et dans la zone de la flamme flottante, la vitesse et la température sont décroissantes avec la hauteur.

4.1 La flamme idéale [20], [21]

La flamme idéale est une des types de flamme de feu le plus simple, en utilisant les équations fondamentales, de dérivée analytique pour le débit massique, la vitesse et la température des gaz données est obtenue, des suppositions sont utilisées dans les calculs:

1) Toute l'énergie est injectée dans le point source de l'origine pour la garder dans la flamme, donc pas d'énergie perdue par rayonnement mais dans les feux réels la partie radiation représente 20 à 40% de l'énergie total relâchée des sources de combustion

2) La différence de densité à travers l'hauteur de la flamme est petite et elle est prise en considération seulement quand la différence ($\rho_a - \rho_o$) apparaît directement alors la théorie de la flamme idéal est référencié des fois comme étant la théorie de la flamme faible, mélanger avec de l'air, la température de la flamme est seulement infiniment supérieur à celle de l'ambiant, ou dans certains points on doit assume que

$p_a = p_0$, cependant, quand l'expression de la force de flottabilité qui est causée par la différence de densité ($\rho_a - \rho_0$), cette supposition n'est pas appliquée. Cette approximation est parfois mentionnée Boussinesq approximation.

3) La vitesse, la température et les forces de profile, sont similaire et ne dépendent pas de l'hauteur z . La vitesse et la température sont constantes dans toute la section horizontale à une hauteur z , de rayon B . et que la vitesse à une certaine hauteur z au dessus de la source de feu $u=0$ et $T=T_a$ en bord du diamètre de la flamme.

4) la vitesse de l'air entraîné à la bordure de la flamme est proportionnel à la vitesse du gaz dans la flamme du local, donc la vitesse d'entraînement peut s'écrire $v = \alpha \cdot u$, avec α une constante donnée 0.15. D'une autre manière, la vitesse d'entraînement horizontale est assumée d'être égale à 15% la vitesse supérieure de la flamme. Cette valeur est difficile à mesurée mais elle correspond avec les valeurs expérimentales mesurées.

Le débit massique de la flamme \dot{m}_p défini comme la masse totale s'écoulant à une certaine hauteur au dessus de la source du combustible, à une distance des limites de la flamme est calculé à une hauteur z :

$$\dot{m}_p = 0.21 \left(\frac{\rho_a^2 g}{c_p T_a} \right) \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (3.27)$$

Le taux de chaleur libérée d'un feu s'écrit :

$$\dot{Q} = \dot{m}_p c_p \Delta T \quad (3.28)$$

En supposant qu'il n'y a pas de transfert par rayonnement, la différence de température à une hauteur z est donnée par :

$$\Delta T = 5.0 \left(\frac{T_a}{g c_p^2 \rho_a^2} \right) \dot{Q}^{2/3} z^{-5/3}$$

4.2 Les équations de flamme basées sur l'expérience

4.2.1. La flamme de zukoski

Des expériences de mesure sur le taux de l'écoulement massique de la flamme, en fonction du taux de chaleur relâchée et de la hauteur sont effectuées. Zukoski [20] a utilisé la théorie de la flamme idéal et il l'a ajusté pour correspondre avec les expériences. Alors l'écoulement massique de la flamme est donné par :

$$\dot{m}_p = 0.21 \left(\frac{\rho_a^2 g}{c_p T_a} \right) \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (3.30)$$

Elle est aussi donnée par la formule :

$$\dot{m}_p = 0.071 \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (3.31)$$

Ou les propriétés de l'air ambiant sont considérées ; $T_a = 293\text{K}$, $\rho_a = 1.1\text{kg/m}^3$ et le $c_p=1.0$ kj/kg K, [21]

4.2.2. La flamme de heskestad

Pour cette flamme, trois des suppositions principales pour la flamme idéale sont négligées :

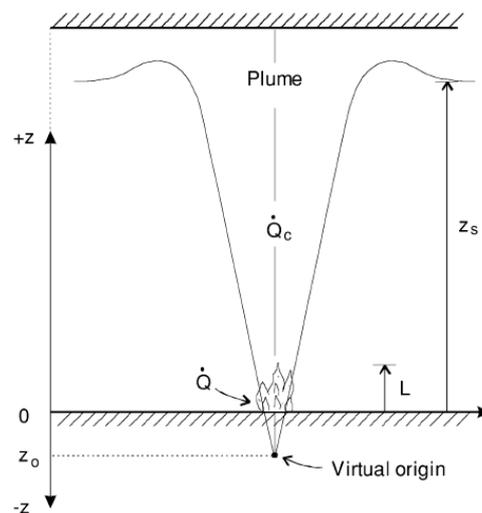


Fig.3.4 : L'origine virtuelle d'une flamme

- 1) Le point de source supposée est remplacé par (virtual origin) l'origine virtuelle à la hauteur Z_0 (figure 3.4). On prend en considération aussi que quelques propriétés dépendent du taux de chaleur relâchée convective Q_c .

- 2) L'approximation de Boussinesq est négligée, pour que la grande différence des densités puisse être prise en considération. c'est-à-dire que la supposition que $\rho_\infty = \rho$ n'est pas prise dans certaines équations, du fait que l'approximation de Boussinesq pour une flamme idéale décrit de faibles plumes tandis que les équations de cette section décrivent de fortes flammes.

Le taux d'écoulement massique dans la flamme dépend de son positionnement au dessus ou bien au dessous. La hauteur principale de la flamme est donnée par :

$$L = -1.02D + 0.235 \dot{Q}^{2/5} \quad (3.32)$$

Où L est la hauteur de la flamme (m), D le diamètre de la base de feu (m), et \dot{Q} le taux d'énergie relâchée (kW).

Le taux d'écoulement dans la flamme d'un feu :

$$\dot{m}_p = [0.0071 \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3}] [1 + 0.027 \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3}] \quad (3.33)$$

Où \dot{m}_p est le taux d'écoulement dans la plume (kg/s), Q_c le taux de chaleur convective relâché (kW), z est la hauteur au dessus de la base du feu (m) et z_0 la hauteur de l'origine virtuelle au dessus de la base de feu :

$$\dot{m}_p = [0.0056 \dot{Q}_c] \frac{z}{L} \quad (3.34)$$

L'origine virtuelle z_0 est le point effectif point de source du feu :

$$z_0 = 0.088 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (3.35)$$

est la température sera donnée :

$$\Delta T_0 = 9.1 \left(\frac{T_a}{g c_p^2 \rho_A^2} \right) \dot{Q}_c^{2/3} z^{-5/3} \quad (3.36)$$

4.2.3. La flamme de McCaffrey

McCaffrey a utilisé les données expérimentales et les analyses dimensionnelles pour arriver aux relations de flammes, la vitesse et la température. Les relations obtenues sont [20] :

$$\Delta T_0 = \left(\frac{\kappa}{0.9\sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta-1} T_a \quad (3.37)$$

$$u_0 = \kappa \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^\eta \dot{Q}^{1/5} \quad (3.38)$$

Les deux constantes κ et η sont dépendantes des 3 régions, et sont données dans le tableau suivant :

région	$\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}}$	η	κ
continue	< 0.08	1/2	6.8
intermédiaire	0.08-0.2	0	1.9
Flottante	> 0.2	-1/3	1.1

Tableau.3.2 : les différentes valeurs des constantes κ et η

Pour la température de la flamme et sa vitesse, l'équation de McCaffrey donne des valeurs avec 10% plus élevées que celles obtenus avec l'équation de Heskestad.

4.2.4. La flamme de Thomas

Thomas a trouvé que dans le champ près de la flamme, le taux d'écoulement massique est indépendant du taux de chaleur relâchée et encore plus une fonction du périmètre du feu et la hauteur au dessus de la base de feu. L'équation du taux d'écoulement de la flamme s'écrit [20]:

$$\dot{m}_p = 0.188 P z^{3/2} \quad (3.39)$$

Où p est le périmètre du feu (m), z est la hauteur en (m). Cette équation est spécialement utilisée pour les cas où $L/D < 1$.

5. Interaction entre la flamme avec le mur et l'angle

Les feux en général ne se produisent pas au milieu du domaine. Des cas ont montré qu'ils se déclarent aussi dans les angles et près des murs, dans les équations discutées précédemment les sources de feu sont supposées circulaire et la flamme de feu est supposée être détachée des murs ou autre surfaces. Zukoski a étudié les cas où le feu se déclare près des murs ou dans les angles. Dans la figure (3.5) les cas étudiés sont présentés :

Les expériences établies montrent que, lorsqu'un bac de feu circulaire est collé au mur la flamme s'attache au mur et se développe comme une demi-flamme mais avec les propriétés d'une flamme qui se développe près du mur. Dans ce cas, l'écoulement massique de flamme peut être calculé, pour être la moitié de l'écoulement massique du feu mais avec deux fois le taux d'énergie relâchée. D'après l'équation de Zukoski, une équation est développée pour ce cas :

$$\dot{m}_{p,wall} = 0.045 \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (3.40)$$

Et pour le cas où le feu est dans l'angle, l'écoulement de la flamme est 1/4 l'écoulement près du mur et 4 fois son taux d'énergie relâchée. Alors on obtient, l'équation :

$$\dot{m}_{p,corner} = 0.028 \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (3.41)$$

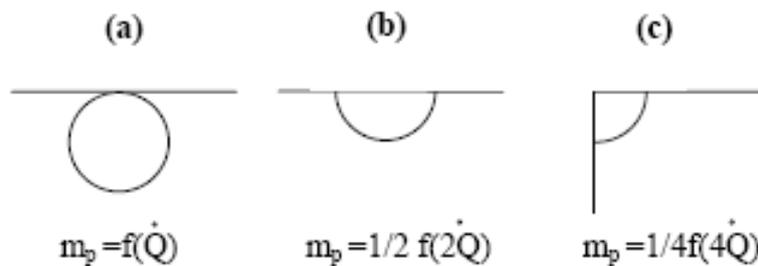


Fig.3.5 : la source de chaleur près du mur et dans l'angle

CHAPITRE 4

Présentation Du Code De Calcul

Et

Etude Numérique

1. Introduction

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

La puissance toujours croissante des moyens de calcul permet aujourd'hui d'envisager de façon sérieuse de résoudre ces équations à 3 dimensions et de pouvoir ainsi simuler des écoulements. Mais dans le cas d'incendie, la complexité est accrue puisqu'il faut considérer également des transferts de chaleur importants et une modélisation pour le processus et les phénomènes de combustion qui sont encore assez mal connus. La nécessité de prendre en compte les phénomènes de turbulence dans ce genre de cas constitue également une difficulté importante [22].

Il existe de nombreux événements liés au feu. Nous adopterons tout d'abord une classification des logiciels par rapport aux phénomènes qu'ils sont capables de décrire.

2. Classification des logiciels d'incendie

Les logiciels d'incendie les plus communs décrivent le transfert et le transport de la fumée et de la chaleur dans un compartiment. Ces logiciels sont appelés modèles de zones et modèles de champs.

2.1. Modèle de Zones

Un modèle de zones est un modèle numérique qui découpe le domaine d'étude en différents volumes de contrôle encore appelés zones. Le plus commun des modèles de zones découpe un volume en deux parties : une zone chaude et une zone froide.

Le cas particulier d'un découpage en une seule zone constitue le modèle 'une zone', Ce modèle fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de stratification dans le compartiment simulé (cas de l'incendie généralisé) et que les grandeurs du problème sont homogènes. Certains logiciels permettent de passer d'un modèle de deux zones à un modèle à une zone afin de décrire au mieux l'incendie avant et après le flash-over (embrasement généralisé) du au rayonnement des gaz chauds en zone chaude (sous plafond) sur les combustibles en zone basse.

2.2. Modèles de champs - Simulation Numérique (CFD)

La simulation numérique est à la pointe de ce que peut faire actuellement l'ingénierie de la sécurité incendie. Le Modèle de champs encore appelé, dans le domaine de la sécurité

incendie (Computational Fluid Dynamics) signifie mécanique des fluides numérique. Un modèle CFD se base sur un maillage 3D constitué de volumes de contrôles élémentaires inclus dans le domaine d'étude. Par souci de simplification, on peut considérer que le modèle CFD n'est rien d'autre qu'un modèle de zone, avec un très grand nombre de zones élémentaires dont le comportement est, en première approximation, identique au comportement globale d'une zone d'un modèle une ou deux zones.

La CFD ou simulation numérique résout l'équation de Navier-Stokes (équation fondamentale de la mécanique des fluides) sur chaque volume élémentaire. Cette approche détaillée est bien plus complexe et prend plus de temps que les modèles de zones (aussi bien en temps de paramétrage qu'en temps de calcul). Cependant, les équations de Navier Stokes ne dépendent que des conditions aux limites du problème.

Ainsi, la CFD nécessite beaucoup moins d'hypothèses que les modèles de zone et elle permet de traiter toutes sortes de géométries. Cet outil plus malléable va permettre de répondre de manière plus optimale à certains objectifs naturels. Il prend soin de représenter au mieux le transport des fumées et de la chaleur.

3. Description du code FDS [24], [25]

FDS a été développé pour résoudre des problèmes pratiques de l'ingénierie de la sécurité incendie et parallèlement, pour fournir un outil pour la recherche fondamentale en dynamique du feu et en combustion. Comme tous les logiciels CFD, passe par trois étapes pour simuler un phénomène. Premièrement le Pré Processeur qui est un fichier d'entrée de type texte sur le quel on spécifie la géométrie et les conditions aux limites. Ce fichier sera compilé et exécuté par le Solveur qui est, dans ce cas FDS. Finalement les résultats des simulations peuvent être visualisés sur le Post-Processeur qui est un programme compagnon appelé Smokeview.

Smokeview [24], [25] est un logiciel de visualisation 3D qui a été développé pour présenter les résultats de simulation FDS. Il permet de visualiser notamment les écoulements de particules, des iso courbes en 2D ou des iso-surfaces en 3D, des champs de vecteur vitesse et température.

3.1 Principe et objectifs du modèle

Ce code a été spécialement développé dans le but de modéliser les conséquences d'incendie de taille industrielle. Les objectifs poursuivis dans le développement du code FDS sont multiples.

Premièrement en tant que code CFD, il permet la modélisation de la dynamique du feu. On peut penser qu'à terme avec l'amélioration croissante de la puissance de calcul, il sera possible d'obtenir une résolution permettant une simulation de plus en plus proche de la réalité. Deuxièmement il est destiné à prévoir les conséquences d'un incendie dans de très diverses géométries [23].

3.2 Potentialités et limitation de FDS :

FDS peut être utilisé pour modéliser les phénomènes suivants :

- Le transport à faible vitesse des produits de combustion
- Transfert de chaleur convectif et radiatif entre gaz et solides
- Pyrolyse
- Propagation des flammes et développement du feu
- Extincteurs, arroseurs, détecteurs de chaleurs et leurs activations

Bien que FDS ait été conçu spécialement pour la simulation des feux, il peut être utilisé dans d'autres simulations à faible vitesse qui n'implique pas nécessairement la présence d'un feu ou des effets thermiques [23].

Malgré que FDS puisse aborder plusieurs types de scénarios, il existe des limitations dans tous ses algorithmes dont les plus essentielles sont les suivantes :

- Hypothèse de l'écoulement à faible vitesse : cette hypothèse rend FDS inapproprié pour modéliser des scénarios impliquant la présence de grandes vitesses qui approchent la vitesse du son comme c'est le cas dans les explosions, les ondes de choc dans les tuyères et les détonations.
- Géométrie rectiligne : l'efficacité de FDS provient de la simplicité de la grille de résolution numérique et de l'utilisation d'un solveur direct et rapide pour le champ de pression. En contre partie, ceci constitue une limitation dans le cas où la géométrie n'est pas conforme avec le maillage rectangulaire.
- Développement du feu et sa propagation : Comme le modèle de FDS a été conçu à l'origine pour analyser les feux à échelle industrielle, il peut être utilisé et donnera de bons résultats, selon la finesse du maillage, dans le cas où le HRR du feu est spécifié. Par contre dans le cas où le HRR est prédit au lieu d'être spécifié, l'incertitude du modèle devient plus importante.

- Combustion : FDS utilise un modèle de combustion basé sur la notion de fraction de mélange. Dans sa forme la plus simple, le modèle suppose que la combustion est fonction uniquement du mélange sans tenir compte de la température. Celle-ci est une bonne supposition dans le cas des feux à grande échelle et bien ventilés. Par contre si le feu manque de bonne ventilation, l'oxygène et le combustible peuvent se mélanger sans qu'ils s'enflamment.

3.3 Modèles Mathématiques présents dans FDS :

3.3.1. Modèle hydrodynamique :

Il permet de résoudre une forme des équations de Navier Stokes appropriées aux écoulements de faible nombre de Mach à l'aide d'un algorithme explicite de type prédiction - correction d'une précision du second ordre. La turbulence est traitée à l'aide de la méthode LES (mode par défaut). Le code FDS peut également faire la résolution en mode DNS si le maillage considéré est assez fin. Les termes dissipatifs sont calculés directement. Le choix entre LES et DNS dépend de la nature du problème et de l'objectif du calcul.

Par exemple, pour une simulation de la propagation des fumées dans un large espace, il n'est pas possible de calculer les équations de transport et de combustion directement. Par contre, pour simuler une combustion à petite échelle, le calcul des équations de transport et de combustion peut se faire dans un certain niveau.[24]

Les équations associées aux modèles hydrodynamiques s'écrivent :

- Équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

- Équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot (u u) + \nabla P = \rho f + \nabla \tau_{ij}$$

- Équation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (u h) + \nabla P = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla q + \Phi$$

- Équation d'état des gaz parfaits :

$$p = \frac{\rho R T}{M}$$

Puisque il n'y a aucune solution analytique de l'équation de Navier-Stocks, la solution exige l'usage des méthodes numériques où le volume d'étude est divisé en une grille tridimensionnelle constituée de petits cubes (cellules de la grille). Le modèle calcule les conditions physiques dans chaque cellule comme une fonction de temps.

L'algorithme utilisé est un algorithme explicite de type prédiction-corrrection d'une précision du second ordre en espace et en temps. La turbulence est traitée au moyen de la forme Smagorinsky (LES) "Large Eddy Simulation". LES est le mode d'opération par défaut et il a été utilisé dans l'étude décrite dans ce mémoire. C'est aussi possible d'exécuter une résolution en mode DNS (Direct Numerical Simulation) dans FDS. Cependant, les simulations DNS exigent un maillage très fin, ce qui n'est pas toujours possible, en tenant compte de limitation en ressources informatiques.

A noter que L'algorithme numérique de FDS est conçu d'une façon à ce que le traitement par LES tend vers celui de DNS quand le maillage est suffisamment raffiné. La résolution des équations simplifiées de la dynamique des fluides issues après toutes ces simplifications est faite à l'aide de la méthode des volumes finis avec une approximation de second ordre. Les variables sont mises à jour dans le temps par un algorithme de type prédiction-corrrection d'une précision de second ordre. Le maillage est structuré, cartésien et décalé : les variables scalaires sont calculées au centre des mailles tandis que les variables vectorielles sont définies au centre des faces des mailles

3.3.2. Utilisation de la méthode LES dans FDS

Dans l'espace spectral, le principe de la méthode LES consiste à filtrer les petites échelles. Cela revient, dans l'espace physique, à ignorer les échelles de taille inférieure à une certaine dimension qui, dans le cas d'un code CFD, est défini par le pas de maillage. Pour ce faire, on est amené à filtrer les équations pour ne simuler que les grosses structures porteuses de l'énergie et caractéristiques de l'écoulement. Les petites structures des zones inertielles et dissipatives sont modélisées par des modèles type sous maille, qui fait apparaître des termes supplémentaires de tension de sous maille qui correspondent aux interactions entre grosses et petites structures.

L'étude de ces interactions montre qu'elles ont deux rôles : d'une part elles régissent le flux d'énergie à travers la coupure entre les grandes échelles et les échelles de sous-mailles et d'autre part, elles contribuent à la diffusion visqueuse. L'objectif est donc de modéliser l'effet (dissipatif) des échelles qui ne sont pas prises en compte c'est-à-dire de modéliser une certaine viscosité turbulente ν_t . La forme de cette modélisation caractérise les différents

modèles de sous-maillages. Le modèle de viscosité dans l'espace physique de Smagorinsky (1963) est certainement le plus populaire. Il introduit une dépendance de ν avec le taux de déformation local lié aux grandes échelles et c'est sur une telle analyse que le code FDS repose.

3.3.3. Modèle de combustion:

Il existe deux modèles de combustion utilisés dans FDS, celui qui est par défaut utilise la fraction du mélange qui est une quantité conservée et qui représente le combustible et les produits de combustion. Le deuxième utilise les paramètres d'Arrhenius spécifique à chaque espèce. Mais souvent ce deuxième modèle est utilisé en mode DNS où la diffusion du combustible et de l'oxygène peut être modélisée directement. Par contre, quand la grille de maillage n'est pas suffisamment raffinée, c'est le premier modèle qui est adapté et est utilisé avec la simulation à grandes échelles LES.

Dans la plupart des cas, le code FDS utilise un modèle de combustion avec une fraction de mélange qui représente une quantité scalaire conservative d'un gaz en un point donné du domaine. Le modèle suppose que la combustion se produit un mélange contrôlé et que la réaction du combustible et de l'oxygène est infiniment rapide. La fraction massique de tout les réactants et produits peut être dérivée de la fraction de mélange par le moyen d'équations d'état, ou bien d'expressions empiriques obtenues par analogie entre des analyses simplifiées et des expériences

4. Etude numérique

La simulation numérique consiste à reproduire un phénomène physique, chimique, biologique ou autre, au moyen d'équations physiques, algorithmes informatiques, etc. C'est un procédé qui consomme beaucoup en temps de calcul et en espace mémoire.

Son processus simplifié passe par une :

1. Création du modèle Géométrique
2. Maillage
3. Définition des conditions physiques (conditions limites, densités, matériaux,...), et des différents scénarios.
4. Simulation numérique, des calculs potentiellement plusieurs heures
5. Visualisation, des graphes ou bien des tableaux (Chapitre 5).

4.1. Maillage et hypothèses générale

En simulation numérique de phénomènes thermiques, un soin tout particulier doit être apporté à un premier paramètre, le maillage. Une étape essentielle du calcul numérique d'où un critère nécessaire à la réalisation d'un bon calcul dans des temps raisonnables (des heures ou même des jours). Pour cela, la taille de la maille doit être bien choisie que ce soit raffiné ou trop large.

Une étude de sensibilité de l'algorithme à divers paramètres influençant le temps de calcul a été effectuée sur le temps de calcul mais surtout sur la validité des résultats, sur FDS, le seul maillage existant est structuré, c'est-à-dire de formes de mailles parallélépipédiques. Dans le tableau (3.1), les différents cas avec les tailles de maille, les nombres de mailles suivant les trois directions. Le nombre total des mailles et le temps de calcul sont présentés.

Cas	Tailles (m) $\Delta x \ \Delta y \ \Delta z$	Nb des mailles suivant les trois directions	Nombre total des mailles	Temps de calcul (h)
1 ^{er} cas	0.5*1*1	100 x 20 x 14	28000	1.25
2 ^e cas	0.5*0.5*1	100 x 40 x 14	56000	2.50
3 ^e cas	0.5*0.5*0.5	100 x 40 x 28	112000	3.43
4 ^e cas	0.5*0.5*0.25	100 x 40 x 56	224000	6.45
5 ^e cas	0.25*0.5*0.5	200 x 40 x 28	224000	7.15

Tab 4.1 : Résultats de la simulation pour différents cas de maillages

Les résultats pour les cinq cas de simulations sont présentés dans cette partie pour montrer l'effet de la taille du maillage sur l'estimation de la température. Dans la figure (4.1) on présente l'évolution de la température moyenne en fonction de la hauteur de la centrale à une section donnée. La figure (4.2) donne le temps de calcul pour les cas simulés. On remarque à partir des résultats de simulation obtenus pour le quatrième cas et le cinquième cas de maillage que les températures sont très proches mais le temps de calcul a diminué. Ainsi, nous adopterons les dimensions de cellules de maille utilisées dans le quatrième cas pour cette étude.

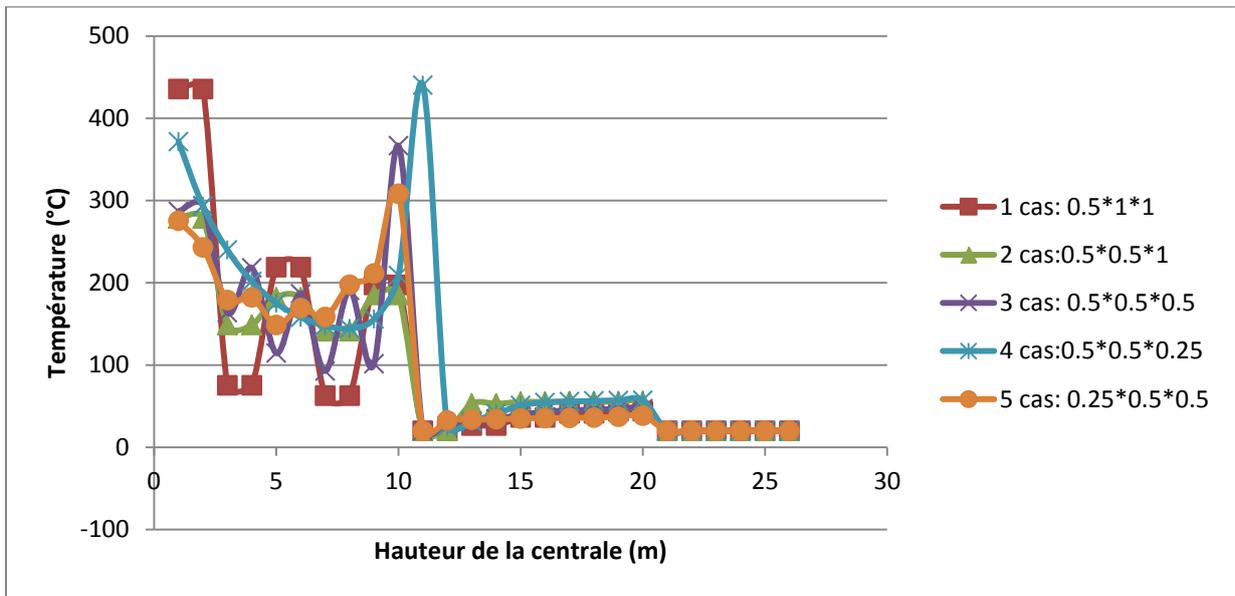


Fig.4. 1 : Evolution de la température pour les cas simulés

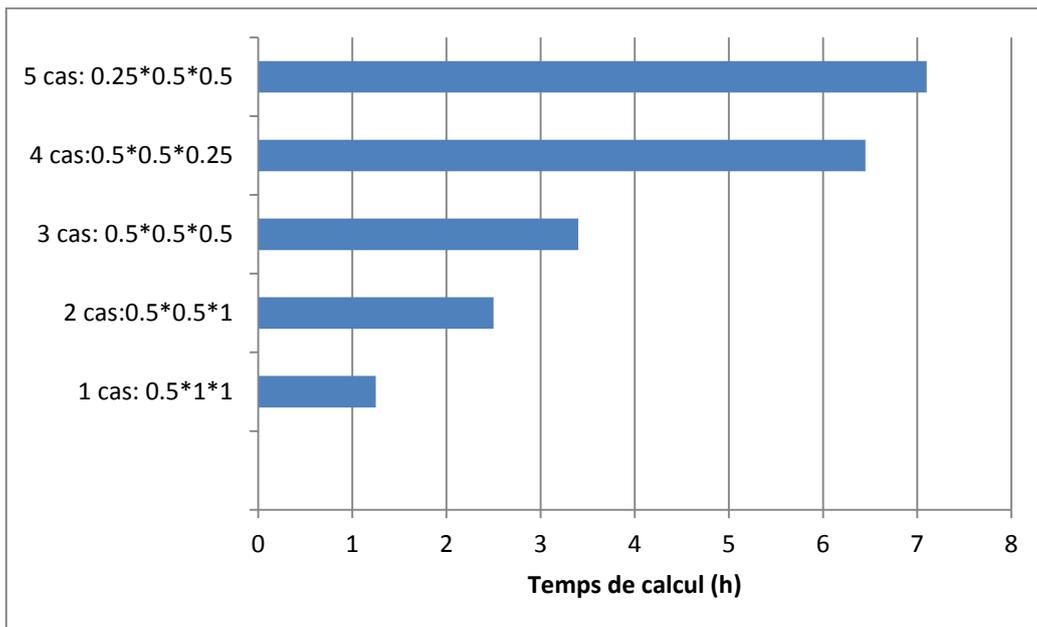


Fig. 4.2 : le temps de calcul pour les cas simulés

La validation du maillage a été faite par les équations présentées dans le chapitre 2 et le chapitre 3 ainsi que les résultats du code FDS..

Les équations utilisées sont :

L'équation de Zukoski (3.30) pour un cas au milieu du domaine et les équations (3.40) et (3.41) pour le cas où le feu est dans l'angle ou près du mur. L'équation de Heskestad and Delichatsios (3.36) et l'équation de Kurioka (2.1) et (2.2) est une équation empirique pour prévoir la température maximale.

Les résultats présentés ci-dessous obtenus pour le maillage, utilisé sont les plus appropriés.

L'équation de Zukoski

	Position de la source		
Température	milieu	ANGLE	MUR
Equations empiriques	1157	1143	822
FDS	1514,65	987,17	573,06

L'équation de Heskestad and Delichatsios

	Position de la source		
Température	Turbine 1	Turbine 3	ANGLE
Equations empiriques	1469	1469	822
FDS	1241,65	1669,17	987,17

L'équation de Kurioka

	Position de la source		
Température	Turbine 1	Turbine 3	ANGLE
Equations empiriques	1037	1037	503.81
FDS	1514,65	1942,8	987,17

Tab 4.2 : la validation du maillage avec les équations

On remarque que les valeurs obtenues par les équations de Zukoski sont les plus rapprochées avec ceux obtenus avec le code FDS. Zukoski a donné des équations qui prévoient le débit pour un feu dans l'angle et près des murs, des cas non étudiés dans la littérature, différent de ceux où le feu se déclenche au milieu de l'installation.

4.2. Définition de la configuration de l'étude

Les espaces vastes tels que les usines ou les installations industrielles posent de nombreux problèmes concernant les incendies car ils peuvent contenir une grande quantité de matériels ou de combustibles et leur géométrie rend délicate la sécurité des personnes physiques.

La configuration qui fait l'objet de cette étude est une centrale hydroélectrique souterraine. Ces centrales présentent en général une plateforme supérieure ouverte sur l'extérieur permettant l'accès du personnel ainsi que le déchargement du matériel. Aux niveaux inférieurs ou bien le compartiment bas se situent les turbines traversant la plateforme et dans l'étage on trouve la salle de contrôle avec des bureaux pour le personnel.

L'installation à deux niveaux (figure (4.3)), d'une longueur de 70m, d'une largeur de 20m et d'une hauteur de 14m, dont la seule voie de communication entre les deux niveaux est la trémie de l'escalier qui a pour longueur 4m, et pour largeur de 3m (la trémie de l'élévateur de 8m x 4.5m, les autres ouvertures pour les différents scénarios seront présentées par la suite), l'installation est dotée de deux sorties (portes) dont une porte principale pour le personnel, de hauteur de 4m et une largeur de 5m du côté de l'escalier, et l'autre que l'on désignera porte ouvrant sur une cage monte charge (élévateur) pour le matériel d'une hauteur de 4m et une largeur de 10m (ouverte dans l'un des scénarios que l'on présentera plus tard).

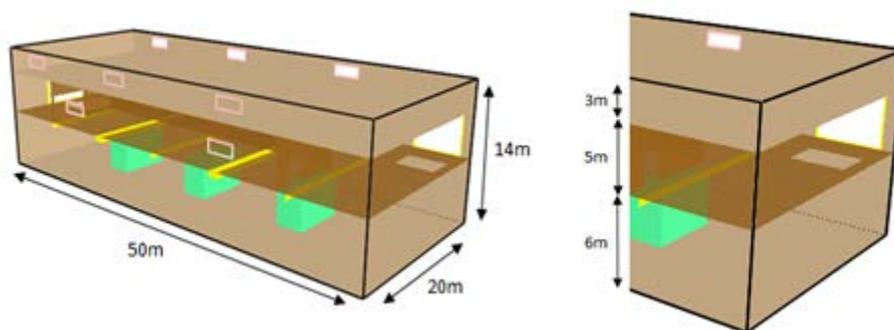


Fig4.3: définition du domaine d'étude

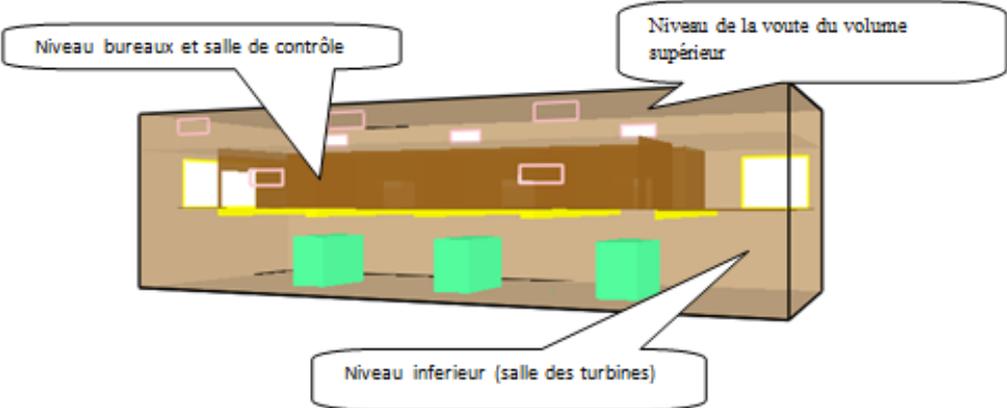


Fig4.4 : les différents niveaux de la centrale

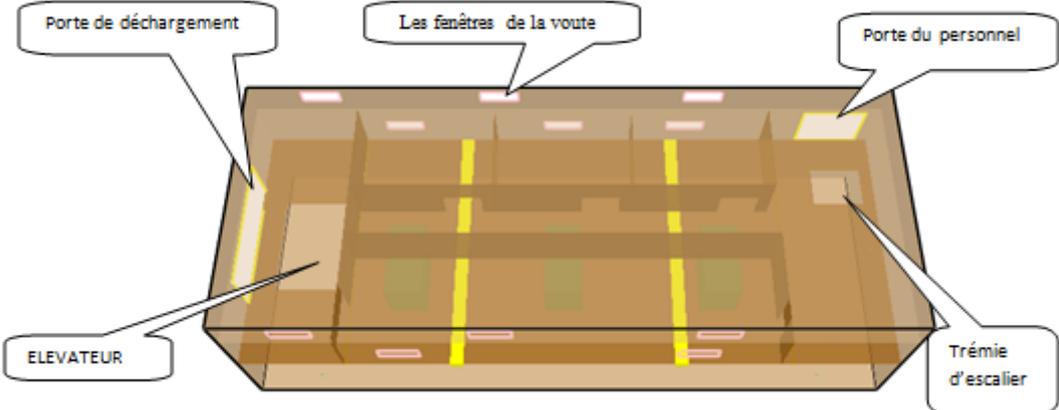


Fig 4.5: les différentes ouvertures

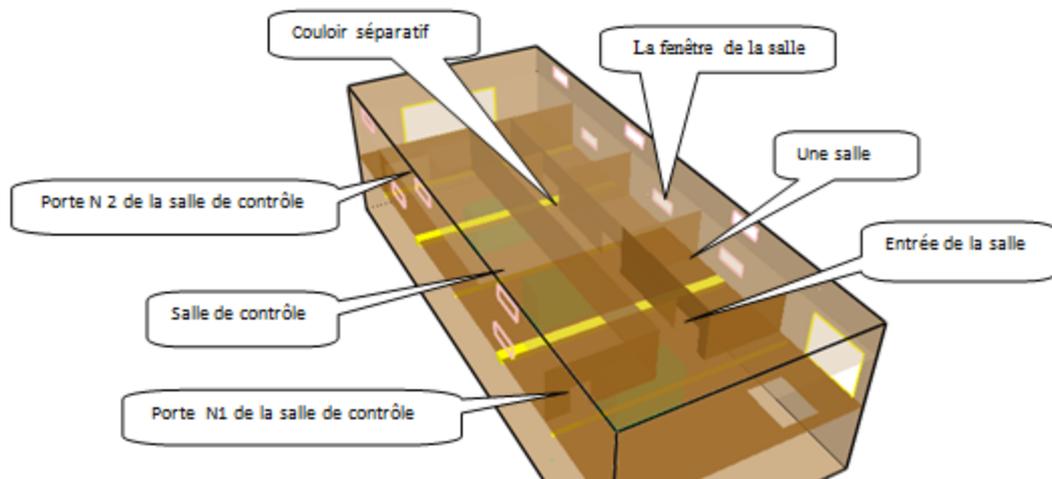


Fig 4.6: présentation du niveau du personnel

Le faux plafond au niveau de la voute du volume supérieur, comporte plusieurs fenêtres d'extraction (au nombre de 6) qui occupent toute la façade de l'usine des deux cotés. Le niveau occupé par le personnel est divisé en deux parties séparées par un couloir, d'un coté la salle de contrôle des machines qui a deux entrées et dotés de fenêtres (figure (4.5)), de l'autre coté se trouvent les 3 salles avec chacune d'elles une entrée et une fenêtre. Le niveau inférieur ou bien la salle des machines est complètement fermé (puisque elle se situe en souterrain), ou on trouve les 3 turbines (couleur vert) de l'installation hydro-électrique figure (4.4).

4.3. Exposition des scénarios

Les feux peuvent avoir plusieurs origines (armoires électriques, flaques d'huiles au niveau des carters des turbines ou feux de camion sur la plateforme) et être localisés en fonction de ces origines. Le feu est simulé comme une source de chaleur surfacique imposée et non pas recherchée, d'une puissance variant de 6MW à 18 MW, qui est situé à différents endroits selon le scénario considéré.

Dans cette application, nous avons considéré cinq (05) scénarios de feu avec quatre configurations de désenfumage pour la stratégie d'extraction la plus optimale.

Scénario un : le feu se déclenche dans l'angle

Scénario deux : le feu se déclenche près du mur

Pour ces deux cas la puissance est supposée de 6MW sur une surface de 4m² ce qui fait une puissance surfacique de 1500 kW/m². Ces deux scénarios sont traités pour mieux

cerner et comprendre le comportement des fumées. Il s'avère que ces deux premiers cas tests présentent une dangerosité suite au confinement. Il est donc suggéré que tous les cas sont dangereux.

Scénarios trois, quatre et cinq : le feu se déclenche sur les turbines. La puissance est supposée de 18 MW sur une surface de 12m², ce qui fait une puissance surfacique de 18000 kW/m², dans ces scénarios, le feu se situe sur l'une des turbines. Si le feu se déclenche sur la turbine de droite, les escaliers qui sont la voie d'évacuation se trouveront rapidement bloquées par les fumées chaudes.

Les stratégies sont les suivantes:

La 1^{ère} stratégie : toutes les ouvertures sont supposées fermées sauf la porte de sortie figure 4.7.

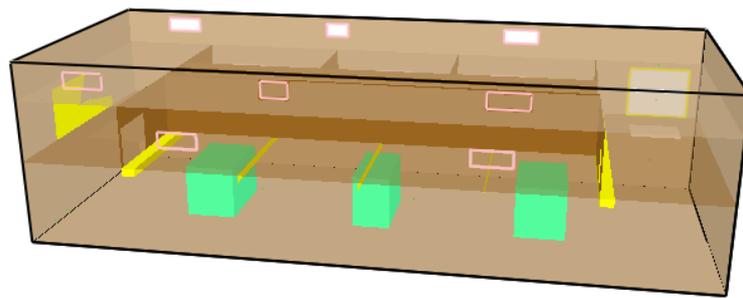


Fig.4.7 : 1^{ère} stratégie sans ouverture (sauf la porte du personnel)

La 2^{ème} stratégie : les deux portes sont supposées ouvertes, porte du personnel ainsi que la porte de déchargement du matériel. Dans ce cas, la trémie de l'élévateur de déchargement est ouverte figure 4.7.

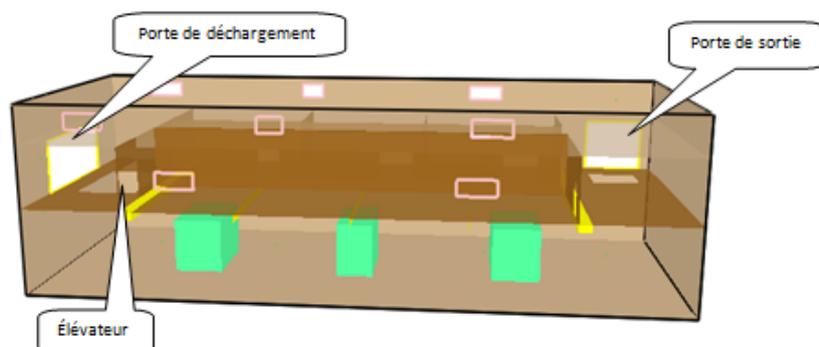


Fig 4.8: 2^{ème} stratégie avec les portes ouvertes (l'élévateur est ouvert)

La 3^{ème} stratégie : Extraction avec un débit de $50\text{m}^3/\text{s}$ par chacune des 4 trappes situées sur les deux cotés latéraux au niveau supérieur et au niveau du faux plafond. Les 6 trémies superposées servent de conduit d'évacuation. Trois relient le niveau inférieur (la salle des machines) au niveau supérieur, les trois autres entre le niveau supérieur et la voute du faux plafond figure (4.9).

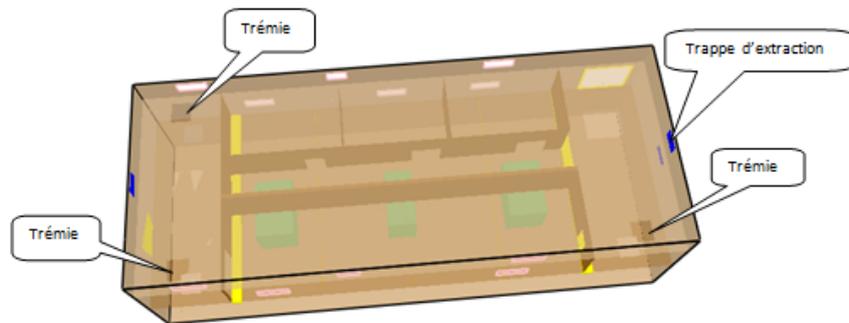


Fig 4.9: 3^{ème} stratégie avec un débit d'extraction sur les trappes et la présence de trémies

La 4^{ème} stratégie : Extraction avec un débit de $50\text{m}^3/\text{s}$ par chacune des 4 trappes situées dans les 2 murs latéraux, et 3 évacuateurs qui traversent tout le niveau supérieur pour déverser directement sur le faux plafond figure (4 .10).

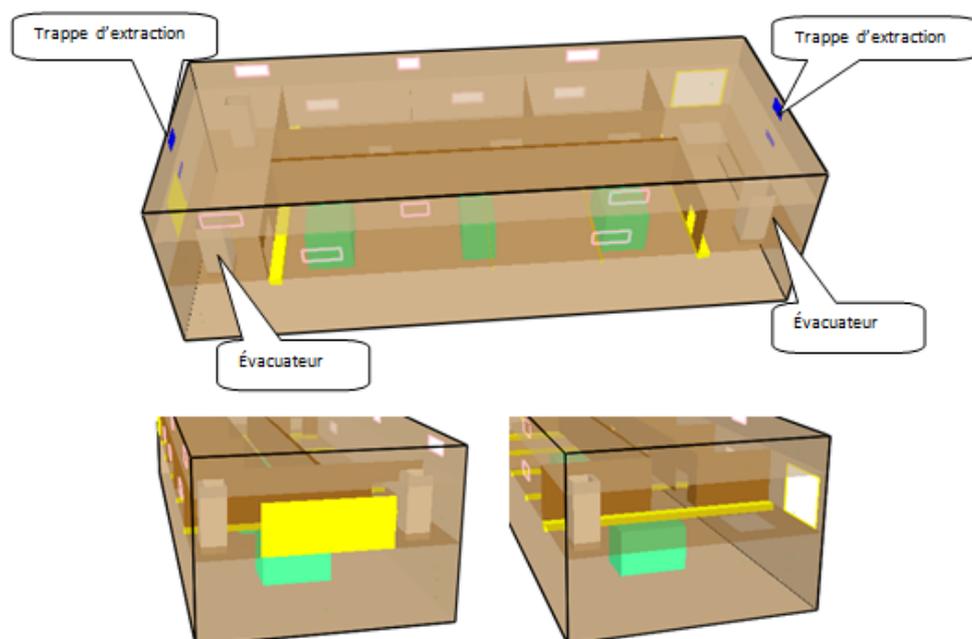


Fig 4.10 : 4^{ème} stratégie avec un débit d'extraction sur les trappes et 3 évacuateurs

Dans les calculs, il a été supposé que la totalité de l'énergie est transportée par convection, et l'influence de la radiation est négligeable.

Le désenfumage de la centrale consiste à assurer la ventilation la plus adéquate pour l'évacuation des fumées. L'étude CFD est faite avec logiciel FDS 5.04, pour déterminer et comparer les résultats obtenus, la température maximale et les profils de température, avec ceux calculés en utilisant les équations déjà présentées.

CHAPITRE 5

Résultats et Interprétations

5.1 Présentation et analyse des résultats du scénario Un : feu dans l'angle

Dans ce cas le feu est supposé se déclencher dans l'angle. La puissance est supposée 6MW sur une surface de 4m² ce qui fait une puissance de surface de 1500 Kw/m², Les résultats sont présentés sous plusieurs formes (tableaux, graphes, images.etc.).

Quatre différentes stratégies seront testées et présentées afin de retrouver celle qui serait l'optimale.

1^{ère} stratégie : toutes les ouvertures sont supposées fermées sauf la porte de sortie

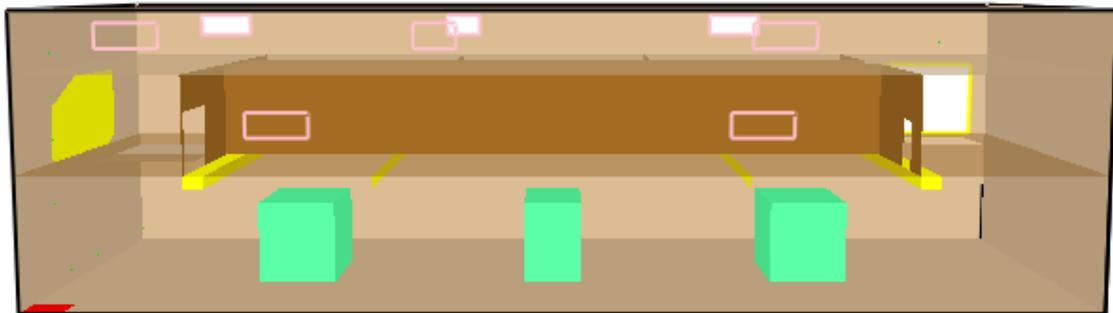


Fig.5.1: 1^{ier} scénario sans ouverture (sauf la porte du personnel)

2^{ème} stratégie : les deux portes sont supposées ouvertes, porte du personnel ainsi que la porte du déchargement du matériel, dans ce cas la trémie de l'élévateur de déchargement est aussi ouverte figure 5.2.



Fig.5.2 : 1^{ier} scénario avec les portes ouvertes (l'élévateur est ouvert)

3^{ème} stratégie : Extraction avec un débit de $50\text{m}^3/\text{s}$ par chacune des 4 trappes situées sur les deux cotés latéraux au niveau supérieur et au niveau du faux plafond. Les 6 trémies superposées servent de conduit d'évacuation. Trois relient le niveau inférieur (la salle des machines) au niveau supérieur, les trois autres entre le niveau supérieur et la voute du faux plafond figure 5.3.

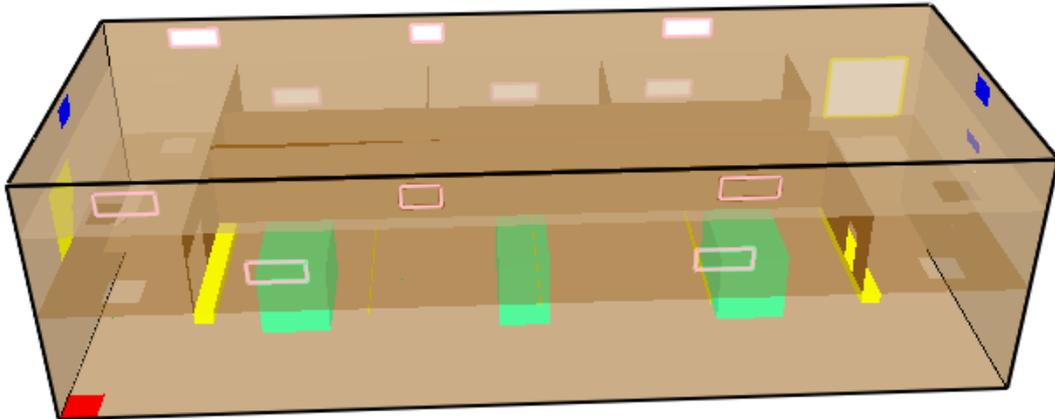


Fig.5.3: 1^{ier} scénario avec un débit d'extraction sur les trappes et la présence de trémies

4^{ème} stratégie : Extraction avec un débit de $50\text{m}^3/\text{s}$ par chacune des 4 trappes situées dans les 2 murs latéraux, et 3 évacuateurs qui traversent tout le niveau supérieur pour déverser directement sur le faux plafond.

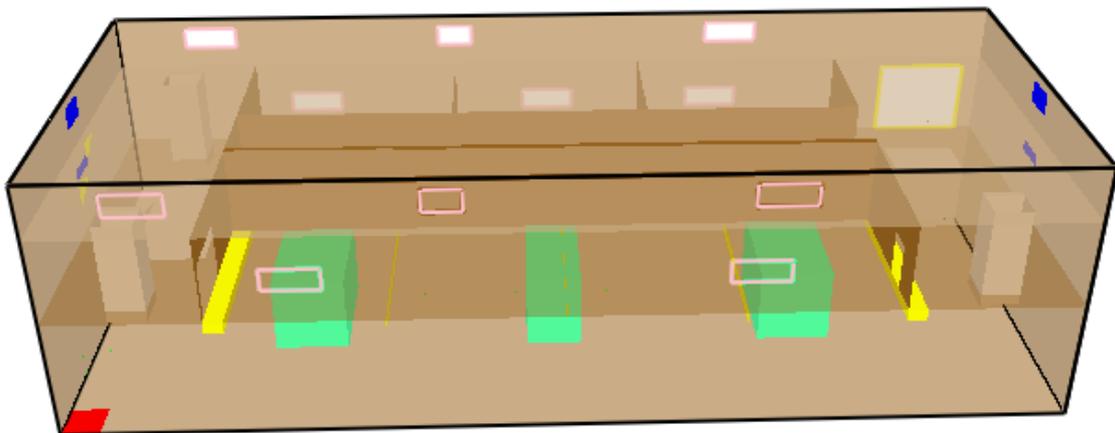


Fig.5.4 : 1^{ier} scénario avec un débit d'extraction sur les trappes et 3 évacuateurs

5.1.1. La 1^{ère} stratégie :

Les visualisations par Smokeview (figure 5.5 et 5.6) des résultats des simulations pour ce cas montrent l'enfumage du niveau bas de la centrale au bout de 60s seulement. À partir de ce temps, le deuxième niveau est envahi. La fumée traverse le couloir conduisant vers les bureaux et aussi la salle de contrôle. Après $t = 120s$ la fumée se propage dans toute la centrale.

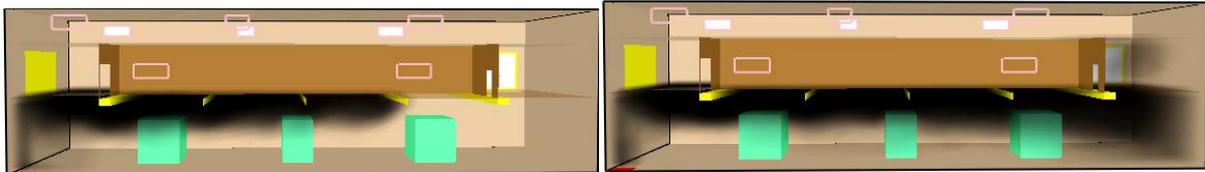


Fig 5.5 propagation de la fumée à $t = 30s$ et $t = 60s$ pour S1

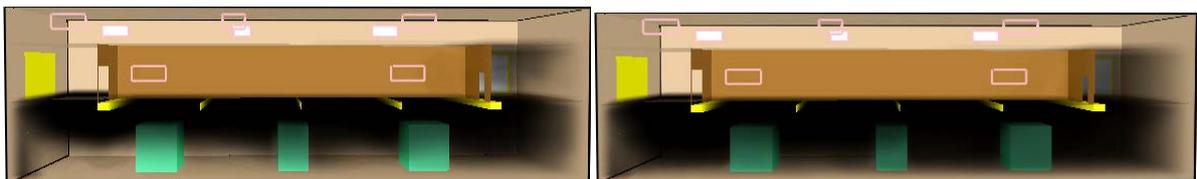


Fig 5.6 propagation de la fumée à $t = 90s$ et $t = 120s$ pour S1

La figure 5.7 présente le profil de température dans la centrale à la section transversale médiane. La température peut atteindre $50^{\circ}C$ à des niveaux inférieurs à la hauteur d'homme après 120s. La trémie des escaliers étant envahie par les fumées, sa température peut aussi augmenter. Elle a atteint $40^{\circ}C$ juste après 60s. Cette stratégie présente un danger certain pour le personnel et l'équipement de la centrale.

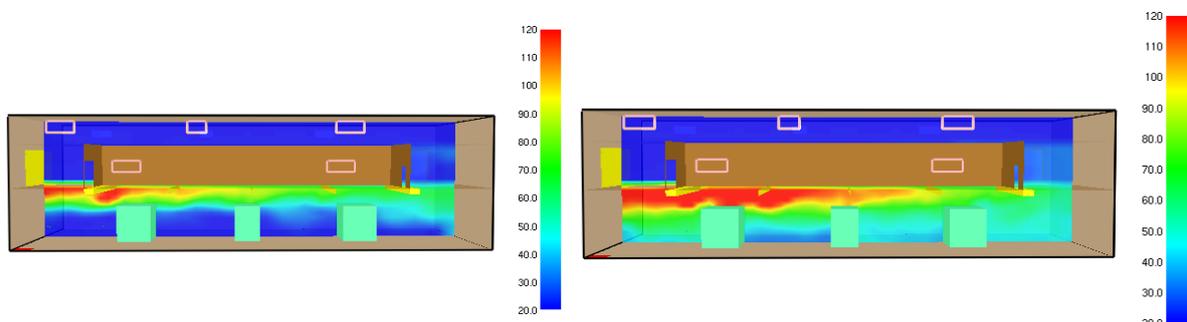


Fig 5.7: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

Tableau 5.1 : la variation de la température à une hauteur de 1.5 m du sol le long de la centrale

X	1	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
S1 à 60s	21,08	19,83	20,16	20,01	20,00	20,00	22,52	20,87	21,37	20,19	20,00
S1 à 120s	55,09	54,85	56,59	53,73	20,00	20,00	39,75	42,68	42,25	35,04	20,00

27,5	30	32,5	35	37,5	40	42,5	45	47,5	50
20,24	22,20	23,24	22,00	20,00	20,61	27,86	28,47	36,65	36,87
44,27	45,13	50,63	39,35	20,00	47,75	45,88	47,10	45,49	43,86

Ces variations de la température sont présentées sur le graphe de la figure 5.8:

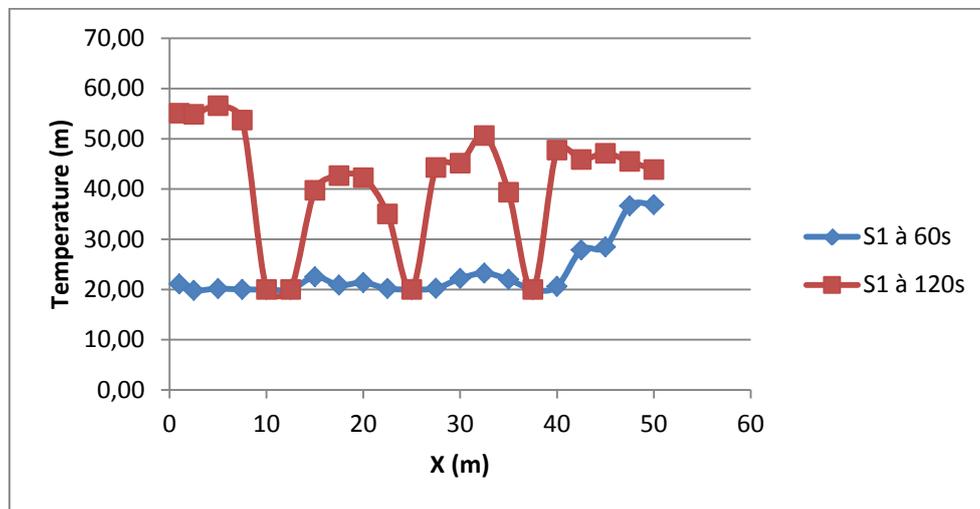


Fig 5.8 : distribution de la température à une hauteur 1.5m à t=60s et t=120s pour S1

On remarque que le profil de température à l’instant t= 60s ne varie pas et égale à la température ambiante jusqu’à 40m de la position de la source de chaleur. Elle commence à augmenter quand un cumul de fumée s’installe au voisinage de la trémie des escaliers pour atteindre presque 40°C. D’un autre coté après un temps de 120s, la température des fumées varie en zigzag et ceci est dû à la présence des trois turbines qui empêchent les fumées de se propager d’une manière uniforme sur tout le volume de la centrale. Les niveaux de température atteints entre les turbines est d’environ 50°C. Dans les figures 5.9 et 5. 10, on présente l’enfumage et le champ de température des fumées au voisinage de la source de chaleur à deux temps distincts.

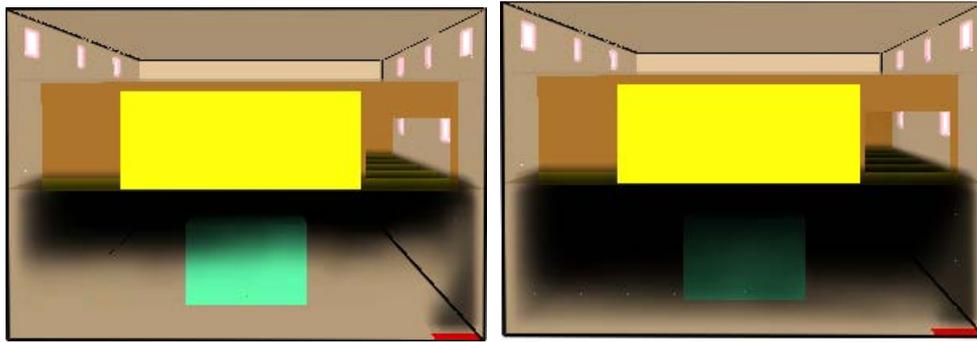


Fig 5.9 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S1

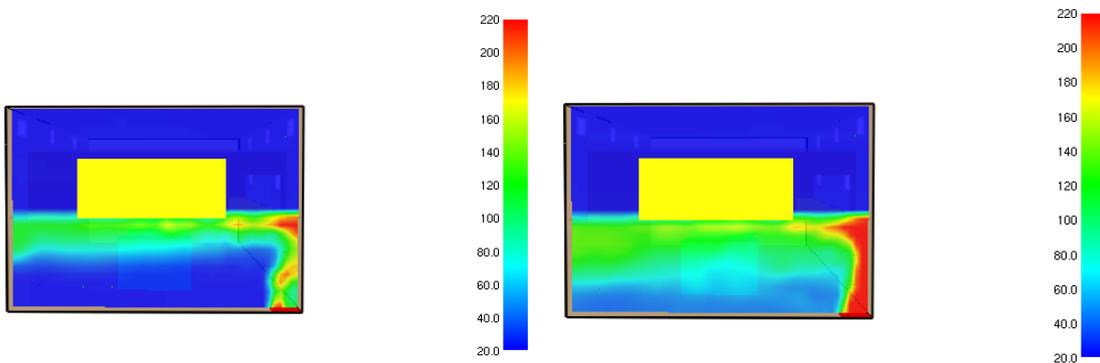


Fig 5.10: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S1

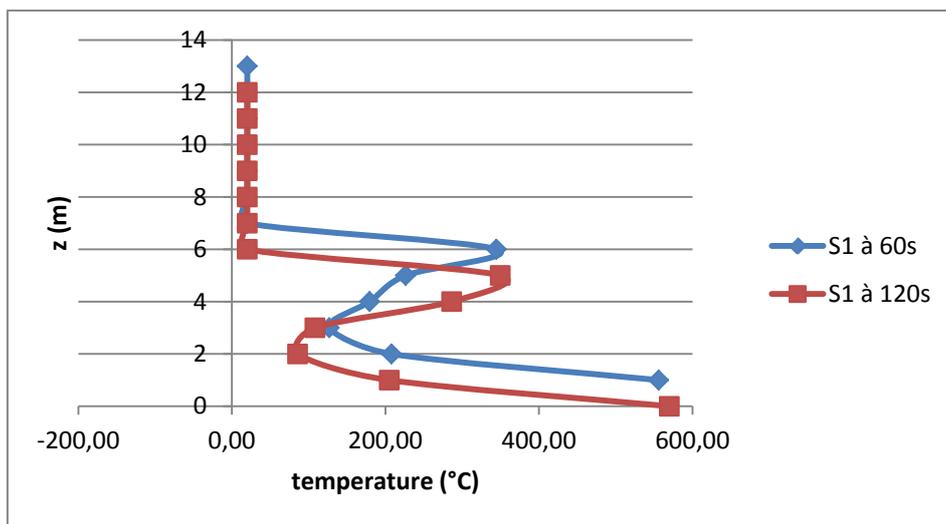


Fig 5.11: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S1

Les résultats des enregistrements des points de mesure de la figure 5.11 le long de la hauteur au centre de la source de chaleur montrent que la température des fumées est à ses valeurs maximales pour les deux temps au niveau du sol puis elle diminue jusqu'à la hauteur de 3m où se forme un front de retour causé par la première turbine, ensuite elle augmente à nouveau jusqu'à une valeur de 380°C près du plafond. La courbe de température montre pour ce cas que la fumée, même après 120s, n'a pas atteint le coté gauche du niveau supérieur.

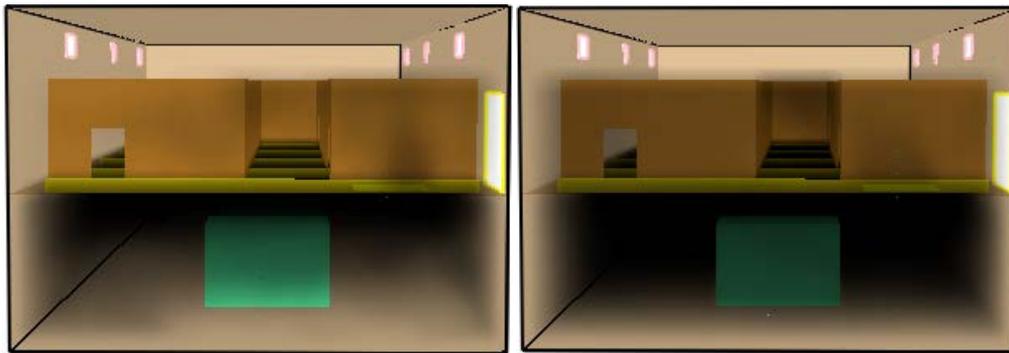


Fig 5.12 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t=120s$ pour S1

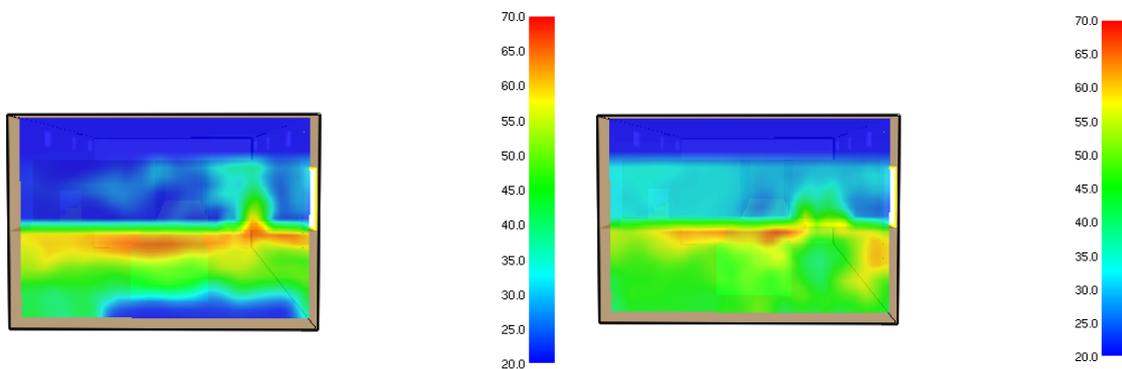


Fig 5.13 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t=120s$ pour S1

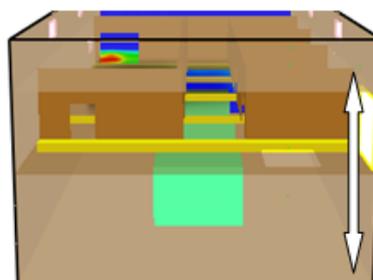


Fig 5.14 : les points de mesure le long de la hauteur devant la porte

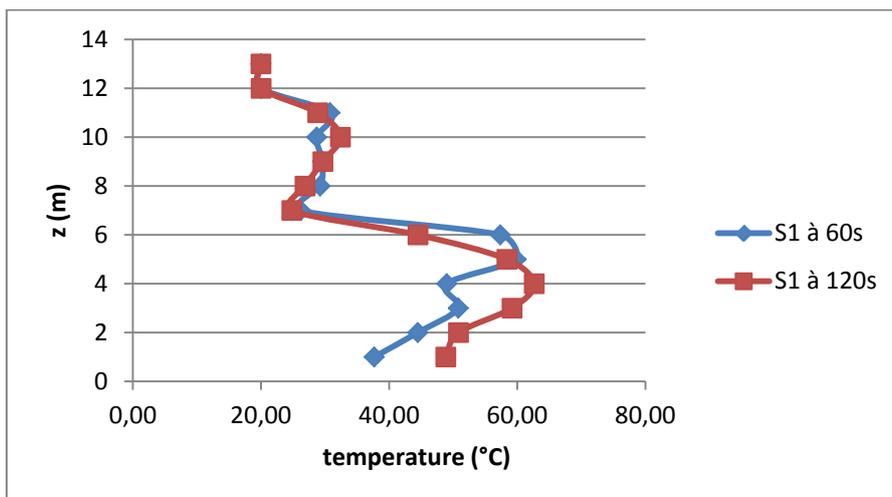


Fig 5.15 : Distribution de la température près de la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S1

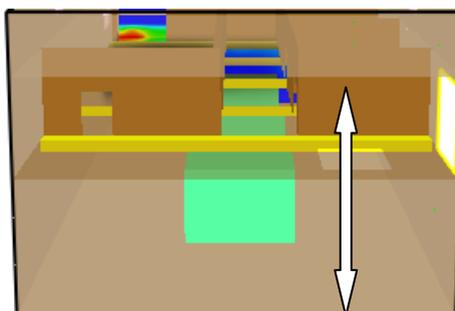


Fig5.16 : les points de mesure le long de la hauteur au milieu des escaliers

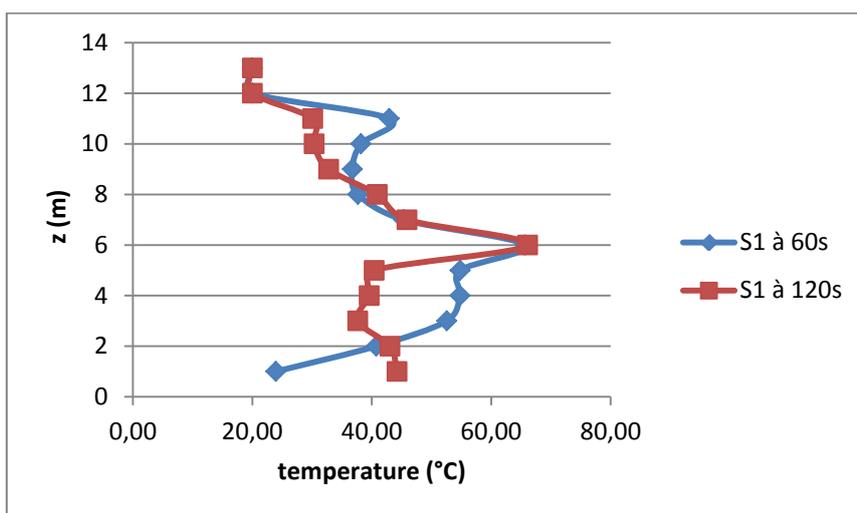


Fig 5.17 : Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à t = 60s et t=120s pour S1

Cet emplacement près de la porte a une grande importance relativement à la sécurité. A $t=60s$, (figure 5.15) les fumées ne se sont pas encore accumulées. Ce qui engendre des niveaux de températures assez basses. Par contre, à $t=120s$, les résultats précédents montrent que la centrale est complètement enfumée. Par la connaissance de la température près de la sortie, on peut juger de la dangerosité de la situation. La diminution de la température à une hauteur de 4m est due à l'air induit causé par la propagation de la fumée vers le côté gauche de la centrale. Les fumées se trouvent diluer par cet air d'où la diminution de la température.

5.1.2. 2^{ème} stratégie :

Dans les figures 5.18 et 5.19, on peut constater que la fumée s'est propagée rapidement vers le niveau supérieur à travers la trémie et a envahi la salle de contrôle avant 60s. A 120s, la fumée s'est propagée dans tout le niveau bas mais sans atteindre le sol donc elle reste stratifiée sous le plafond. La température est maximale dans le deuxième niveau à gauche près de la porte de déchargement.

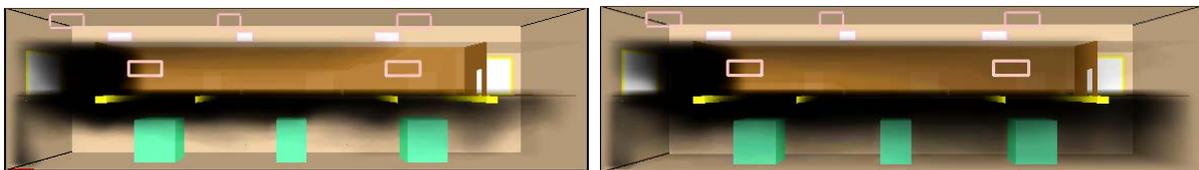


Fig 5.18 propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

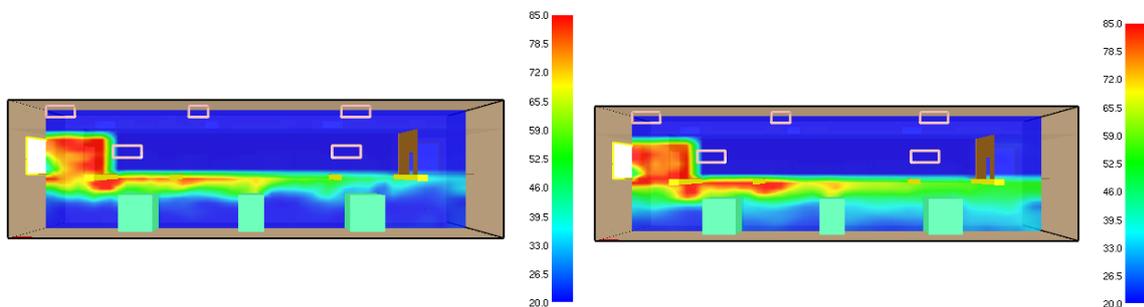


Fig 5.19: distribution de la température à $t=60s$ et $t=120s$ pour S2

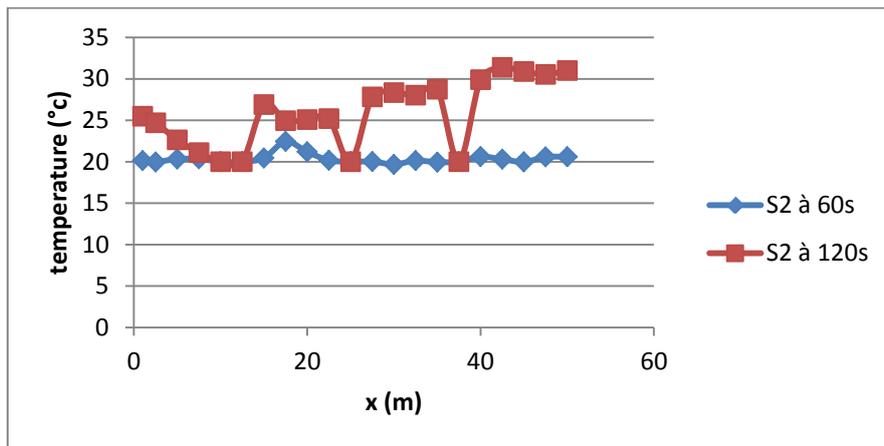


Fig 5.20: distribution de la température à une hauteur 1.5m à t =60s et t =120s pour S2

Le profil de la température des fumées (figure 5.20) varie en zigzag et ceci est dû à la présence des trois turbines qui empêchent les fumées de se propager d’une manière uniforme sur tout le volume de la centrale. Les niveaux de température atteints entre les turbines est d’environ 50°C. Elle est d’environ 80°C dans le hall à gauche près de la porte de déchargement.

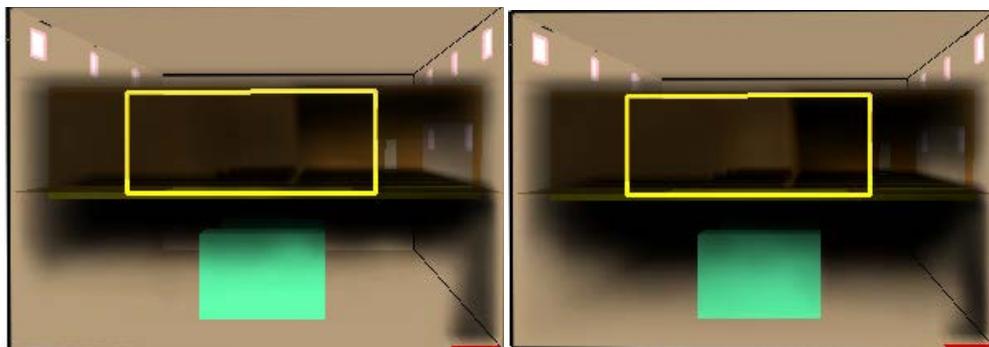


Fig 5.21: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S2

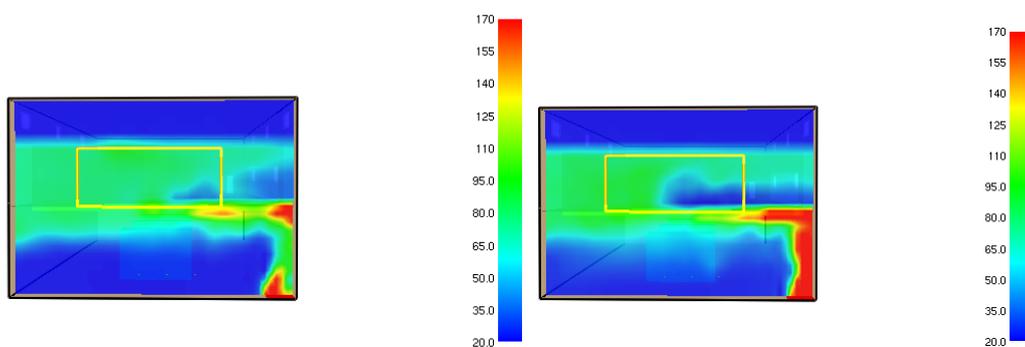


Fig 5.22: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S2

Dans les figures 5.21 et 5.22, on présente l'enfumage et le champ de température des fumées au voisinage de la source de chaleur à deux temps distincts. Ces figures montrent que la température des fumées atteinte dépasse 90°C pour les deux temps au niveau du hall de déchargement.

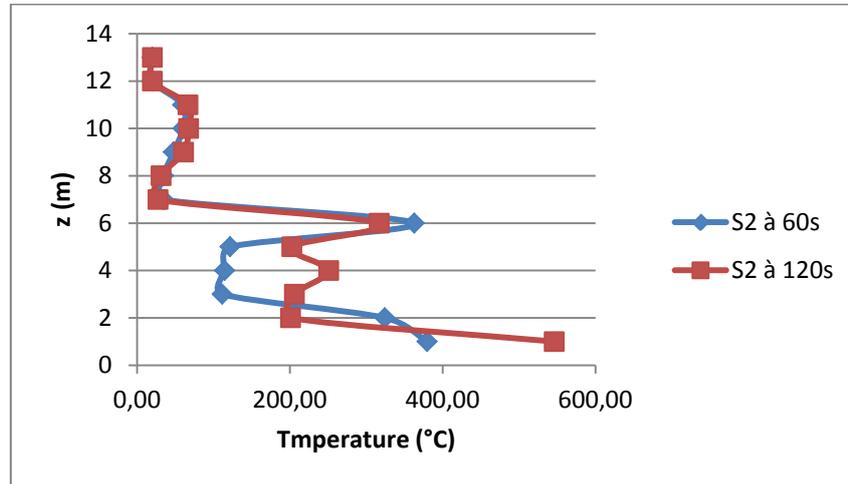


Fig 5.23: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t=60\text{s}$ et $t=120\text{s}$ pour S2

On remarque sur la figure 5.23 une diminution jusqu'à la hauteur de 3m où la température atteint 100°C puis elle augmente à nouveau jusqu'à une valeur de 400°C près du plafond. Dans le deuxième niveau envahi par la fumée après 60s, le profil de température montre pour ce cas que la fumée, même à 60s, a la valeur de 50°C dans le côté gauche du niveau supérieur de la centrale.

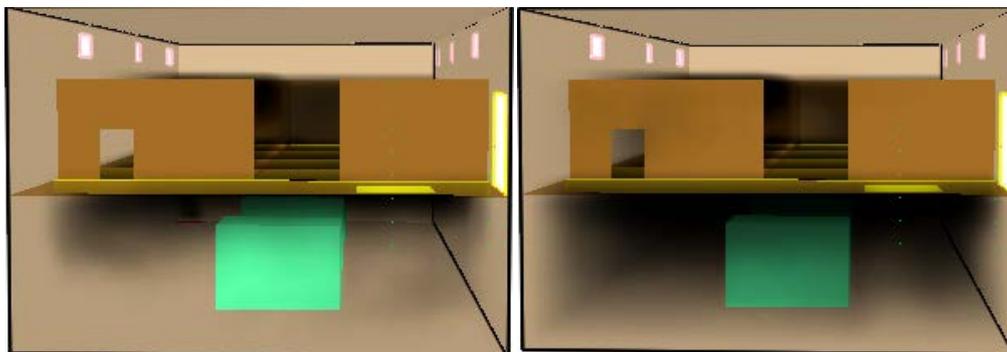


Fig 5.24: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t=60\text{s}$ et $t=120\text{s}$ pour S2

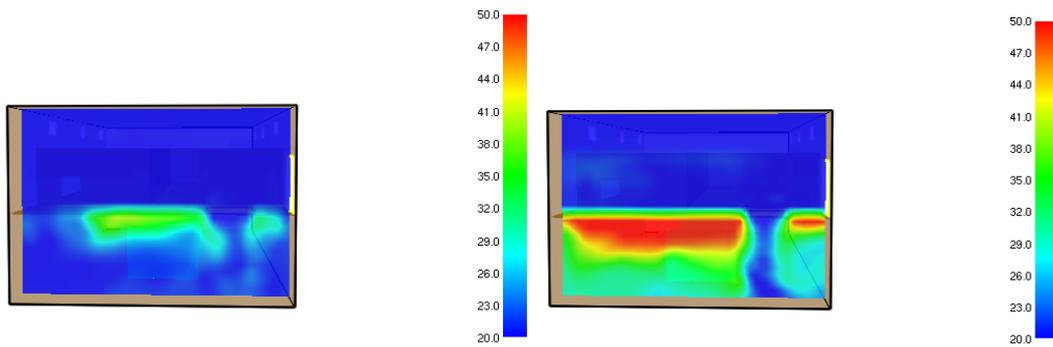


Fig 5.25 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

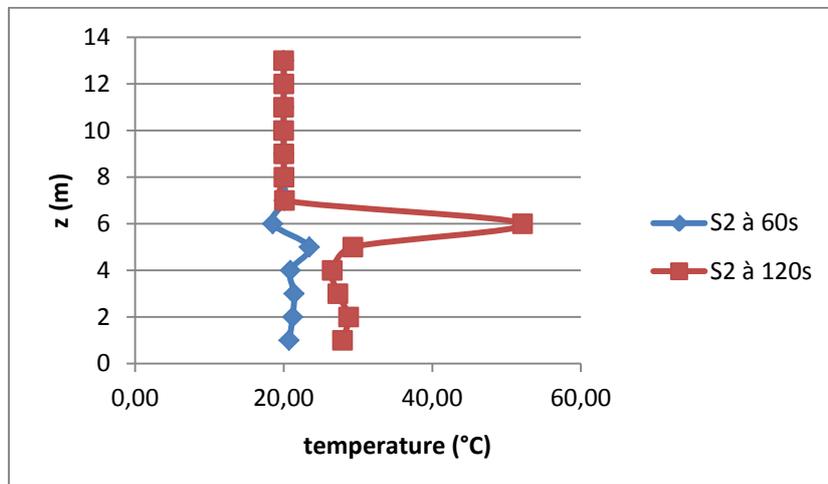


Fig 5.26 : Distribution de la température près de la porte de sortie

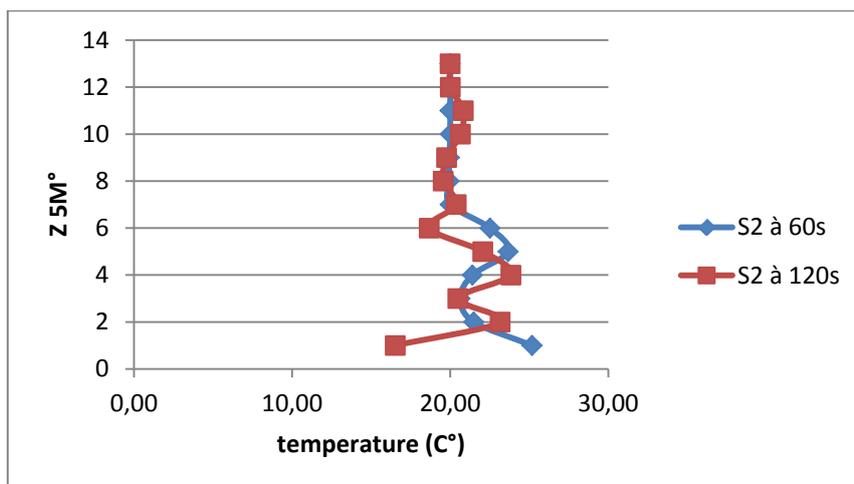


Fig 5.27 : Distribution de la température au milieu des escaliers

Ces dernières configurations (figures. 5.26 et 5.27), montrent une diminution de la température par rapport à la configuration précédente avec des températures moyennes moins élevées. Ce qui permet une évacuation du personnel. Mais d'un autre coté le niveau deux des bureaux et de la salle de contrôle sont envahi par la fumée.

5.1.3. La 3^{ème} stratégie :

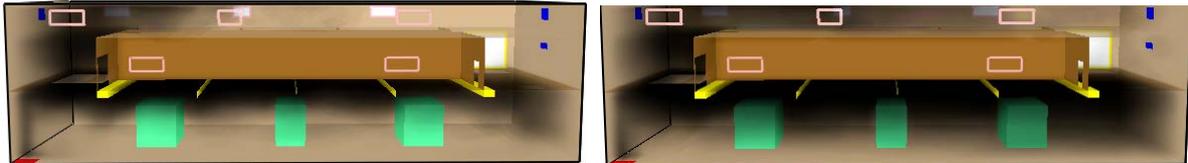


Fig5.28 : propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S3

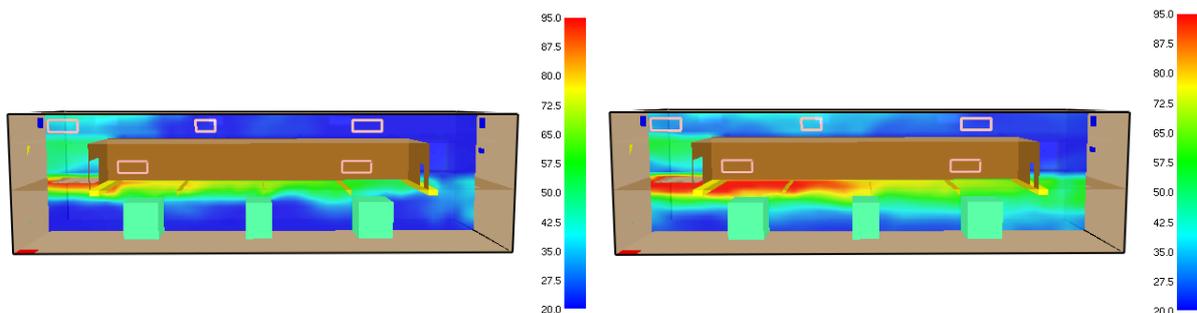


Fig 5.29: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S3

Des figures 5.28 et 5.29, on peut constater que la fumée s'est propagée rapidement vers le niveau supérieur à travers les trémies et passe même au niveau de la voute du faux plafond avant 60s. A 120s, la fumée a envahi tout le niveau bas mais sans atteindre le sol donc elle reste stratifiée sous le plafond. A cause de l'extraction, l'air est induit par la porte d'entrée, circule le long de la centrale pour en ressortir par la porte de déchargement. De ce fait, le niveau deux du côté de la porte est resté sans fumée donc une zone de secours.

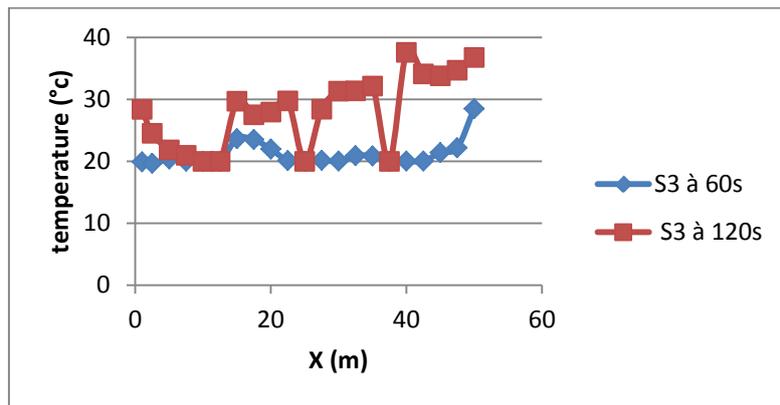


Fig 5.30: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol à t=60s et t=120s pour S3

On remarque que le profil de température, (figure 5.30) a nettement diminué par rapport au profil de la 1^{ère} stratégie, la température moyenne a chuté jusqu'à 35°C. Le profil de température à 120s a une allure semblable à celle précédemment présentée pour les autres stratégies due à la présence des turbines.

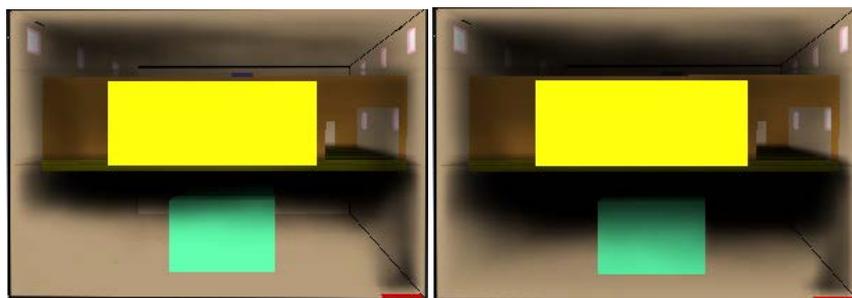


Fig 5.31 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S3

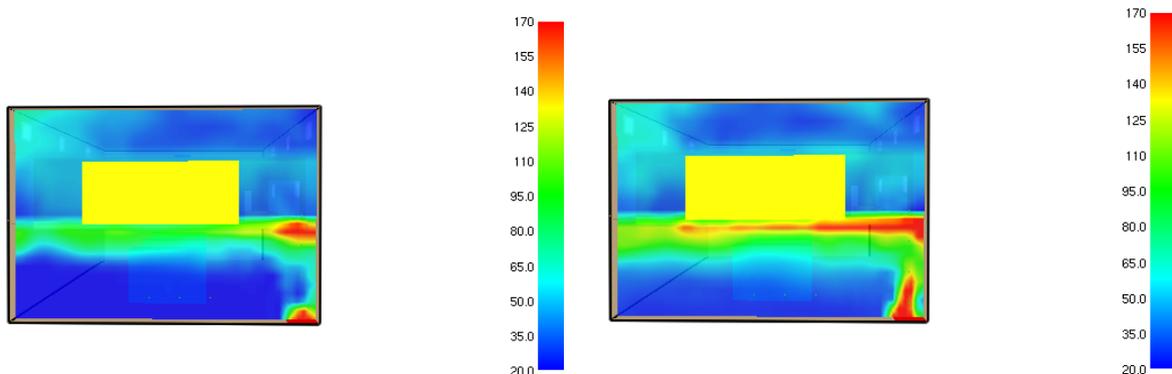


Fig 5.32 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S3

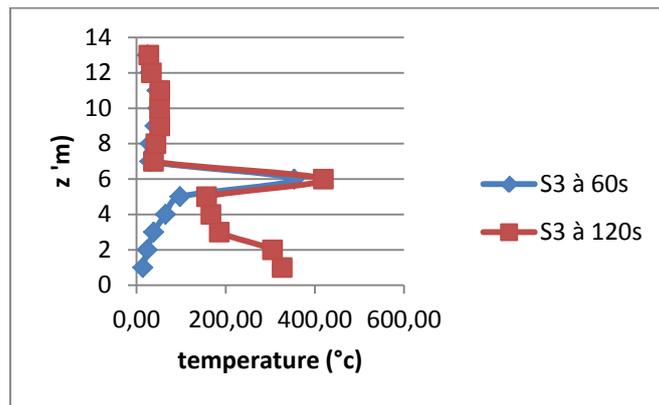


Fig5.33 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S3

sur la figure 5.33, on peut remarquer que les températures aux points de mesure le long de la hauteur près de la source de chaleur au temps 60s diminuent considérablement due au fait que la fumée est directement aspirée par les trémies puis extraites par les extracteurs au voisinage du foyer.

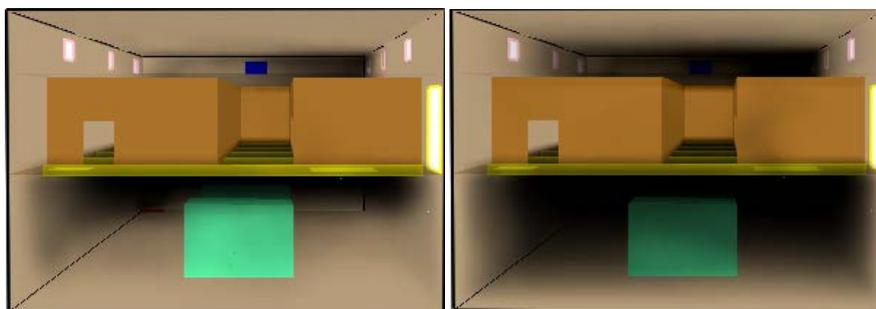


Fig 5.34: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S3

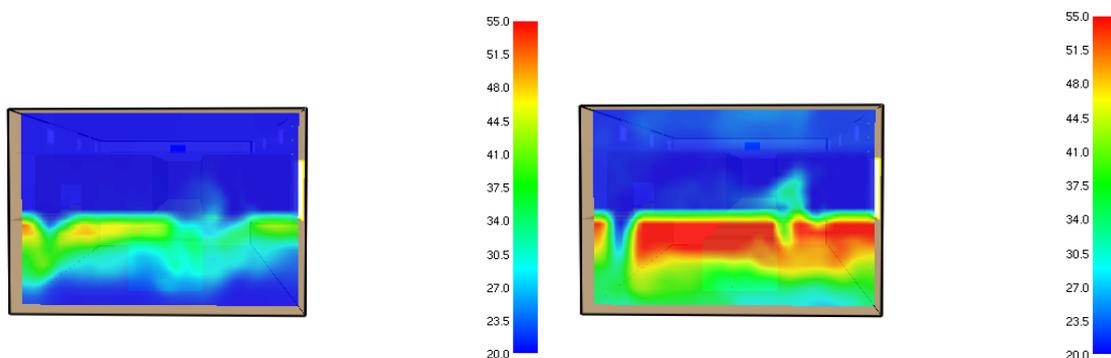


Fig 5.35: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t = 60s et t = 120s pour S3

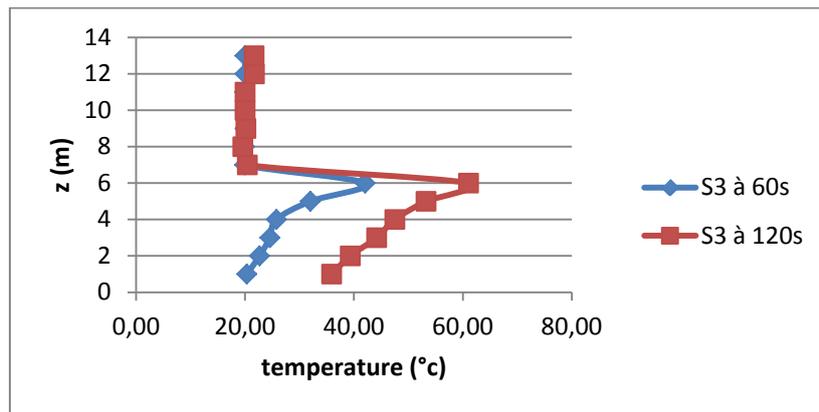


Fig 5.36: Distribution de la température près de la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S3

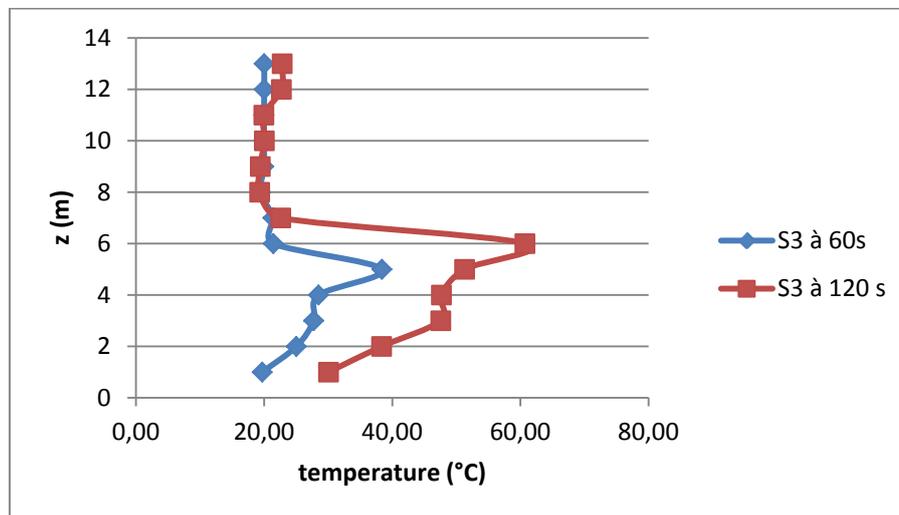


Fig5.37 : Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à t = 60s et t = 120s pour S3

On remarque toujours une diminution de la température dans ce cas aussi bien près de la porte qu'aux escaliers, (figures 5.36 et 5.37). Bien que cette stratégie conduise à des températures moindres et des zones moins enfumées, elle reste moyennement moins sécurisante.

5.1.4. La 4^{ème} stratégie :

La simulation montre que la fumée reste coller sous le plafond et ne descende pas rapidement. Elle ne s'échappe pas par les entrées (trémie d'escalier). Ainsi le deuxième niveau reste a l'abris des fumées et donc aide l'évacuation du personnel.

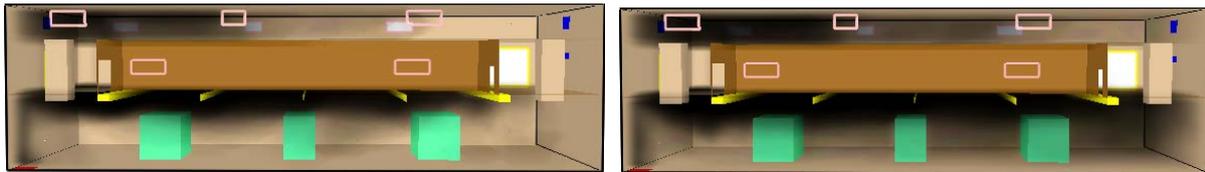


Fig 5.38 propagation de la fumée à t = 90s et t = 120s pour S4

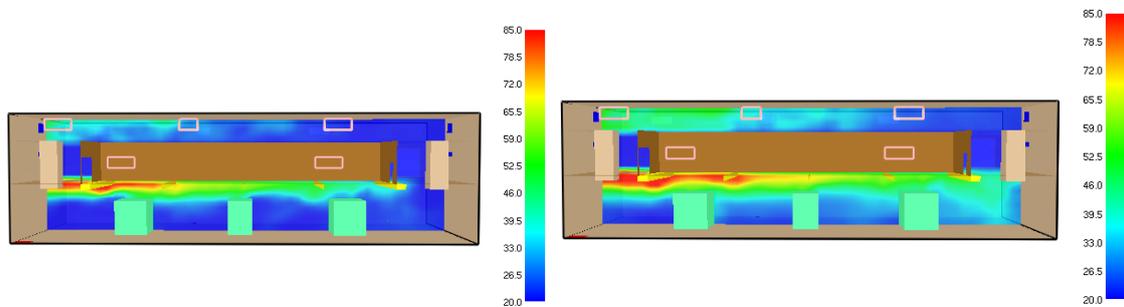


Fig 5.39: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S4

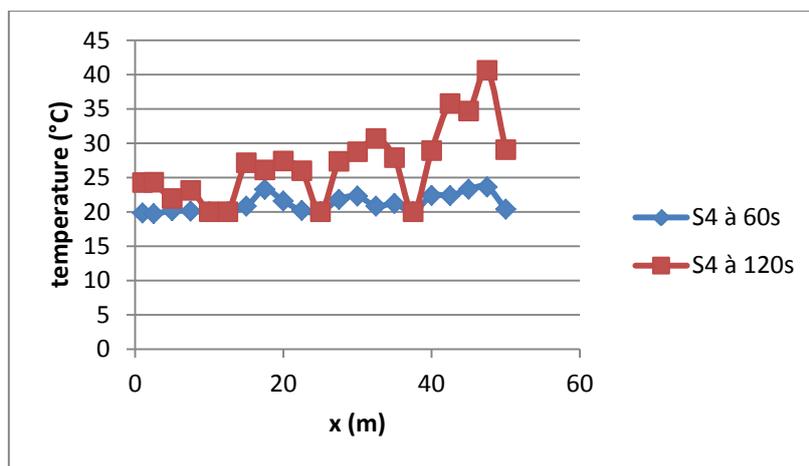


Fig 5.40: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur à t =60s et t=120s pour S4

Des figures (5.39) et (5.40), on peut remarquer que les températures à la hauteur 1.5 m au niveau du sol ne dépassent pas les 40°C donc une bonne stratégie à envisager en cas d'incendie, tout en gardant le 2^{ème} niveau loin des fumées.

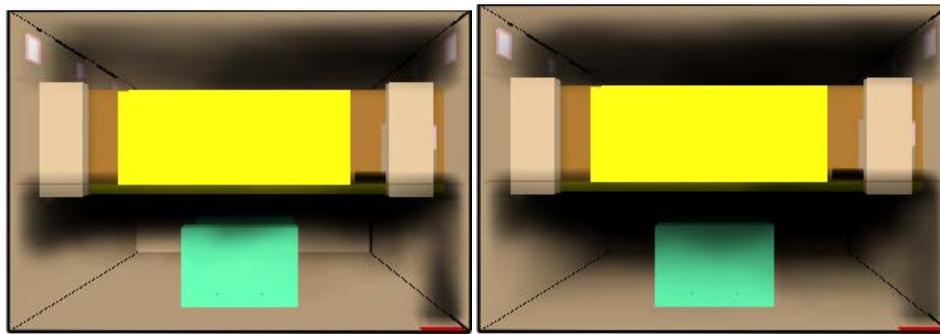


Fig 5.41: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t=60s et t=120s pour S4

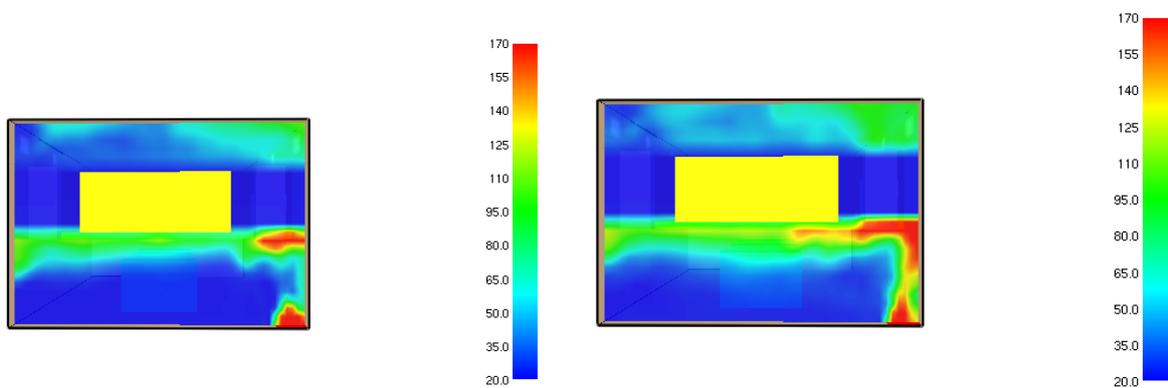


Fig 5.42: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t=60s et t=120s pour S4

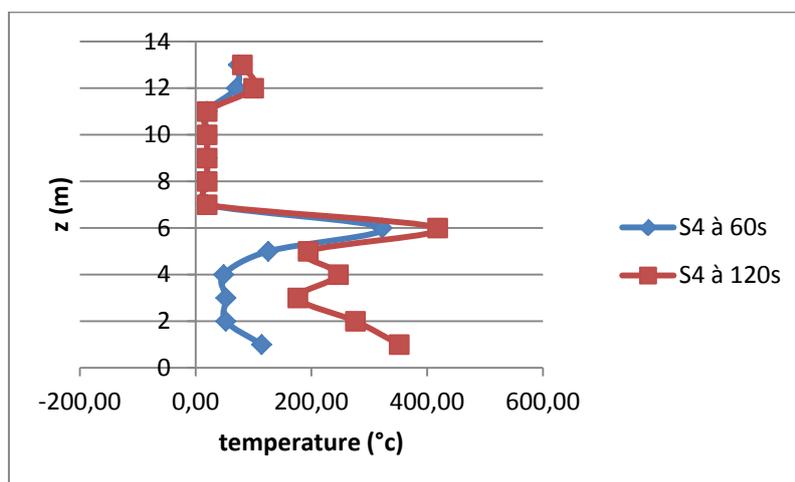


Fig 5.43 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t=60s et t=120s pour S4

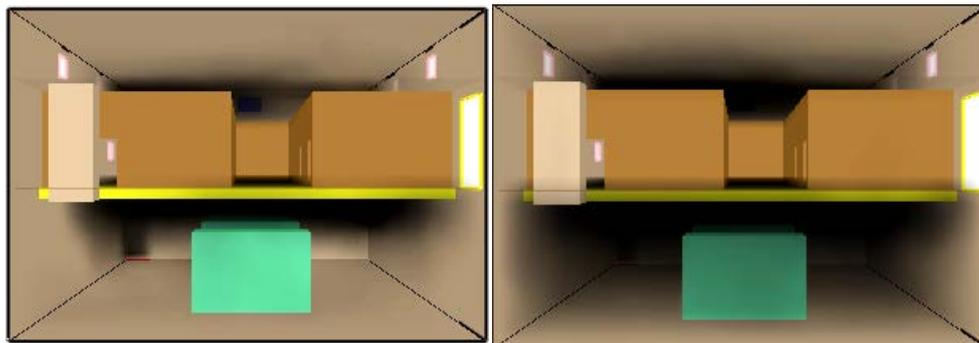


Fig 5.44 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour s4

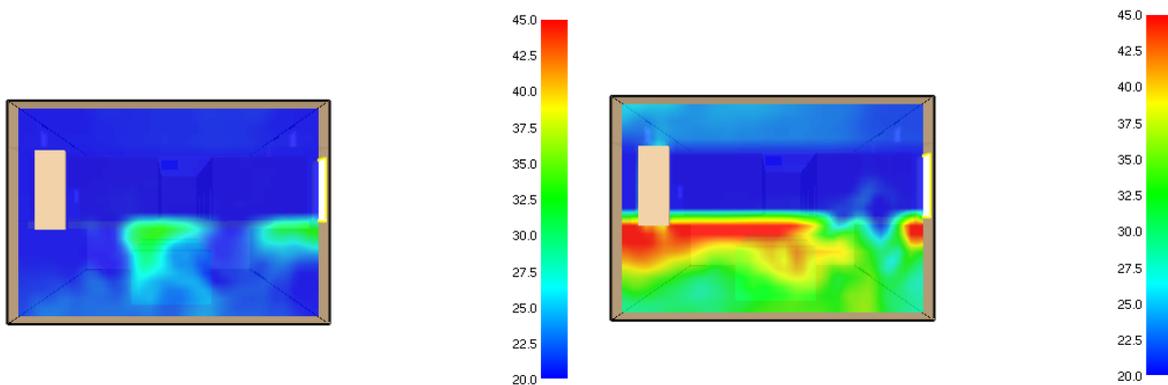


Fig5.45 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t =60s et t =120s pour S4

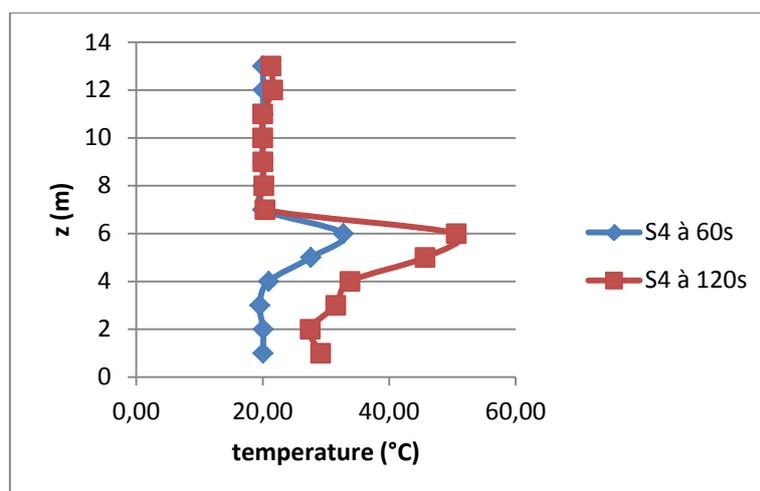


Fig 5.46: Distribution de la température près de la porte de sortie à t =60s et t =120s pour S4

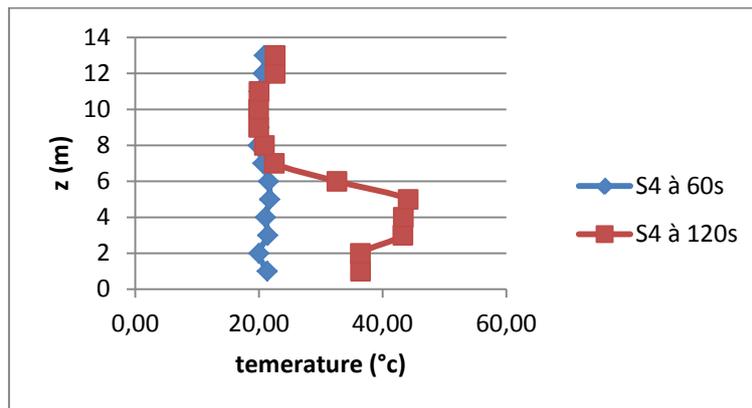


Fig 5.47: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à t=60s et t=120s pour S4

Les résultats de cette dernière configuration montrent une diminution de la température par rapport à la configuration précédente avec des températures moyennes moins élevées, ce qui permet une évacuation du personnel. La diminution de la température devant la porte est due à l'entrée d'air frais, mais l'avantage de cette stratégie est que le niveau deux des bureaux et de la salle de contrôle restent non enfumés. L'utilisation des évacuateurs et des extracteurs permet un désenfumage plus efficace d'où une évacuation avec moins de risques.

Des résultats obtenus précédemment on peut comparer les profils de température pour les 4 stratégies proposées au temps t= 60s et t= 120 s sur toute la longueur du la centrale.

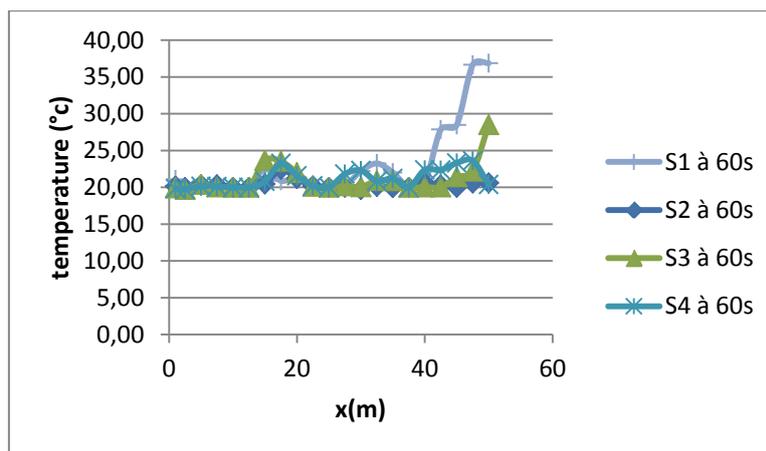


Fig 5.48: Distribution de la température à une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à t = 60s

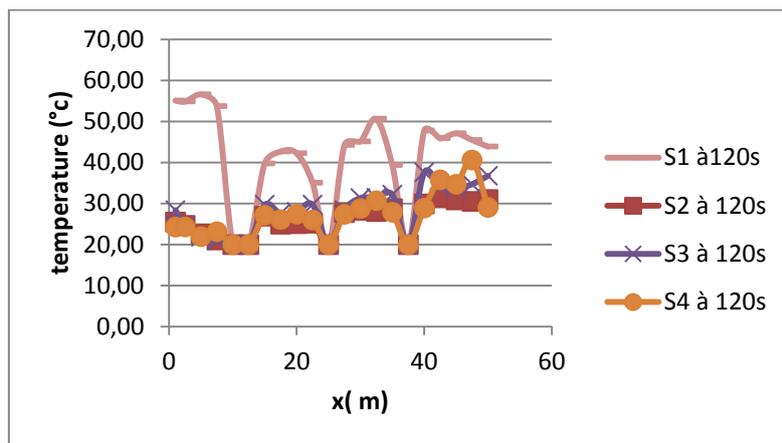


Fig 5.49: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à t=120s

Les figures (5.48) et (5.49) qui représentent la distribution des températures dans la centrale on peut voir que la deuxième stratégie avec tous les accès ouverts est favorable mais reste l'inconvénient de la fumée qui se propage rapidement dans la salle de contrôle au deuxième niveau ce qui ne sécurise pas les personnes se trouvant à l'intérieur

On conclut de ces résultats que la stratégie qui donne le plus d'avantage et celle qui utilise es évacuateurs, elle permet le désenfumage du niveau inferieur plus rapidement tout en gardant le niveau supérieur, celui des bureaux et salle de contrôle en sécurité, On remarque que la fumée atteint les voies de secours sert mais dans des temps plus long se qui permet une évacuation plus facile

5.2. Analyse des résultats du scénario Deux : feu près du mur :

5.2.1. La 1^{ère} stratégie :

Les figures 5.50 et 5.51 représentent l'enfumage de la centrale pour un feu auprès du mur. On peut remarquer que la fumée se propage et atteint le 2^{ème} niveau après 60s, puis toute la centrale à 120s. due à la stratification de la fumée en dessous du plafond la température est maximale dans ces zones là puis commence à diminuer en se rapprochant du sol.

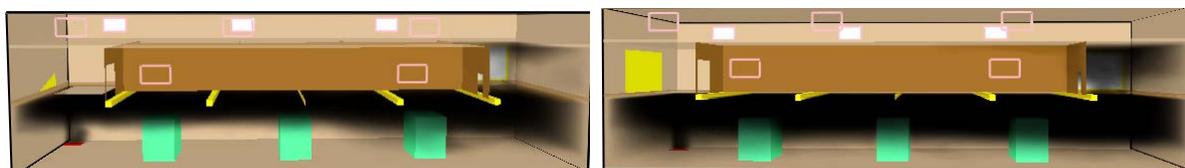


Fig. 5.50 propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S1

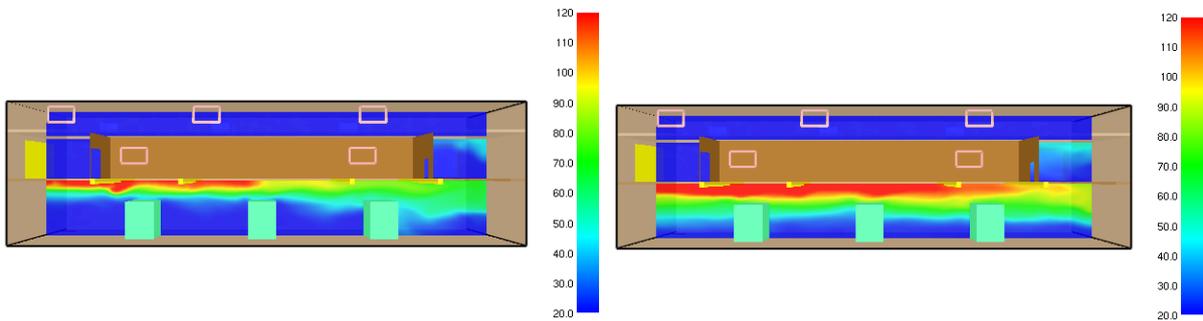


Fig. 5.51: distribution de la température à t=60s et t=120s pour S1

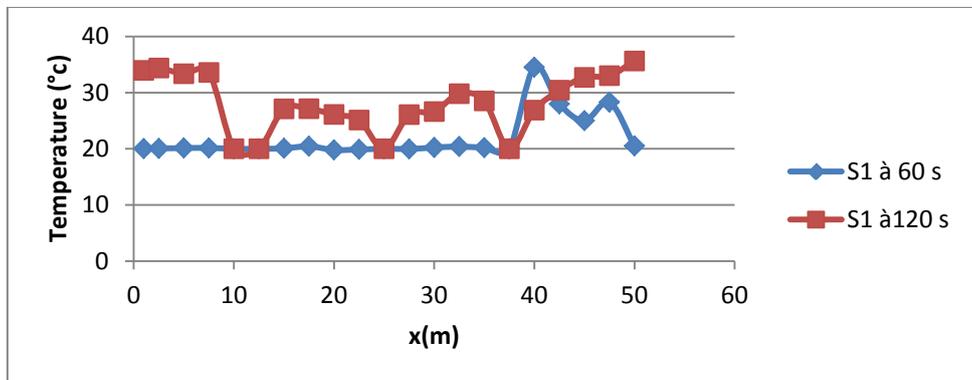


Fig. 5.52 : distribution de la température à une hauteur 1.5 m à t = 60s et t=120s pour S1

le profil de température à t= 60s ne varie pas. Il est égal à la température ambiante mais après 30m on remarque une augmentation due au confinement de la fumée près de la sortie. A t= 120 s la température subit des variations dues à la présence des turbines.

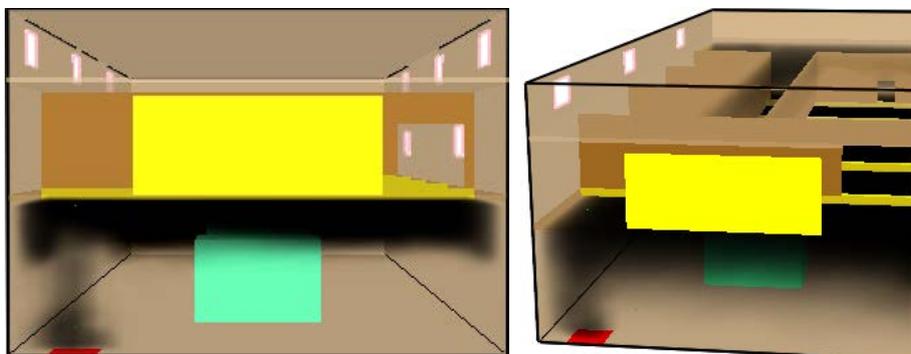


Fig. 5.53 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S1

La visualisation des figures 5.53 montre la propagation rapide de la fumée à $t= 60s$ elle atteint le couloir du 2^{ème} niveau, et après 120s elle envahit la salle de contrôle et les bureaux. La distribution de la température (figure 5.54) nous permet de voir la propagation de la fumée suivant la hauteur Z de la centrale, d'abord la fumée se stratifie sous le plafond puis commence à redescendre après 60s à $Z= 1m$ près de l'entrée et après 120s sur tout le niveau inférieur. La figure 5.55, présente le confinement des températures très élevées près de la source de chaleur à $z= 5m$.

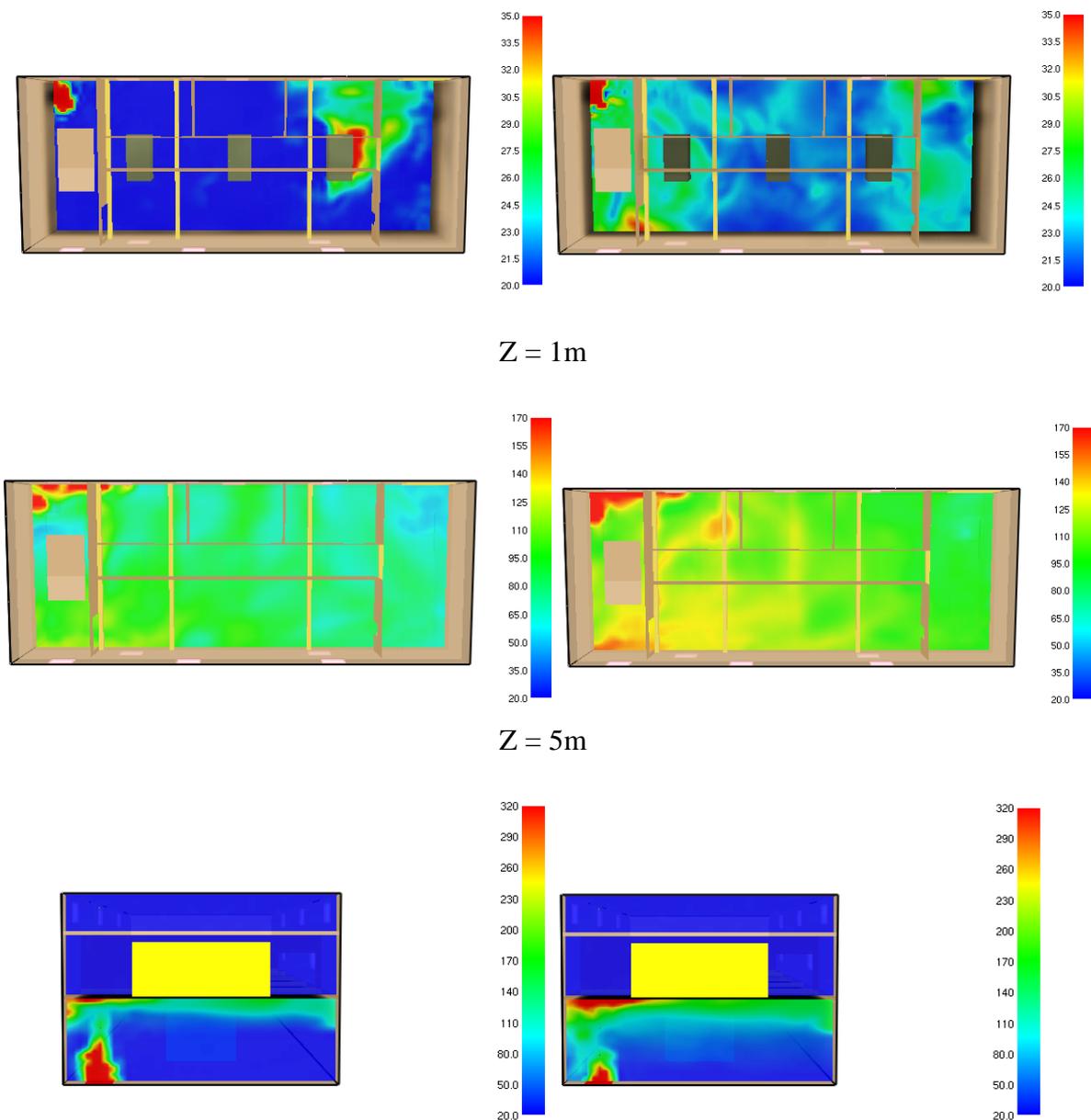


Fig. 5.54: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu

à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

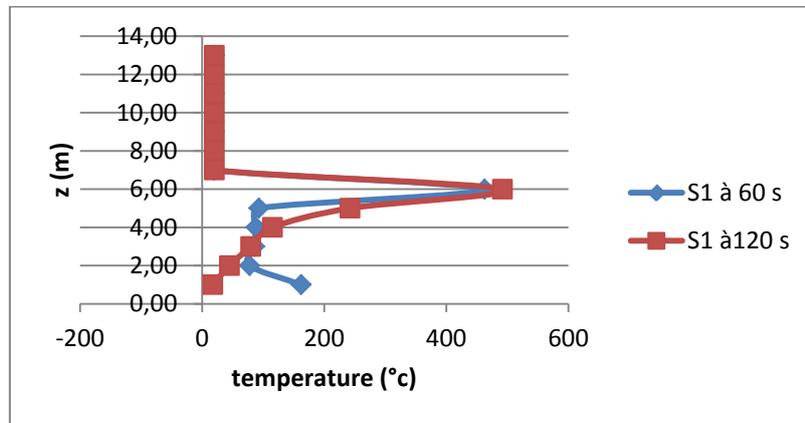


Fig. 5 .55: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

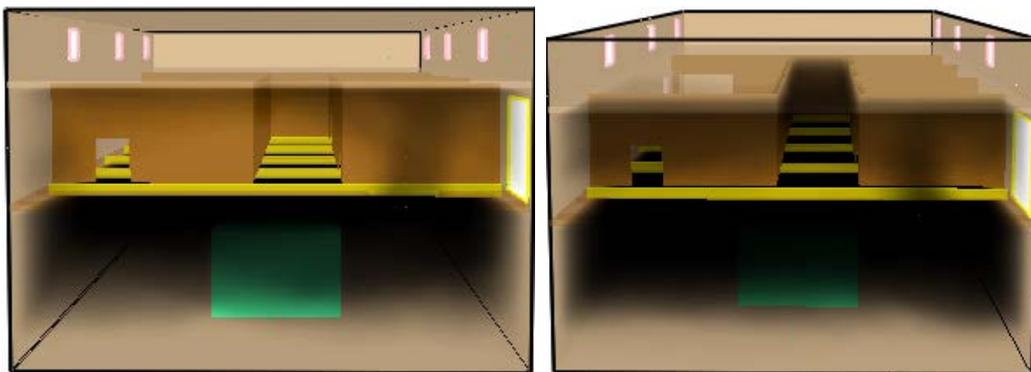


Fig 5.56 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

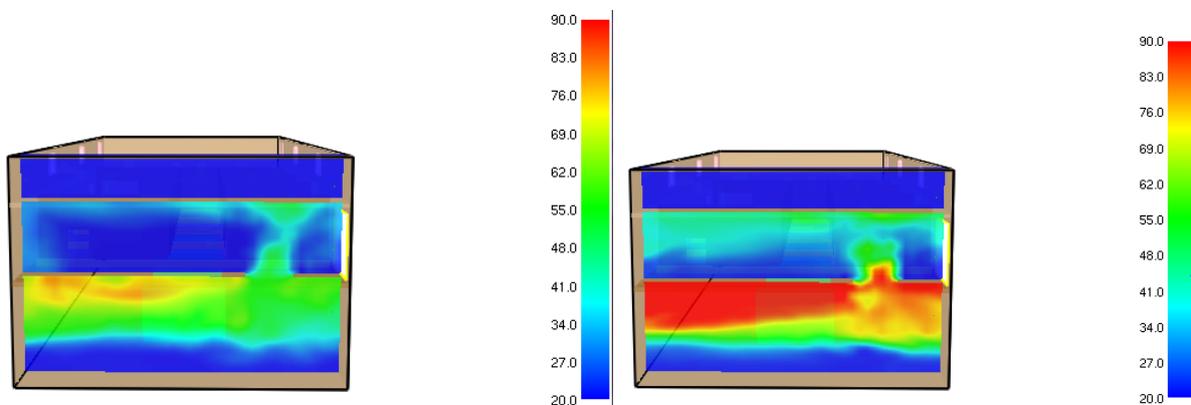


Fig 5.57 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

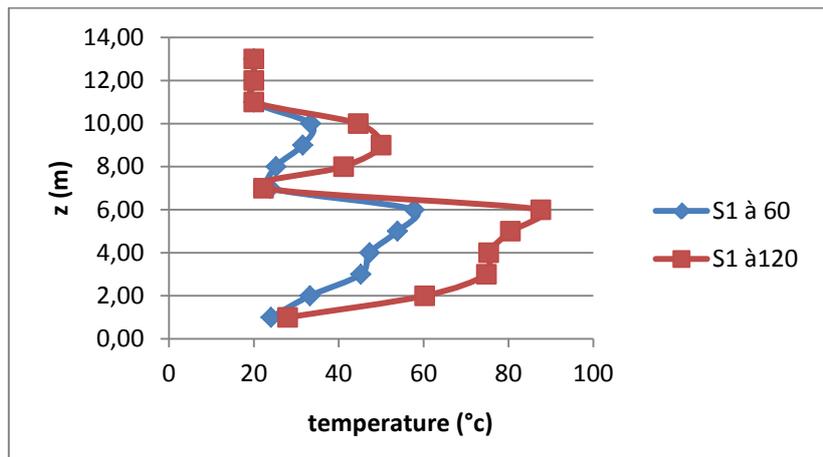


Fig 5.58 : Distribution de la température près de la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S1

Les figures (5.56), (5.57) et 5.58 représentent la propagation des fumées et la distribution de la températures près de la porte. Après 60s la sortie est bloquée complètement par la fumée à de grande température, résultant du confinement complet de la centrale et la stratification des fumées, les escaliers sont condamnées et empêchent l'évacuation des personnes.

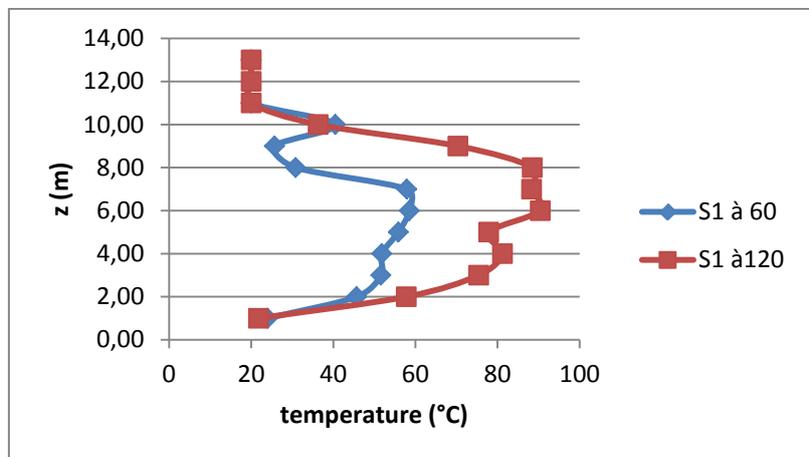


Fig 5.59: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à t = 60s et t=120s pour S1

On conclut que ce cas représente un confinement d'une centrale où les possibilités d'évacuation sont presque impossible si on présume que des personnes sont bloqué au niveau inférieur, et pareil pour ceux au niveau des salles. On admet que 2 minutes est un temps très cours pour l'évacuation des personnes vu les surfaces de l'installation.

5.2.2. La 2^{ème} stratégie :

Dans cette stratégie (figure 5.60 et 5.61) une évacuation des personnes par les escaliers est possible dans les instants qui suivent le déclenchement du feu. Mais après 60 s le deuxième niveau sera envahi par la fumée qui traverse la trémie vers le niveau supérieur rapidement dont la salle de contrôle et le couloir à des températures assez élevées.

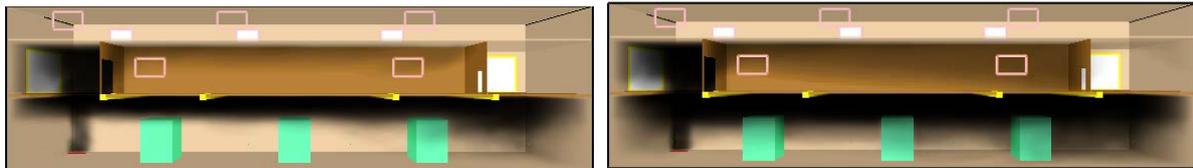


Fig 5.60 propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S2

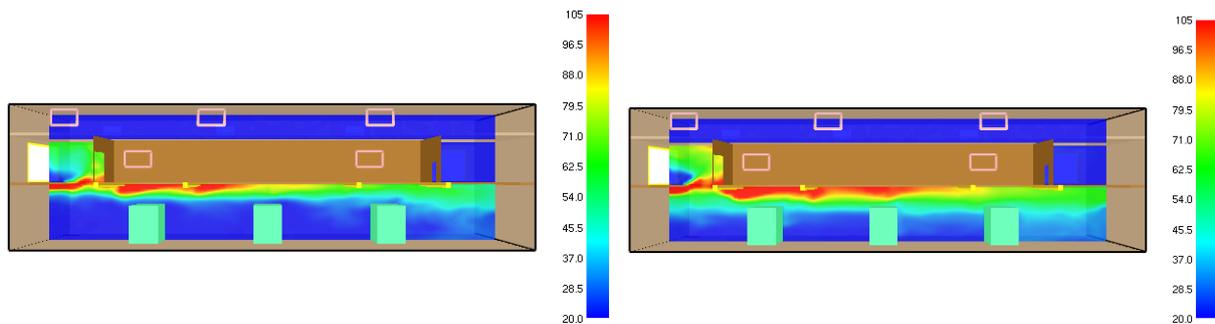


Fig 5.61: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S2

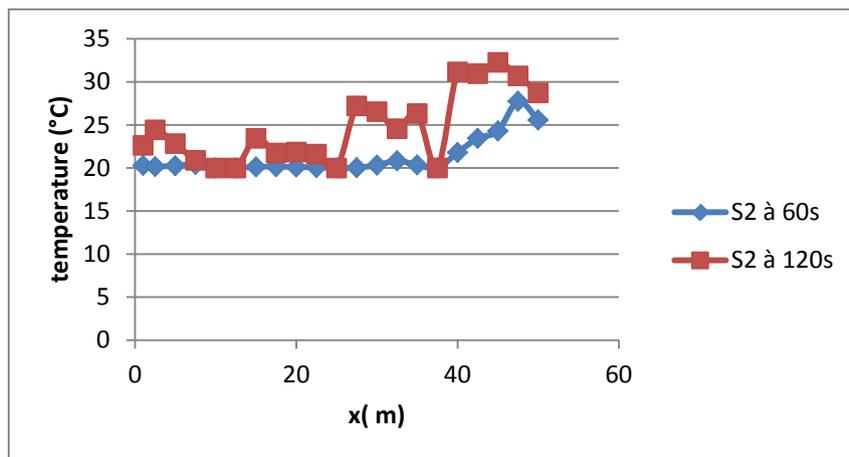


Fig 5.62: distribution de la température à une hauteur 1.5m à t =60s et t =120s pour S2

Le profile de température (figure 5.62) ne varie pas à $t= 60s$ et reste à une température ambiante mais à $t=120s$, le profile varie et atteint des températures élevées à la sortie de la centrale.

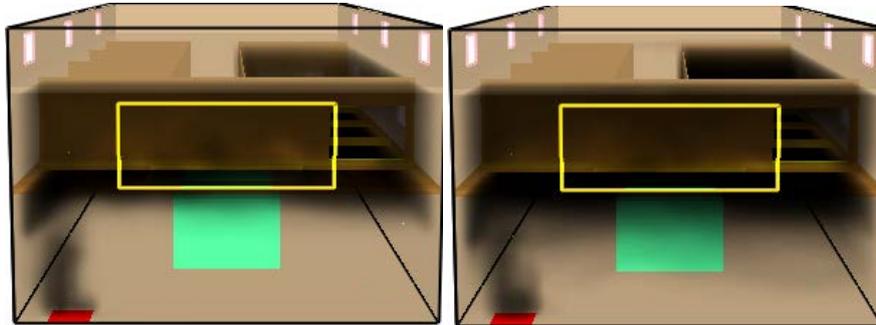


Fig 5.63: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

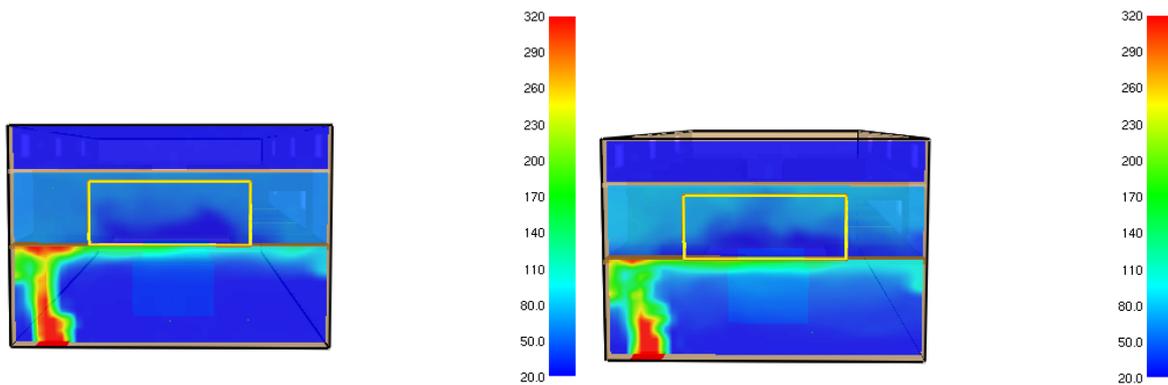


Fig 5.64: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t= 120s$ pour S2

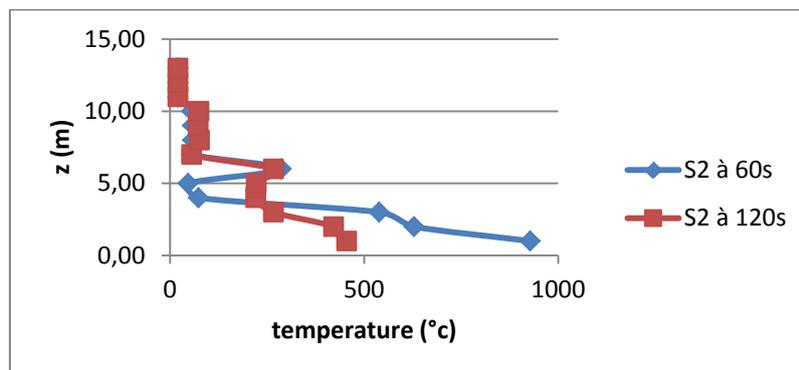


Fig 5.65: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t =60s$ et $t=120s$ pour S2

L'enfumage de la centrale et le champ de température près de la source de chaleur sont présentés dans les figures 5.64 et 5.65, avec la traversé de la trémie gauche par la fumée qui conduit à une augmentation de la température jusqu' à 200°C dans le niveau supérieur de la centrale. À $t = 60$ s la température était à 980°C au niveau inférieur et diminue pour atteindre 100°C à une hauteur de 5m au dessus du sol. A $t = 120$ s, la température est à 500°C et diminue jusqu'à 250 °c après avoir atteint une hauteur de 4m.

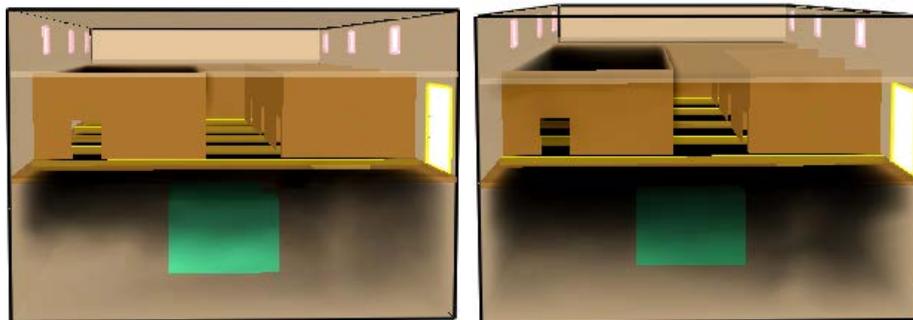


Fig 5.66: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60$ s et $t = 120$ s pour S2

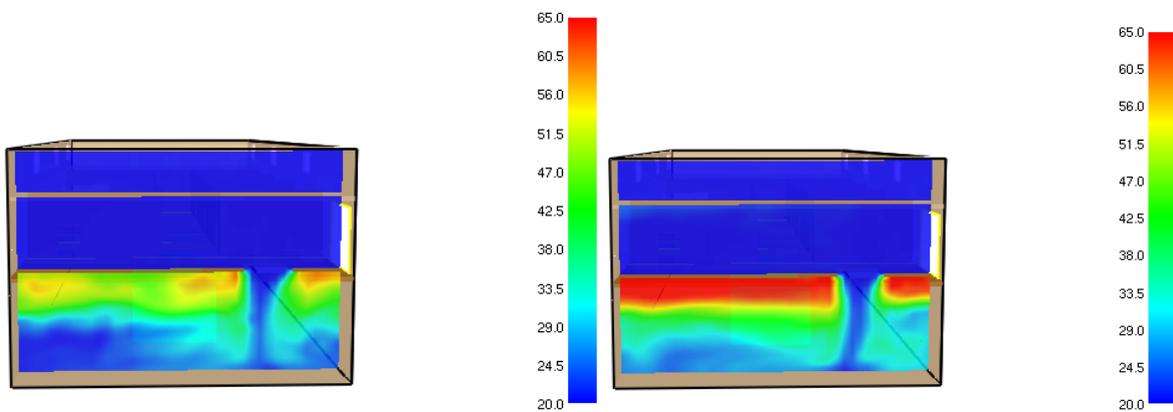


Fig 5.67 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60$ s et $t = 120$ s pour S2

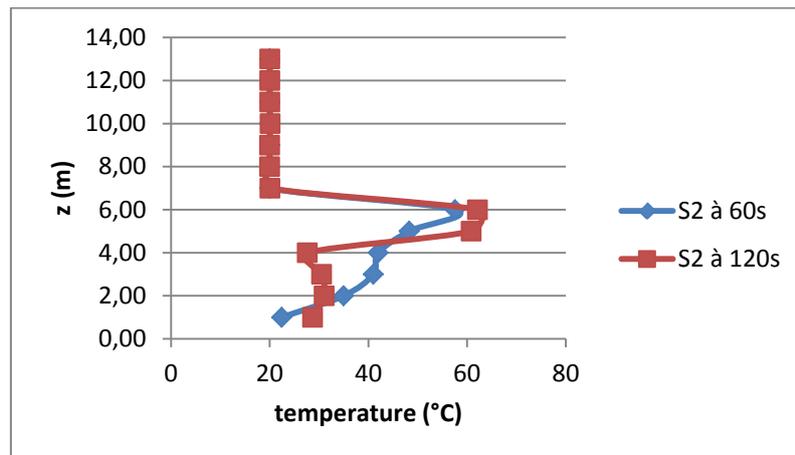


Fig 5.68 : Distribution de la température près de la porte de sortie

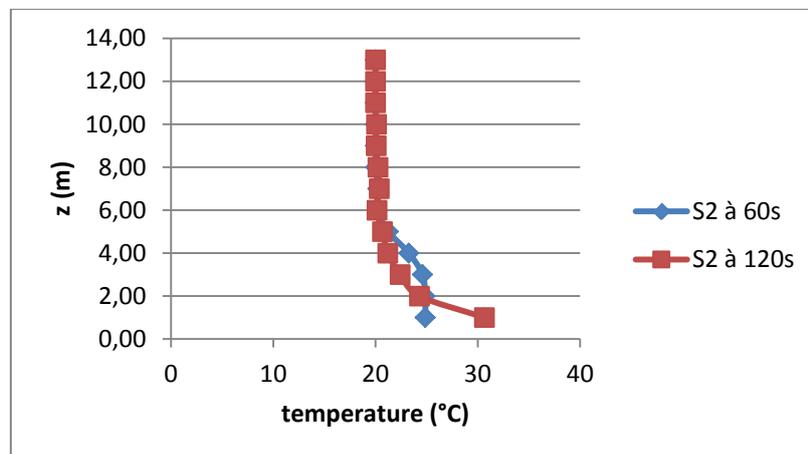


Fig 5.69 : Distribution de la température au milieu des escaliers

On constate une diminution de la température visuellement dans les dernières figures 5.67, 5.68 et 5.69 par rapport à la stratégie précédente, à cause des ouvertures et la stratification de la fumée sous le plafond, permettant une évacuation du personnel dans un temps assez court avant que la fumée ne se propage au niveau supérieur, les escaliers et ensuite toute la centrale.

5.2.3. La 3^{ème} stratégie :

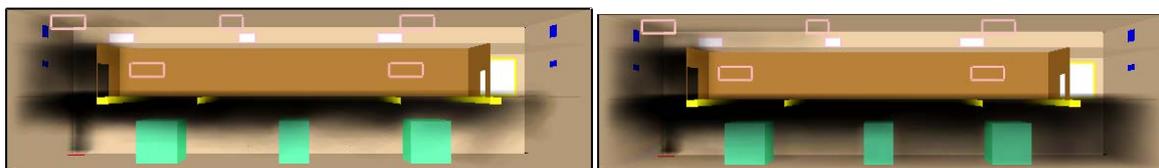


Fig5.70 : propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S3

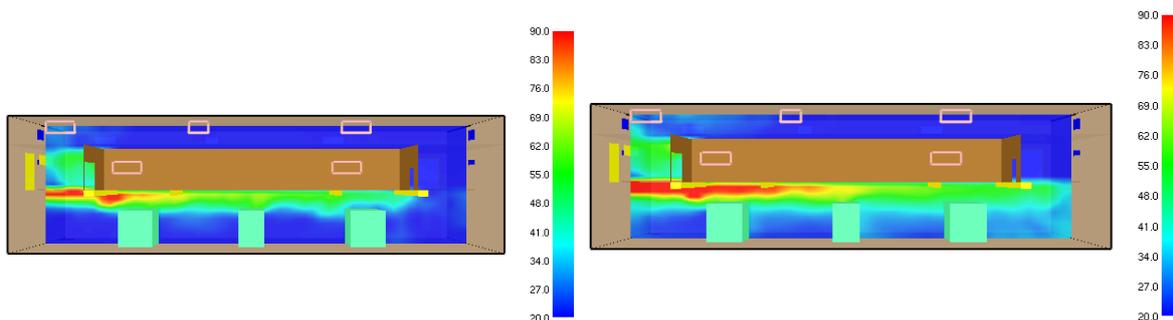


Fig 5.71: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S3

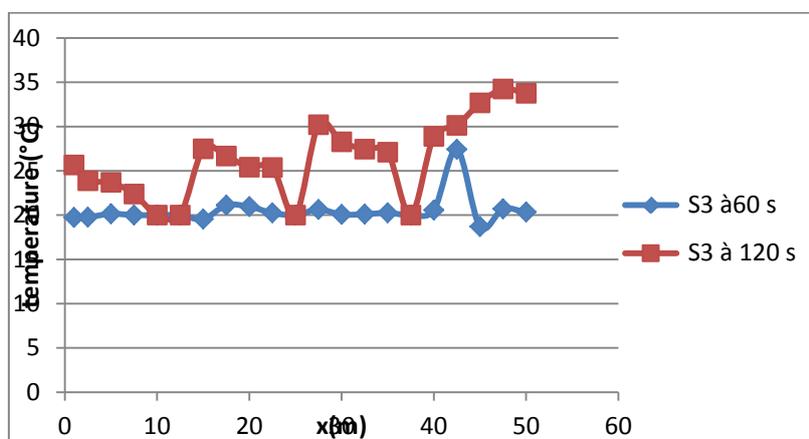


Fig 5.72: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol à t =60s et t =120s pour S3

On remarque sur les figures 5.71 et 5.72 une diminution de température d'environ 100°C par rapport à la 1^{ère} stratégie. Après envahissement par la fumée du 2^{ème} niveau de la centrale par les trémies sur les deux cotés et malgré l'extraction qui se fait, la fumée se propage dans la centrale après 120s.

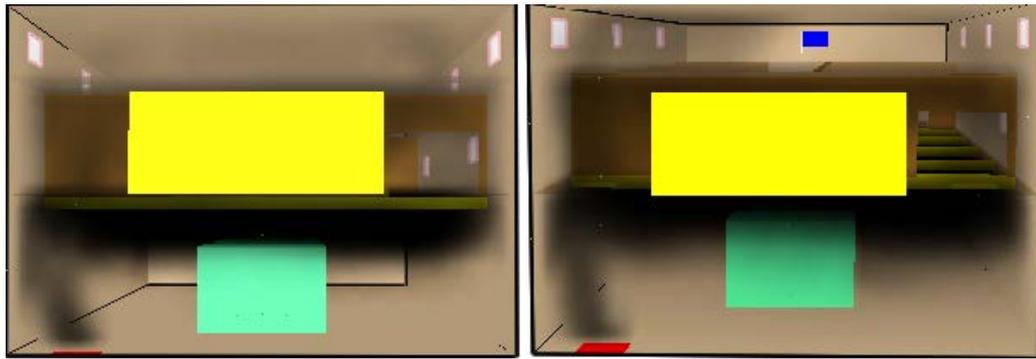


Fig 5.73 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S3

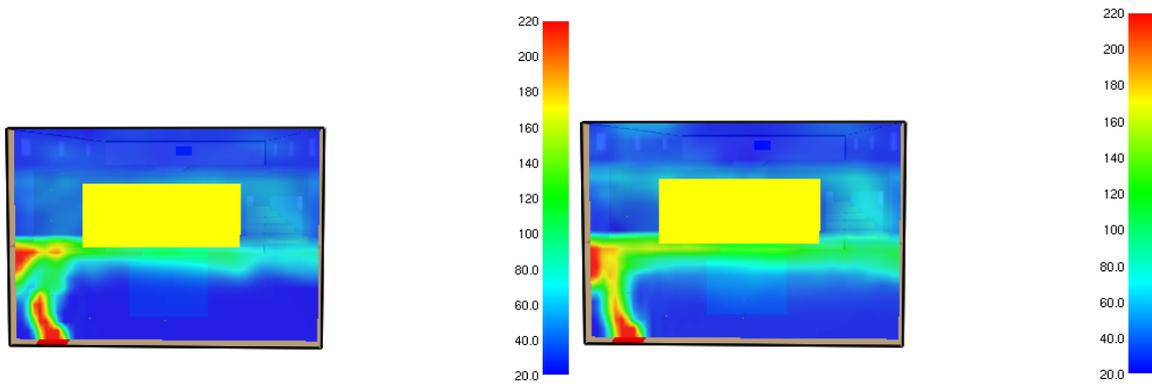


Fig 5.74: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S3

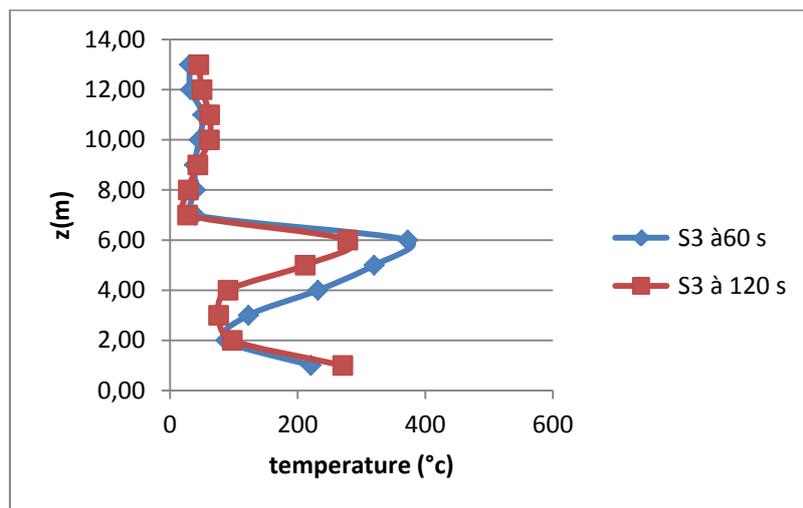


Fig5.75 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S3

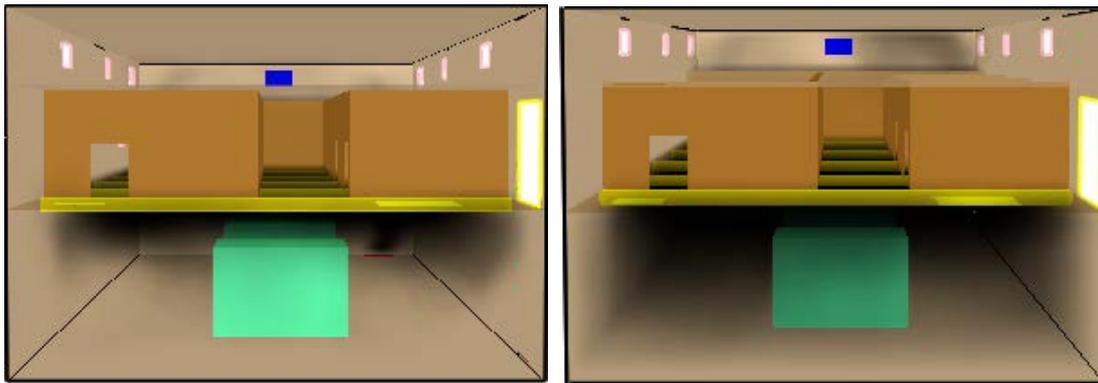


Fig 5.76: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S3

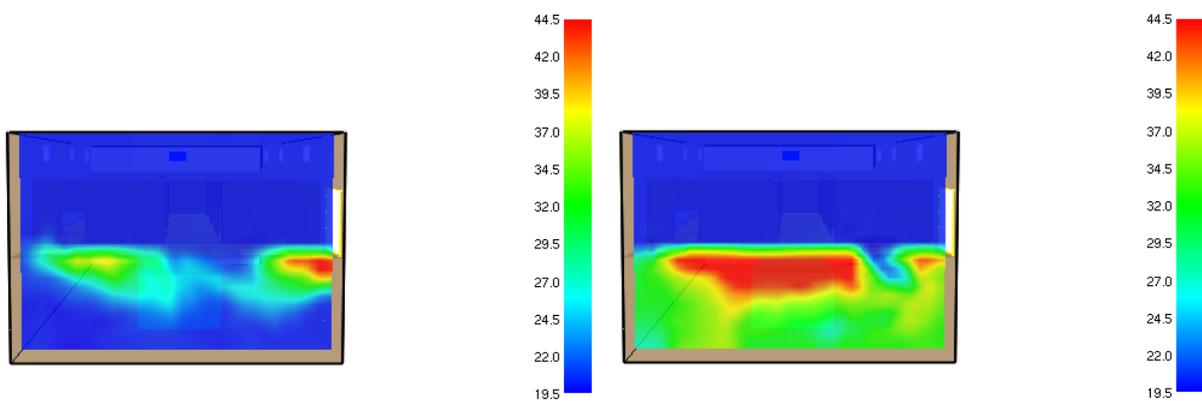


Fig 5.77: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t = 60s et t = 120s pour S3

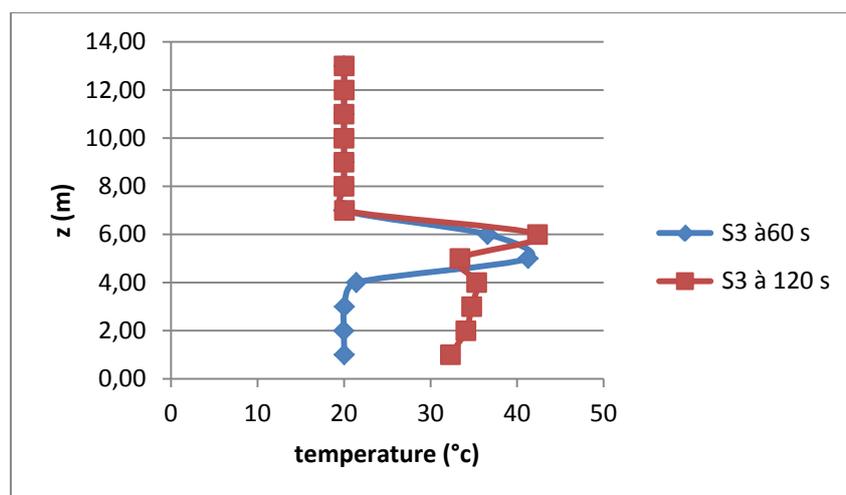


Fig 5.78: Distribution de la température près de la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S3

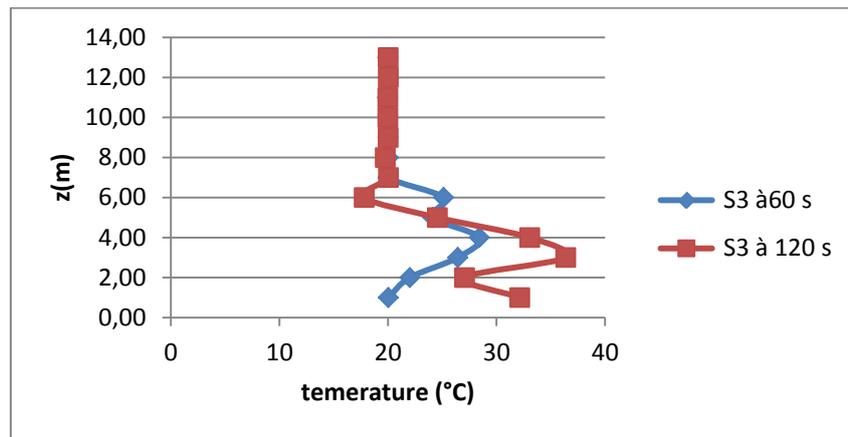


Fig5.79 : Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à t = 60s et t = 120s pour S3

Les figures 5.78, 5.78 et 5.79 représentent la distribution du profile de température près de la porte et dans les escaliers où on constate une diminution de la température. Les trémies et les extracteurs placées dans cette stratégie ralentissent la propagation de la fumée du coté de l'escalier mais au niveau supérieur, le hall et la salle de contrôle sont envahis par la fumée.

5.2.4. La 4^{eme} stratégie :

La visualisation de la fumée et la distribution de la température (figure 5.80 et 5.81) montrent que la fumée reste stratifiée sous le plafond puis aspiré par les évacuateurs vers le faux plafond. Le niveau supérieur est alors sécurisé et permet l'évacuation des personnes en toute sécurité.

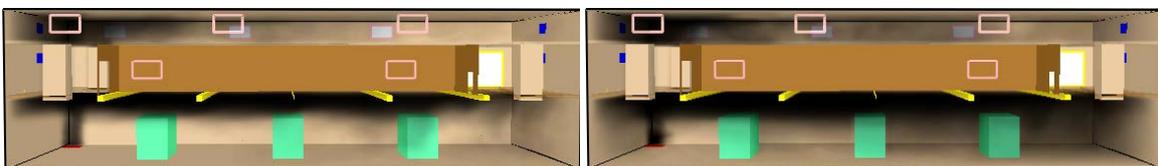


Fig 5.80 propagation de la fumée à t = 90s et t = 120s pour S4

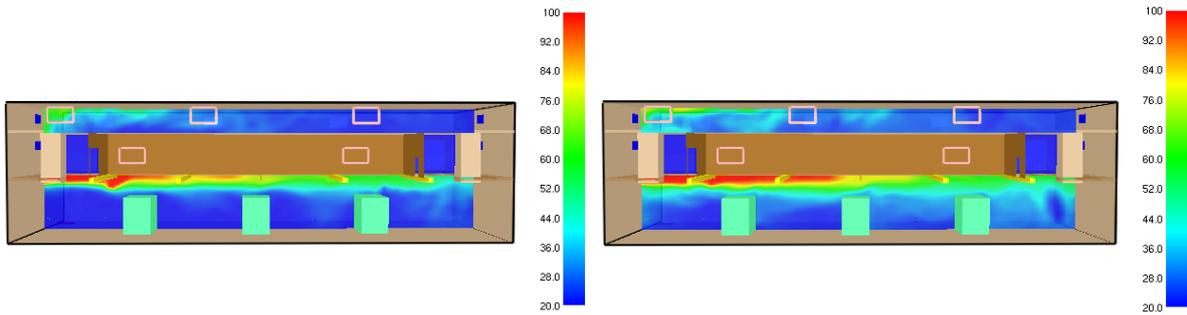


Fig 5.81: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S4

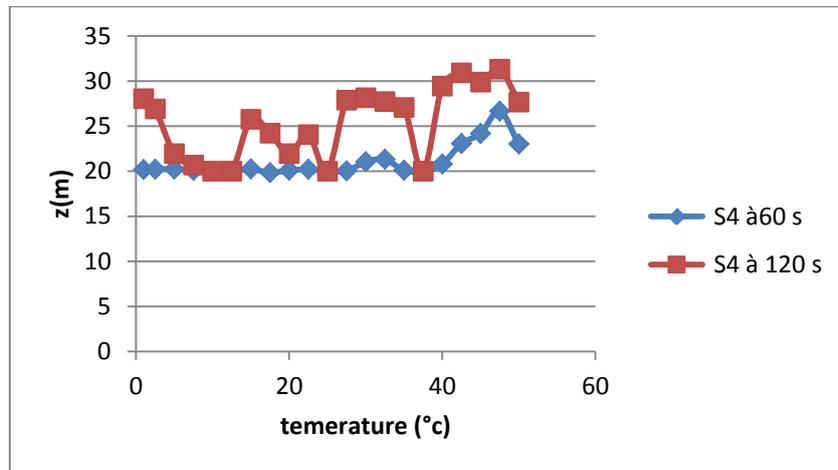


Fig 5.82: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur à t =60s et t =120s pour S4

Les figures (5.81) et (5.82), montrent le profile de températures à la hauteur 1.5 m du niveau du sol qui n’atteint pas les 40°C et donc une bonne stratégie à envisager en cas d’incendie.

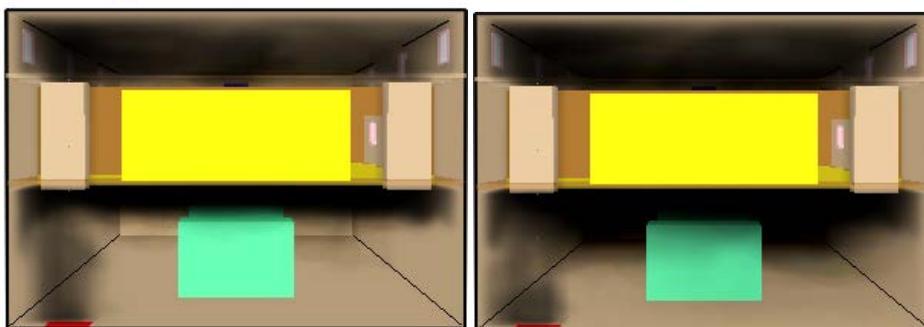


Fig 5.83: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t =60s et t =120s pour S4

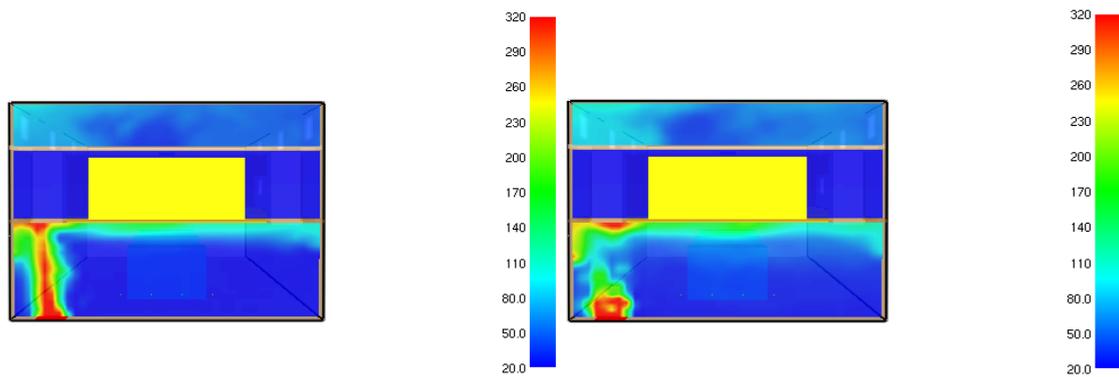


Fig 5.84: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

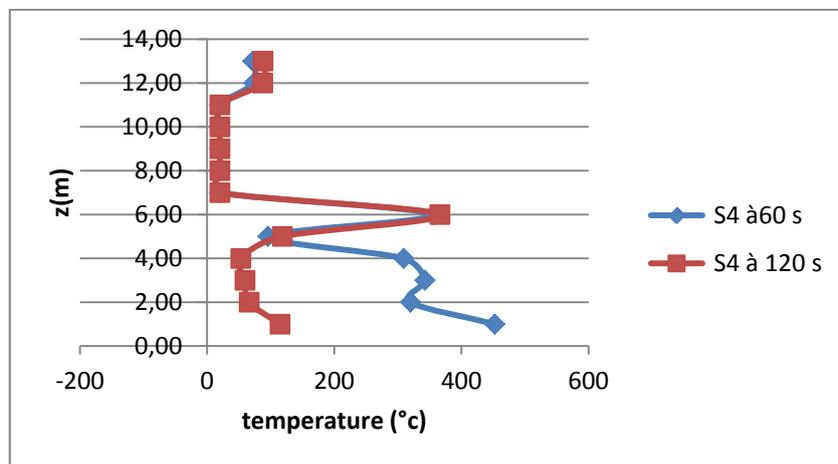


Fig 5.85 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

Les résultats de cette dernière configuration (figure 5.84 et 5.85) montrent le profil de température près de la source de chaleur. On remarque à $t = 60 s$ une température maximale de $480^{\circ}C$ à un mètre de hauteur du sol puis régresse, pour atteindre $100^{\circ}c$ sous le plafond. A $120s$ la température est de $110^{\circ}C$ au niveau inferieur puis diminue à cause des évacuateurs et les extracteurs présents.

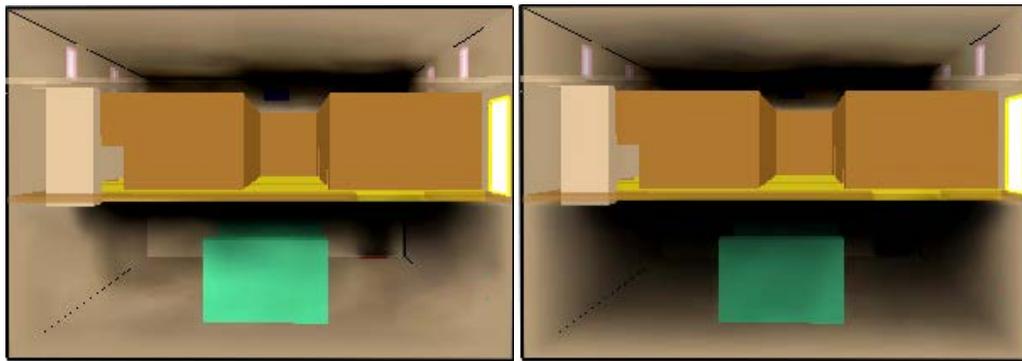


Fig 5.86 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour s4

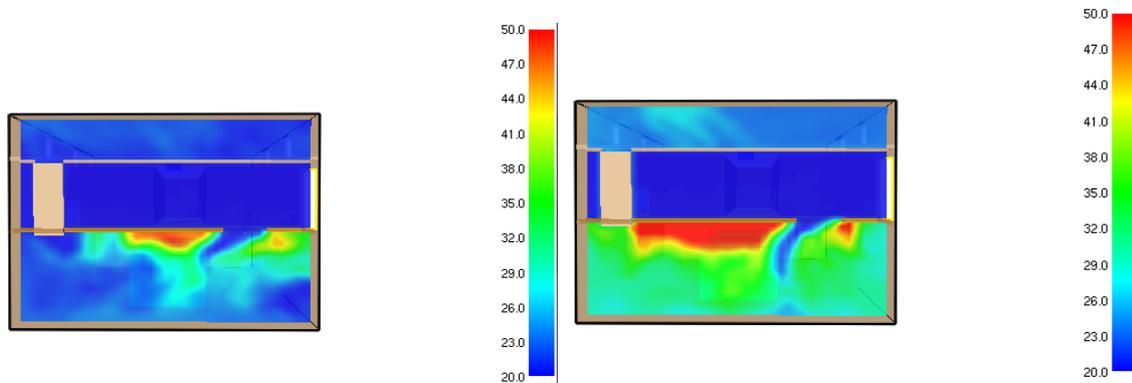


Fig5.87 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t=60s et t=120s pour S4

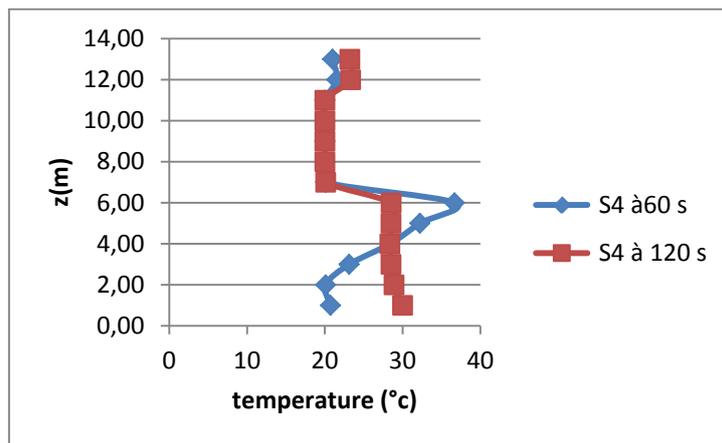


Fig 5.88: Distribution de la température près de la porte de sortie à t=60s et t=120s pour S4

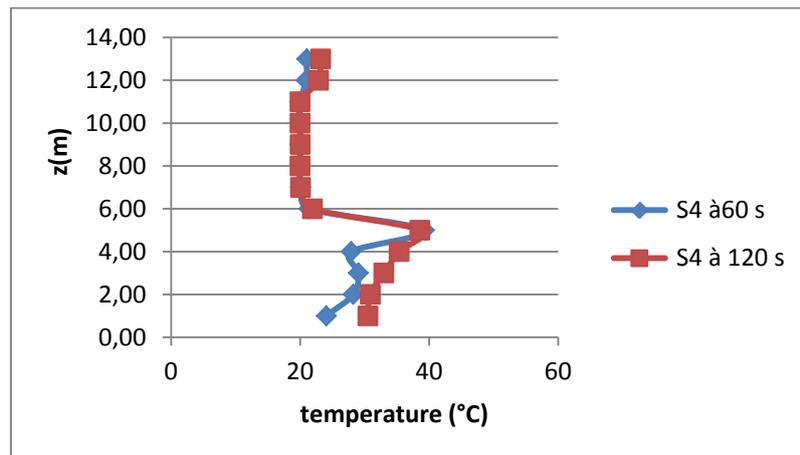


Fig 5.89: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à $t=60s$ et $t=120s$ pour S4

La distribution de la température figure 5.88 et 5.89 montre une diminution de cette dernière par rapport à la stratégie précédente. Le niveau supérieur des bureaux et de la salle de contrôle reste indemne et n'est pas atteint par la fumée. L'utilisation des évacuateurs a permis un désenfumage plus efficace et moins risqué pour l'évacuation des personnes.

La comparaison des profils de température des figure 5.90 et 5.91 pour les 4 stratégies proposées au temps $t= 60s$ et $t= 120 s$ sur toute la longueur de la centrale, nous permet de conclure que la stratégie la mieux adaptée à ce genre de situation est celle avec les évacuateurs. Non seulement elle permet le désenfumage et l'évacuation des personnes mais aussi maintien le niveau supérieur, des bureaux, et la salle de contrôle en sécurité.

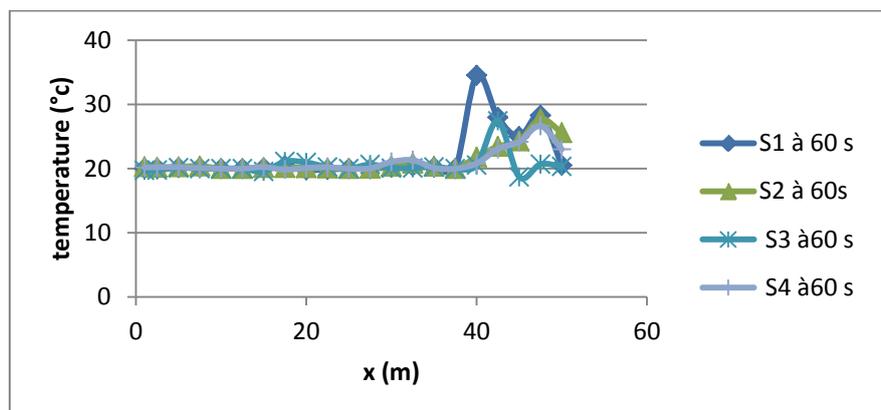


Fig 5.90: Distribution de la température à une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 60s$

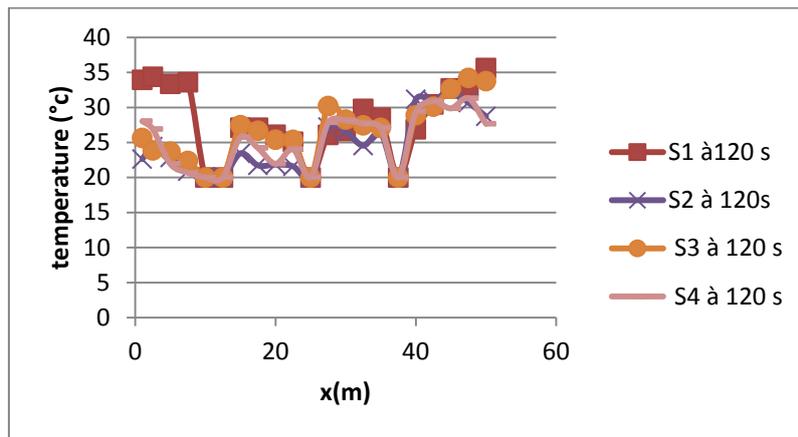


Fig 5.91: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à t=120

5.3. Analyse des résultats du scénario trois : feu dans la 1^{ère} turbine:

5.3.1. La 1^{ère} stratégie :

Les visualisations par Smokeview. (Fig.5.92) montre les résultats des simulations pour l'enfumage de la centrale, par blocage du compartiment du bas à t = 30s puis se propage vers le niveau supérieur à t = 60s. Puis la fumée traverse le couloir conduisant vers les bureaux et la salle de contrôle. Après t = 120s la fumée se propage dans toute la centrale.

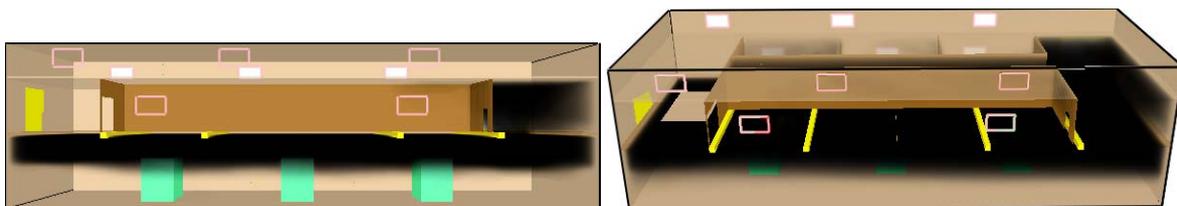


Fig 5.92 propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S1

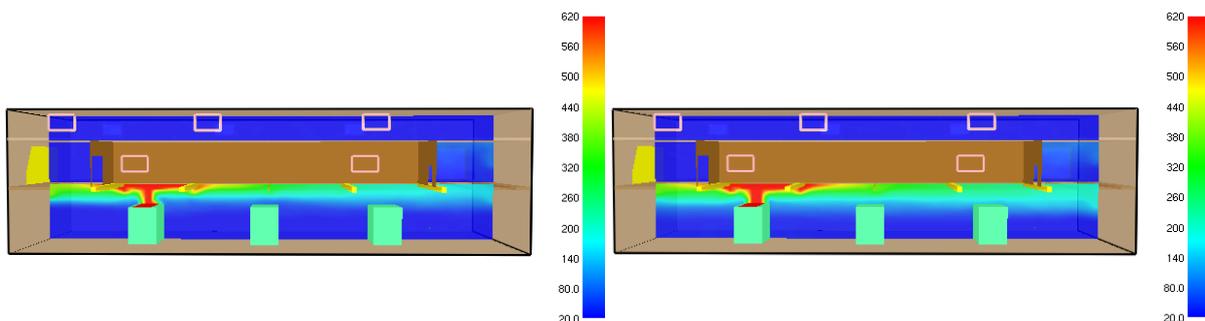


Fig 5.93: distribution de la température à t=60s et t=120s pour S1

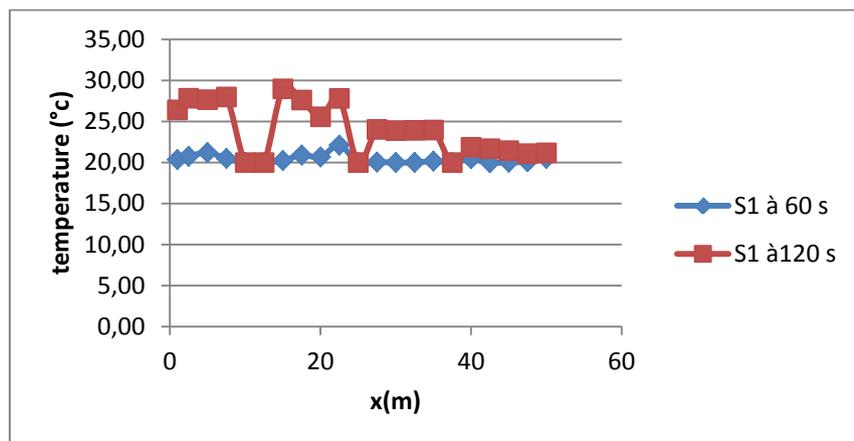


Fig 5.94 : distribution de la température à une hauteur 1.5m à t =60s et t =120s pour S1

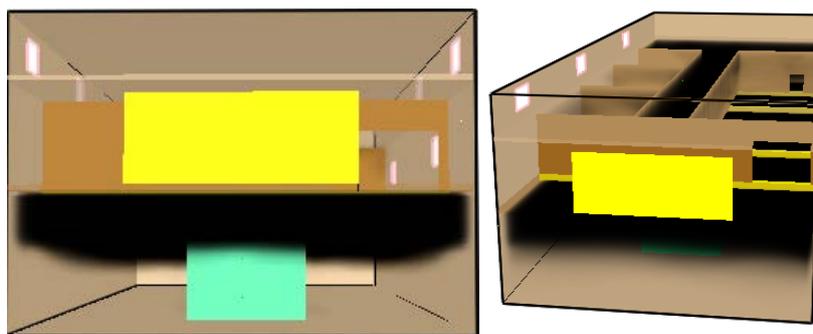


Fig 5.95 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S1

De la figure 5.95, on peut constater la fumée qui s'est propagée jusqu'au couloir du 2^{ème} niveau après 120s seulement. La distribution de la température (figure 5.96) nous permet de constater la propagation de la fumée. D'abord le feu se déclenche sur la turbine à 3m de hauteur, se stratifie sous le plafond puis commence à redescendre après 30s, où il atteint le 1m au dessus du sol vers l'extrémité droite de la porte d'entrée, puis se propage partout dans le niveau inférieur. La elle se confine à des températures très élevées près de la source de chaleur. Elle se propage vers la porte et par la trémie des escaliers, et atteint après 30s le couloir niveau supérieur. A t= 120 s le couloir et les salles sont envahies par la fumée à des températures atteignant les 50°C.

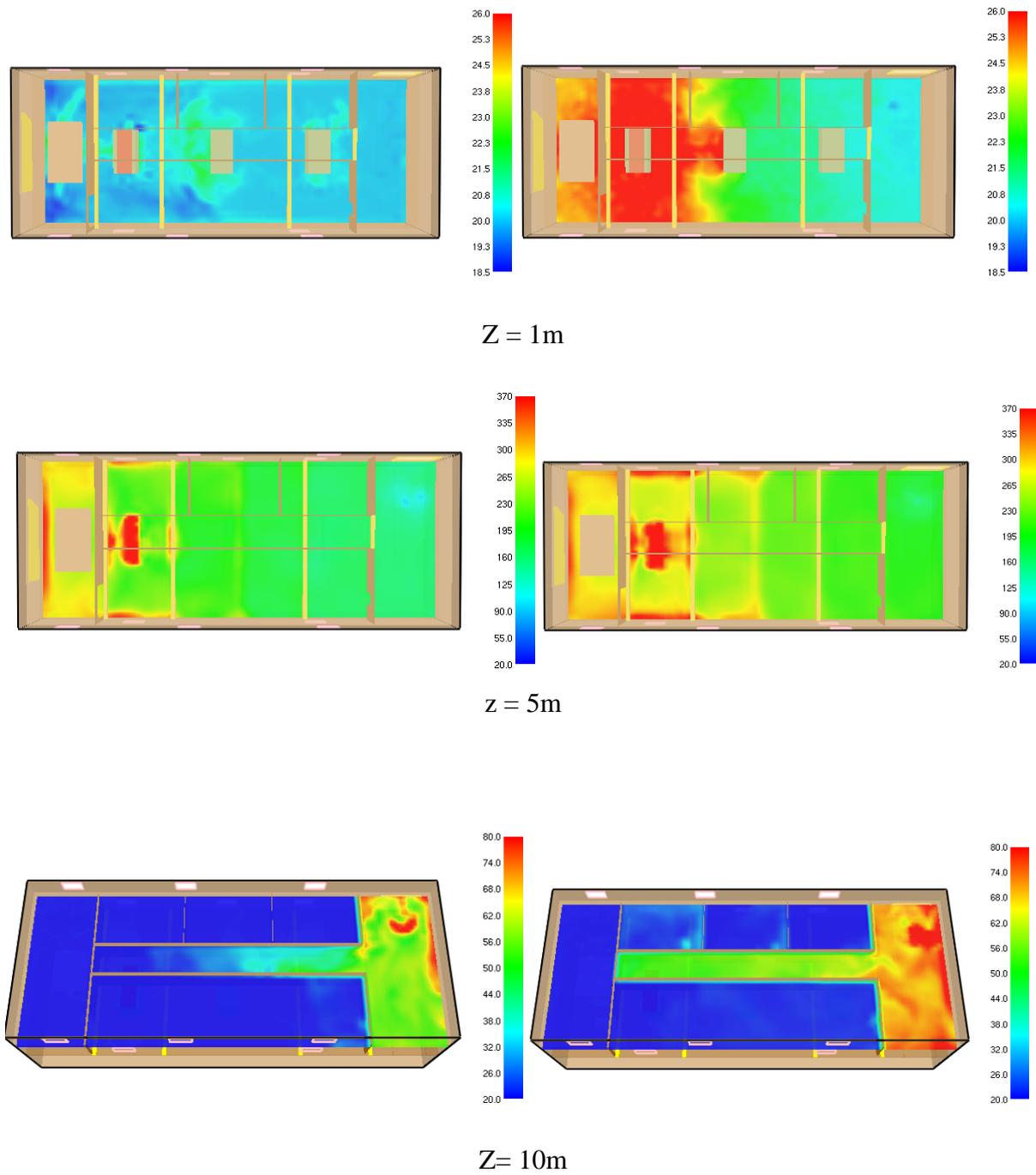


Fig 5.96: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu

à t = 60s et t = 120s pour S1

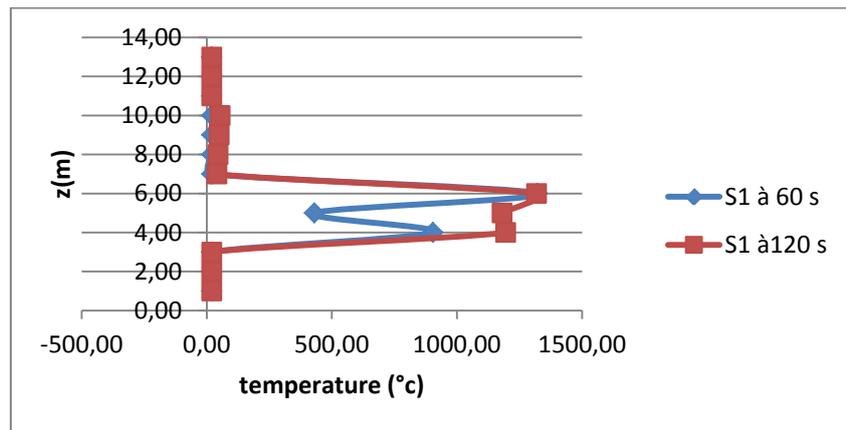


Fig 5.97: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

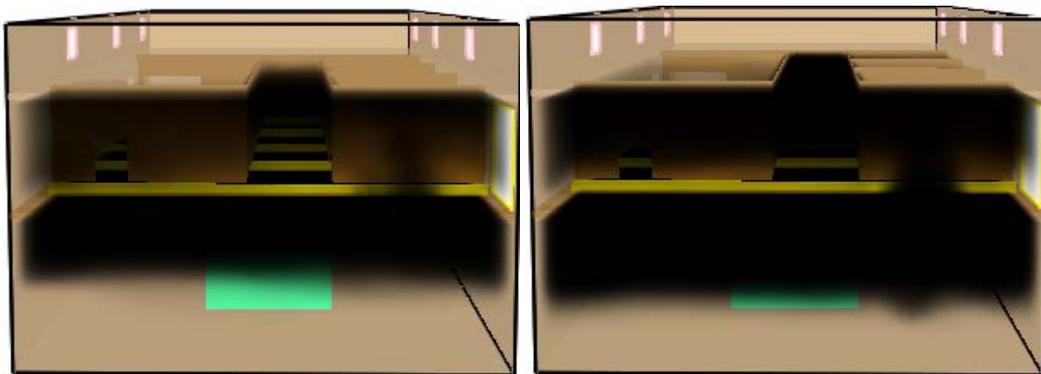


Fig 5.98 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

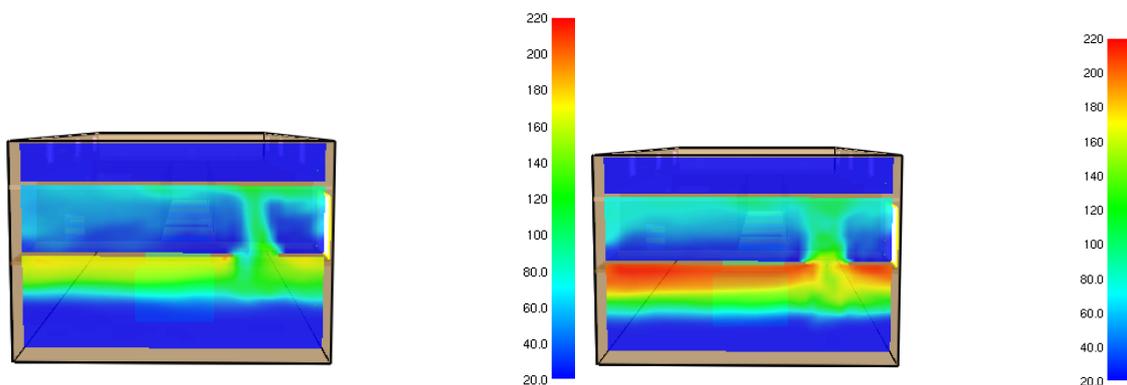


Fig 5.99 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

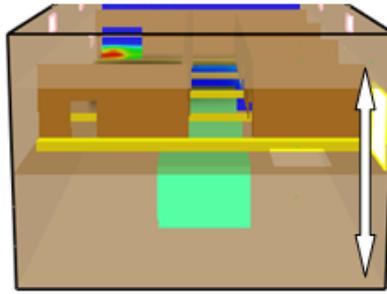


Fig 5.100 : les points de mesure le long de la hauteur devant la porte

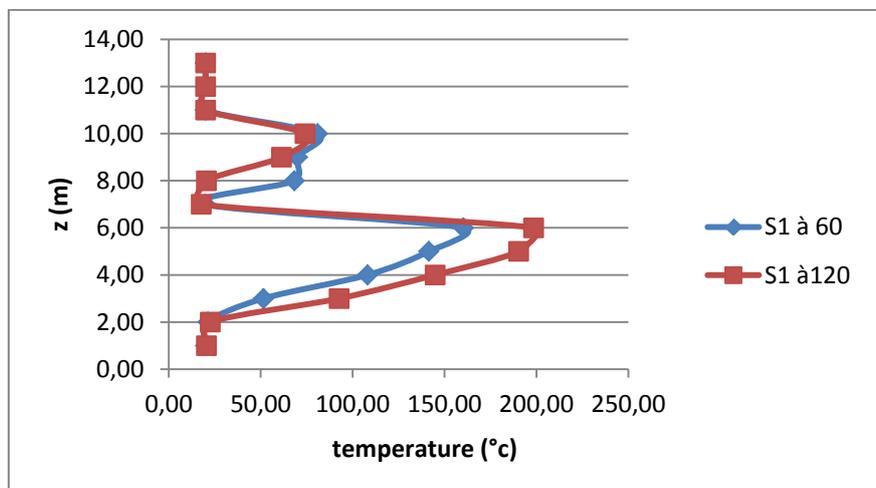


Fig 5.101 : Distribution de la température près de la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S1

Les figures (5.99) , (5.101) représentent la propagation de la fumée et la distribution de la température vers la porte , qui est la seule voie d'évacuation. Elle sera bloquée complètement par la fumée à des températures élevées, après t=60s, par suite du confinement totale de la centrale et la montée des fumées vers le niveau supérieur, qui aura pour effet la condamnation de l'issue de sortie coté escaliers figure 5.103.

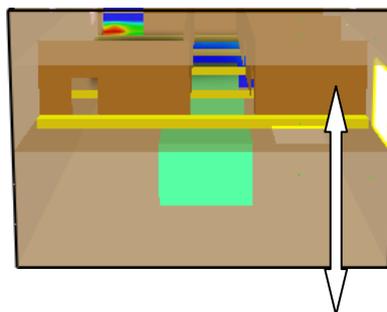


Fig5.102: les points de mesure le long de la hauteur au milieu des escaliers

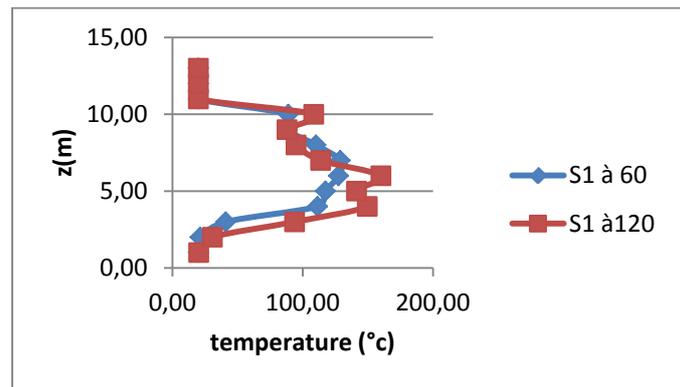


Fig 5.103 : Distribution de la température au milieu de l’escalier sur toute la hauteur à t = 60s et t=120s pour S1

On conclut que, pour le cas de confinement total d’une centrale, les possibilités d’évacuation et de sauvetage sont presque impossible si des personnes sont bloquées au niveau inférieur et supérieur de la bâtisse.

5.3.2. La 2^{eme} stratégie :

On remarque sur les figures 5.104 et 5.105 que les ouvertures présentent un cas favorable pour l’évacuation des personnes par les escaliers. Le niveau supérieur sera envahi par les fumées rapidement dont la salle de contrôle, malgré cela les escaliers resteront hors de danger pour quelque temps.

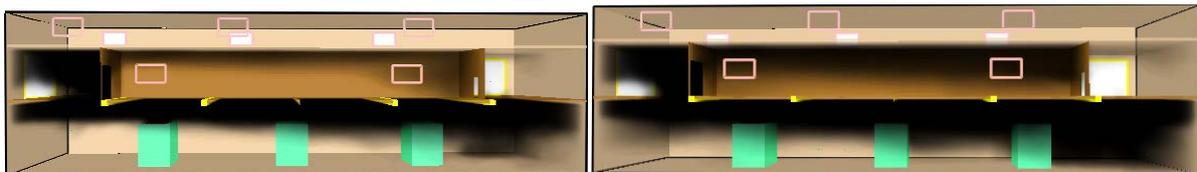


Fig 5.104 propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S2

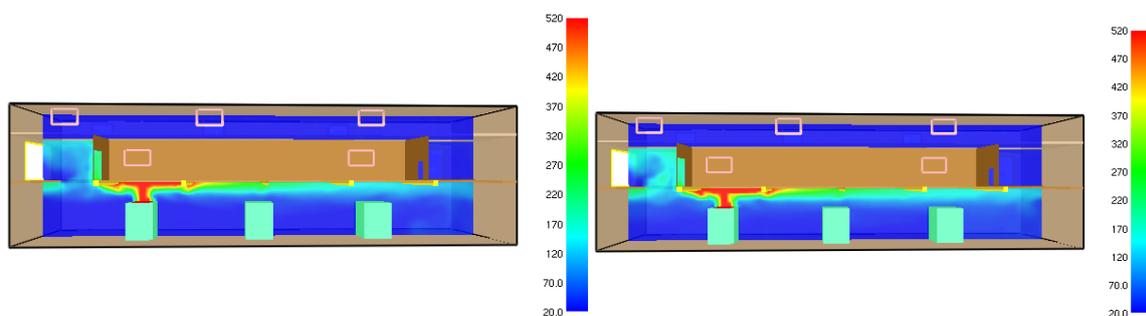


Fig 5.105: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S2

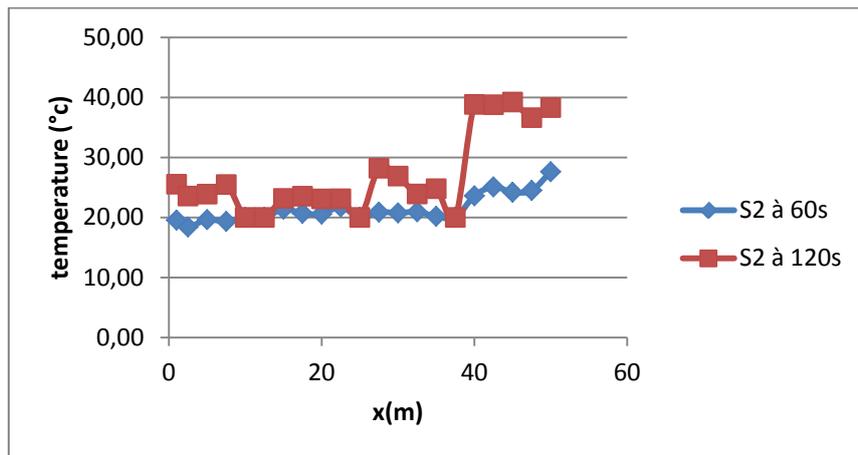


Fig 5.106: distribution de la température à une hauteur 1.5m à t=60s et t=120s pour S2

La distribution de la température figure 5.106 à l’instant t= 60s ne varie pas et reste dans la température ambiante, à 120s la température augmente mais reste au dessous de 30°C sauf près de la sortie.

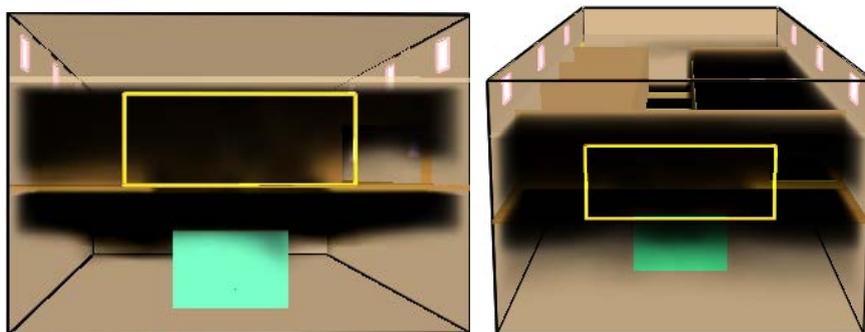
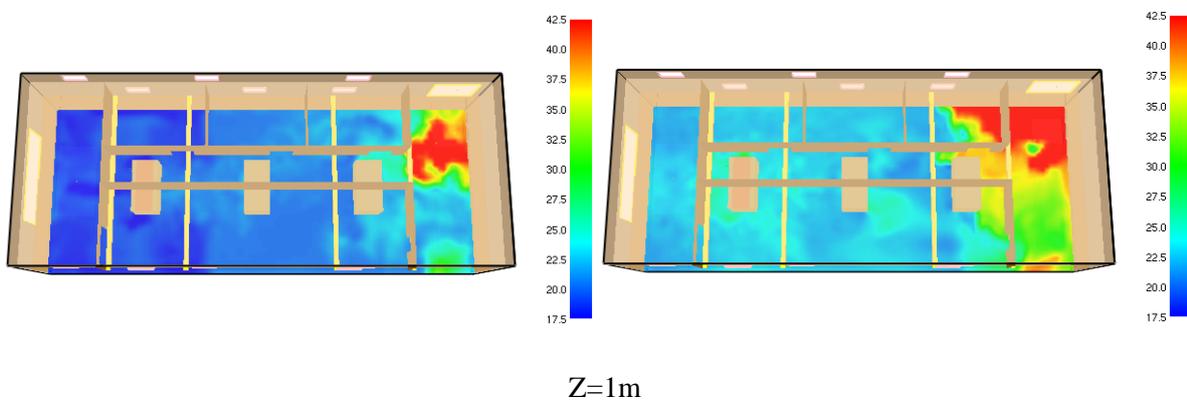


Fig 5.107: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S2



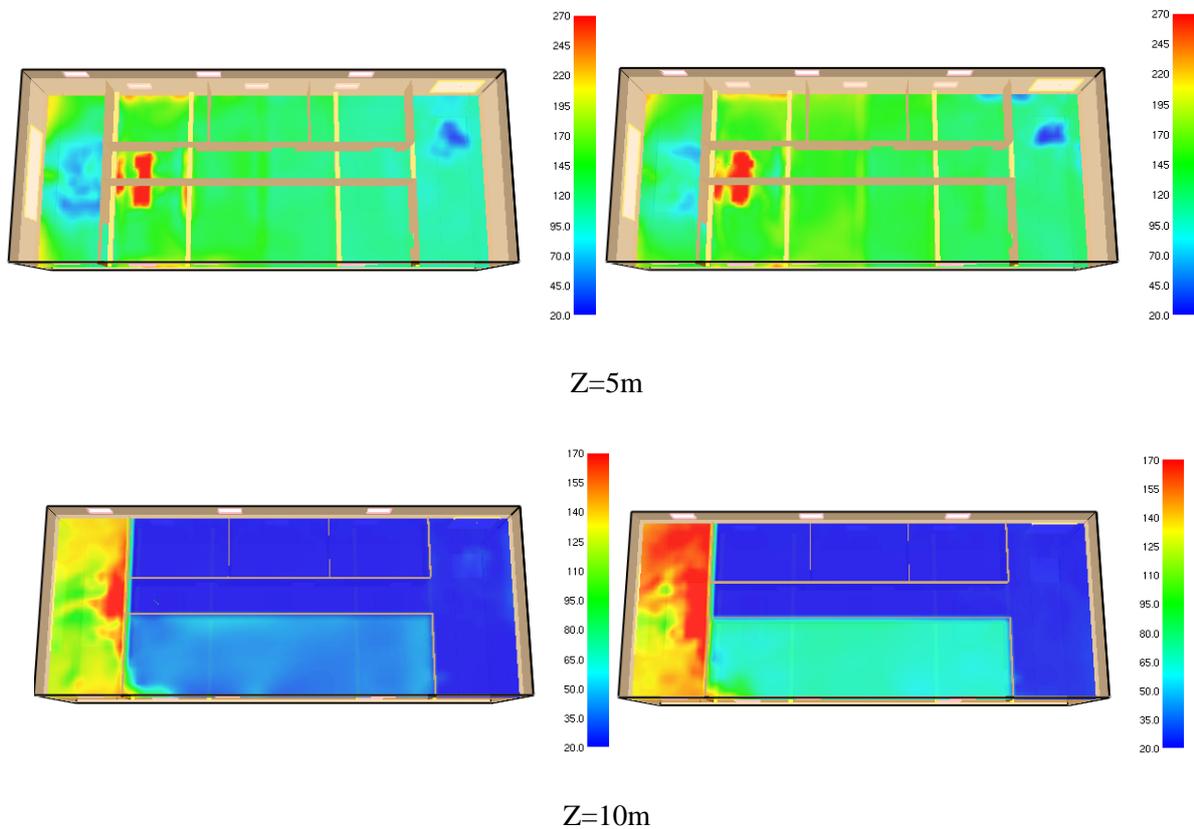


Fig 5.108: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Les figures 5.107 et 5.108 représentent l'enfumage et la distribution de la température pour les différentes hauteurs. On remarque la propagation rapide de la fumée vers le niveau supérieur après $t = 60$ s et la salle de contrôle est envahie complètement par la fumée après $t = 120s$. La température est à ses valeurs maximales (figure 5.109) près de la source de chaleur puis diminue suivant la hauteur et la distance par rapport au foyer.

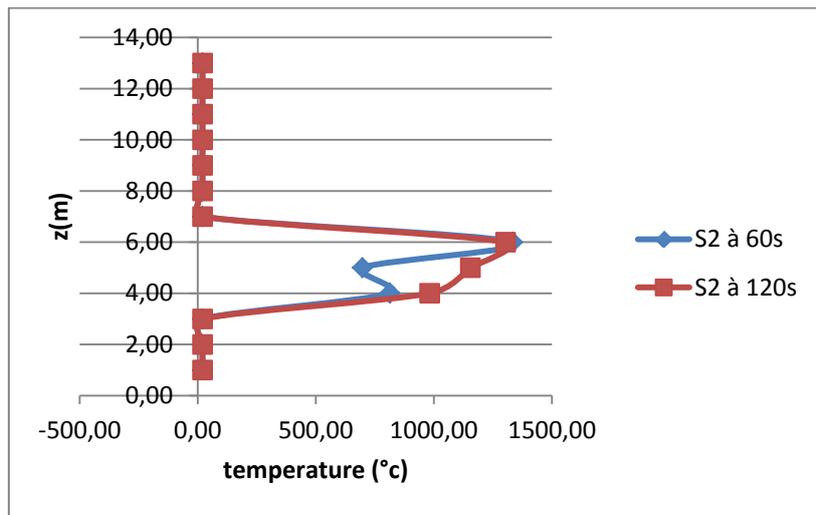


Fig 5.109: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

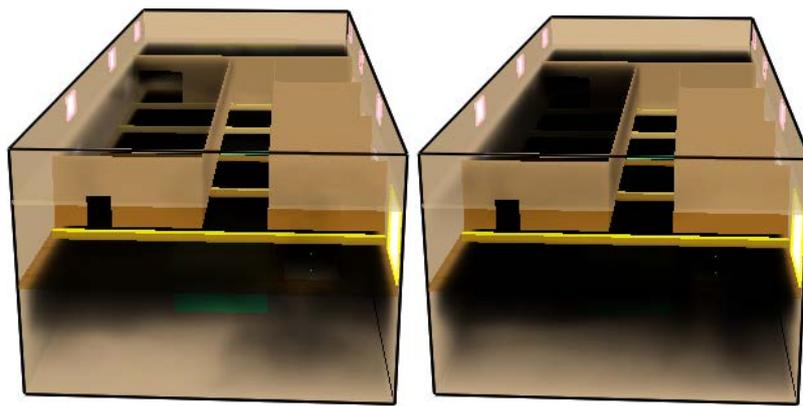


Fig 5.110: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

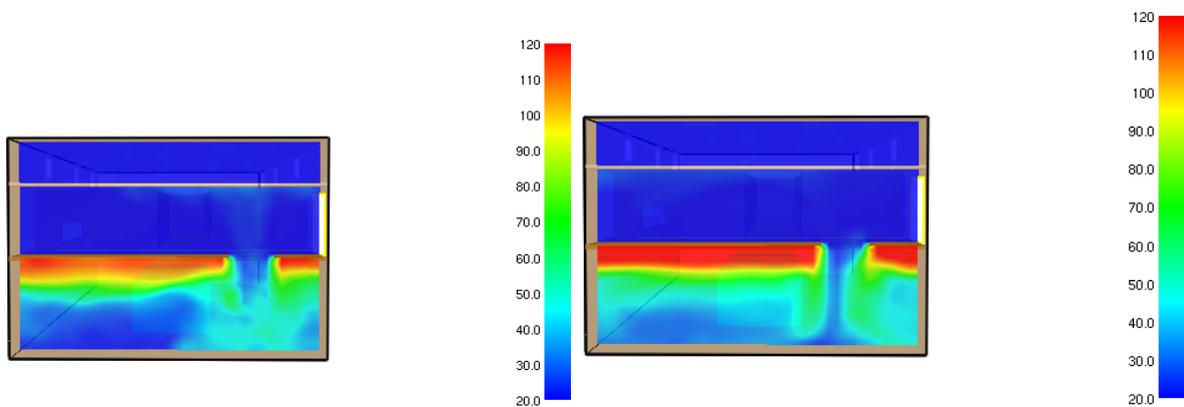


Fig 5.111 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S2

Les figures 5.110 et 5.111 représentent l'enfumage et la distribution de la température près de la sortie. On peut remarquer que la fumée est stratifiée au niveau du plafond du avec une température de 45°C qui augmentera pour atteindre 150°C à t = 60 s et t = 120s. Le niveau supérieur se démarque des fumée(figure 5.112) donc facilite l'évacuation des personnes.

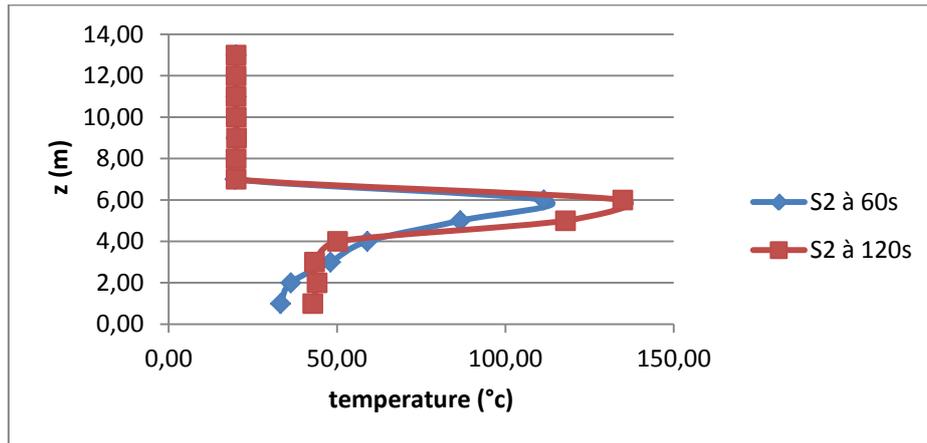


Fig 5.112 : Distribution de la température près de la porte de sortie

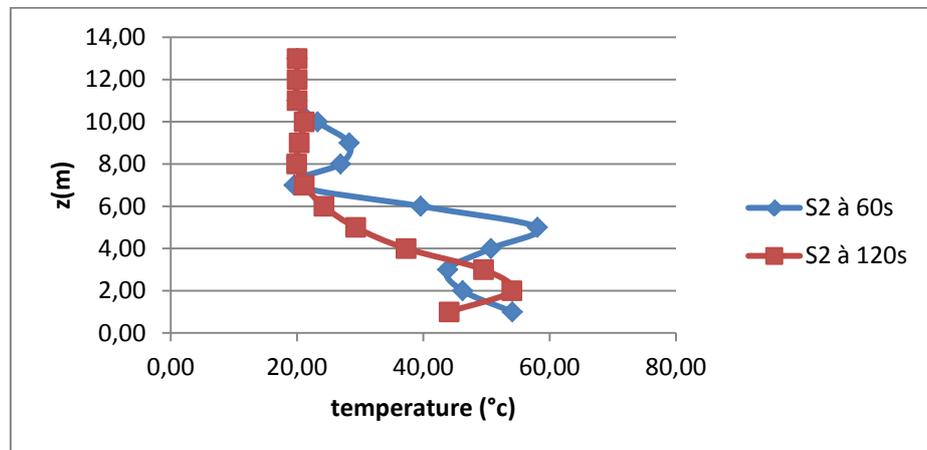


Fig 5.113 : Distribution de la température au milieu des escaliers

5.3.3. La 3^{ème} stratégie :

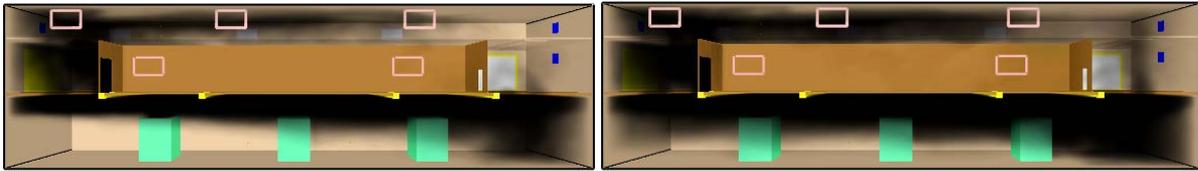


Fig5.114 : propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S3

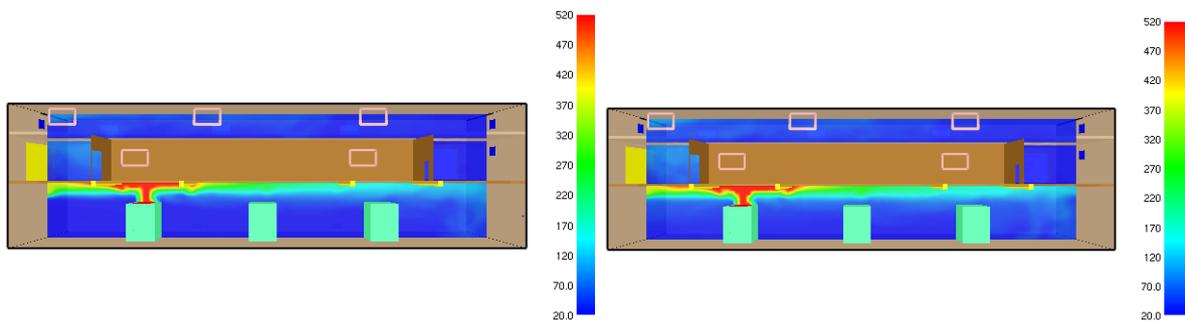


Fig 5.115: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S

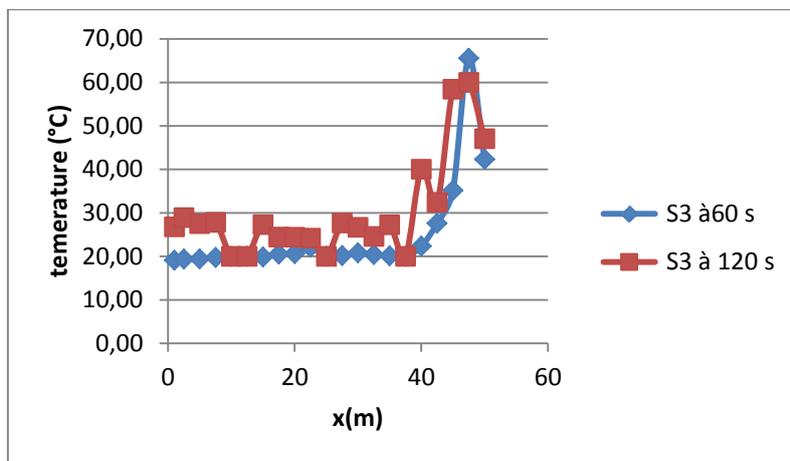


Fig 5.116: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol à t =60s et t =120s pour S3

Les trémies au niveau des salles permettent la diminution de la température d'environ 100°C par rapport à la 1^{ère} stratégie, grâce à l'extraction efficace qui se fait.

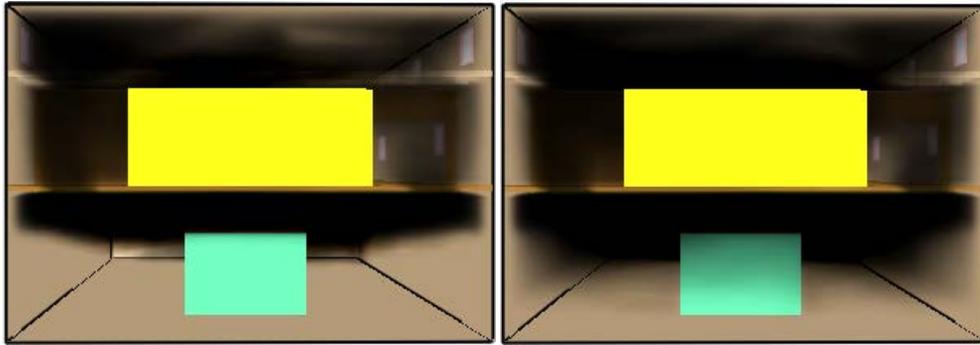
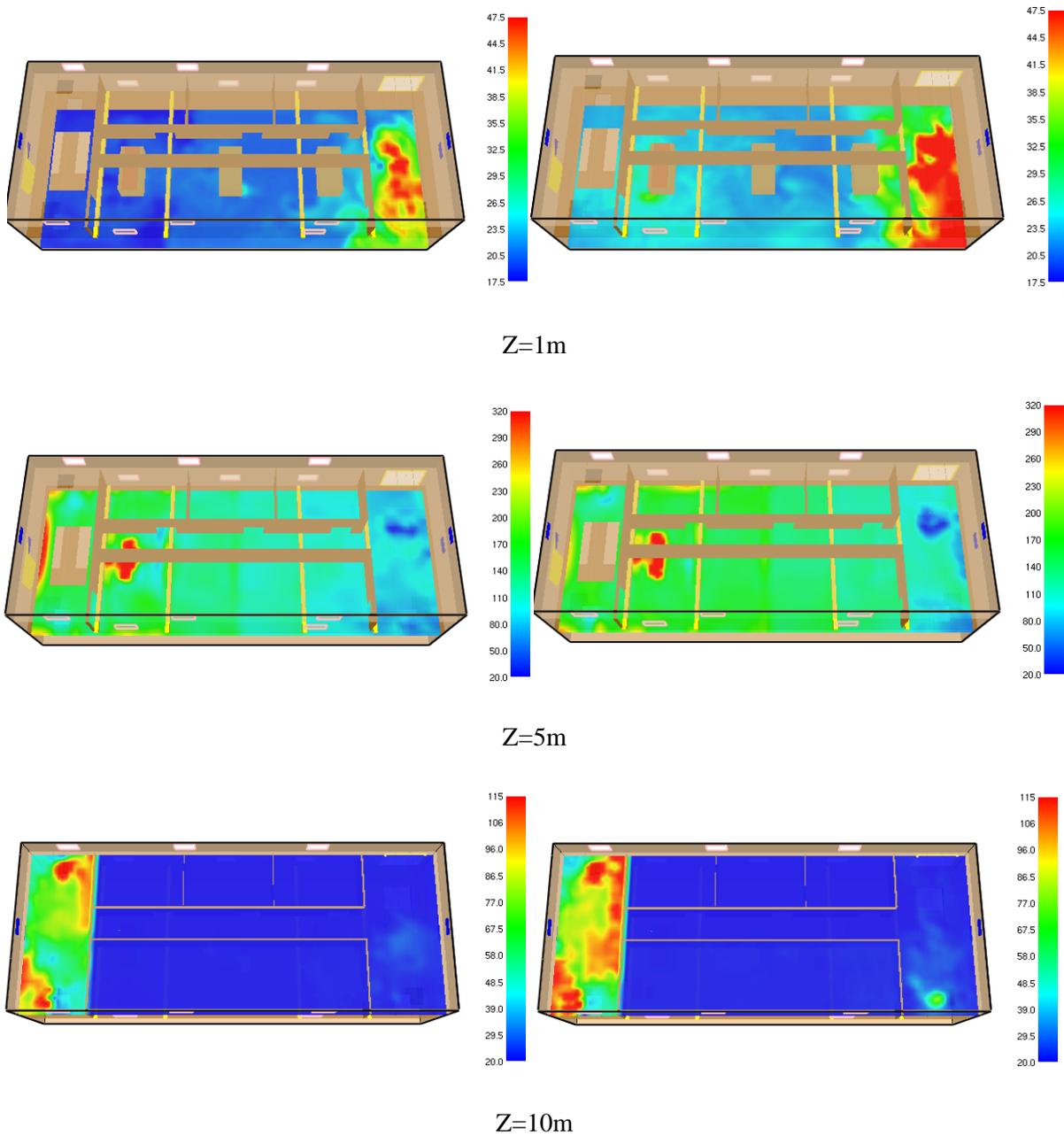


Fig 5.117 : Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3



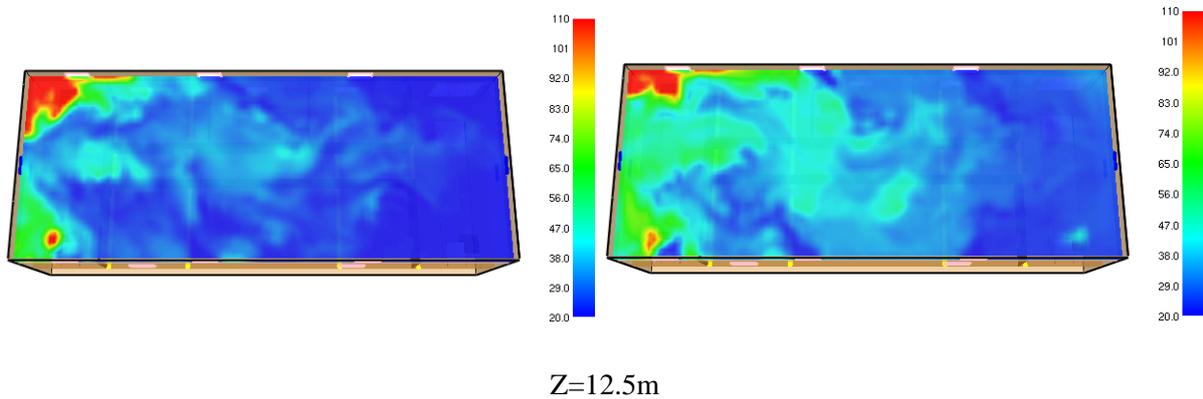


Fig 5.118 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S3

Les figures 5.117 et 5.118 montrent que la fumée a envahi le niveau supérieur et à travers les trémies a atteint le faux plafond.

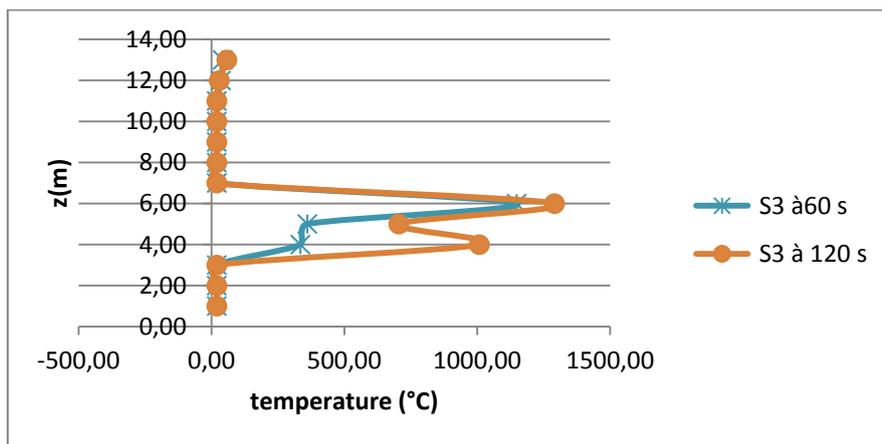


Fig 5.119 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S3

Dans la figure 5.119, on remarque que les températures diminuent par rapport à la stratégie 1. Avec stratification de la fumée au niveau inférieur.

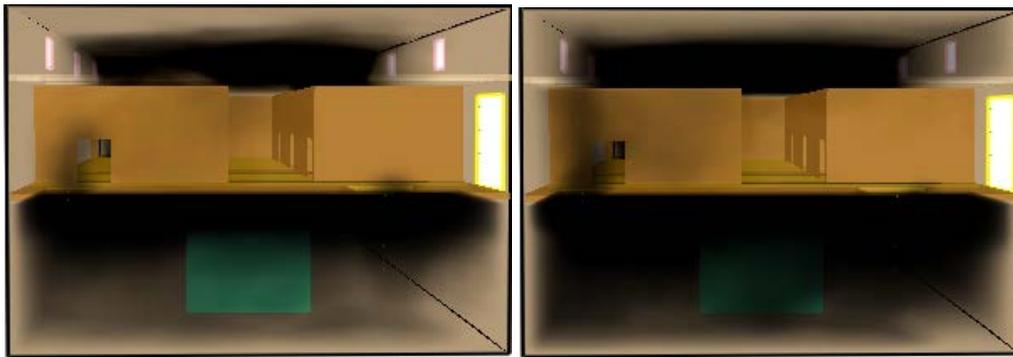


Fig 5.120: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

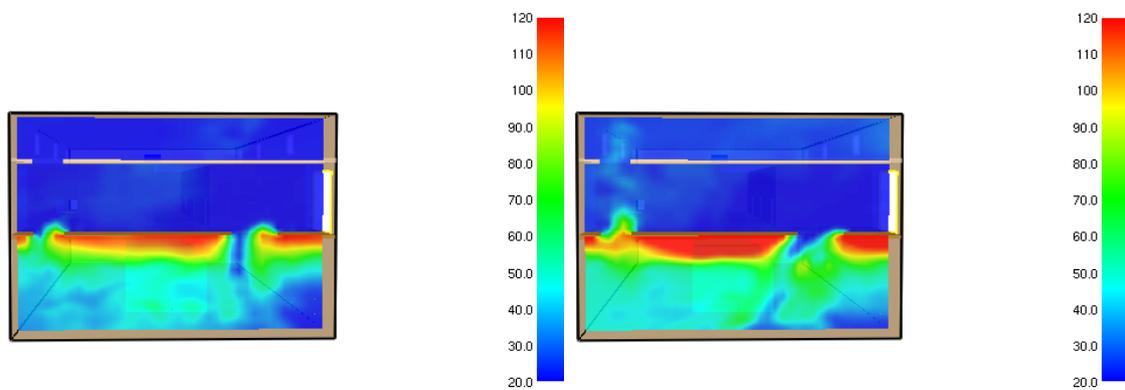


Fig 5.121: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

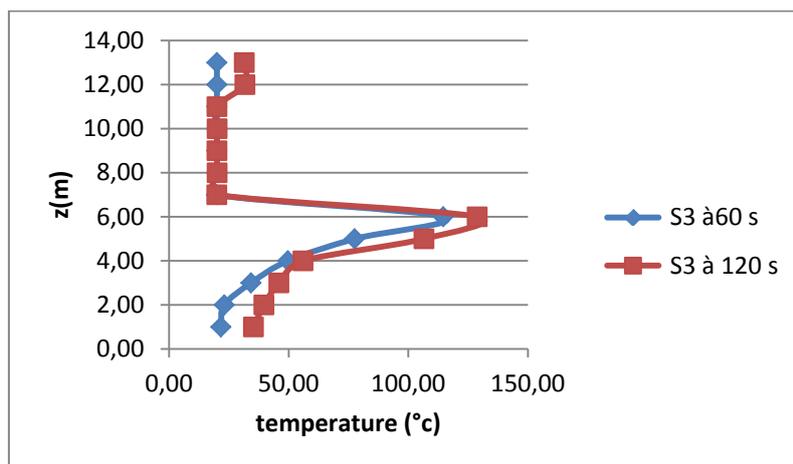


Fig 5.122: Distribution de la température près de la porte de sortie à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S3

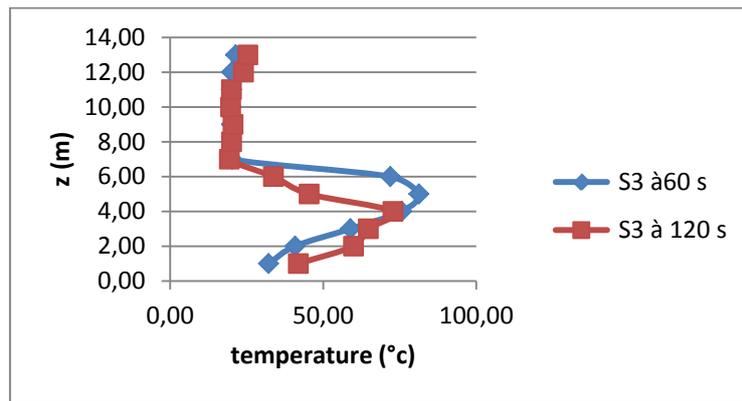


Fig5.123 : Distribution de la température au milieu de l’escalier sur toute la hauteur à t = 60s et t = 120s pour S3

On remarque toujours une diminution de la température dans ce cas figure 5.122 et 5.123, signifie que la stratégie d’utilisation des trémies et des extracteurs est une des solutions, la présence des trémies au sol du deuxième niveau induit son envahissement par la fumée d’où un risque pour les personnes.

5.3.4. La 4^{ème} stratégie :

On remarque par figures 5.124 et 5.125 que la fumée traverse les évacuateurs pour atteindre le faux plafond ainsi le deuxième niveau reste à l’abri de la fumée ce qui aide à l’évacuation du personnel.

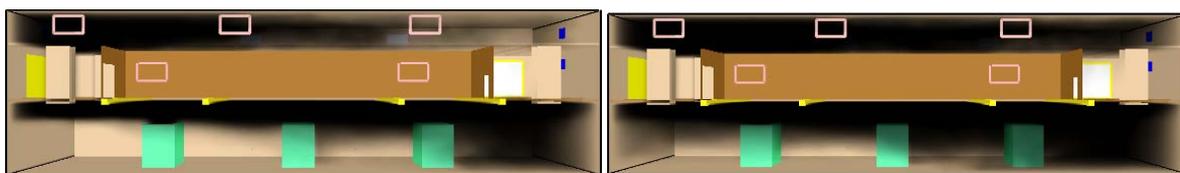


Fig 5.124 propagation de la fumée à t = 90s et t = 120s pour S4

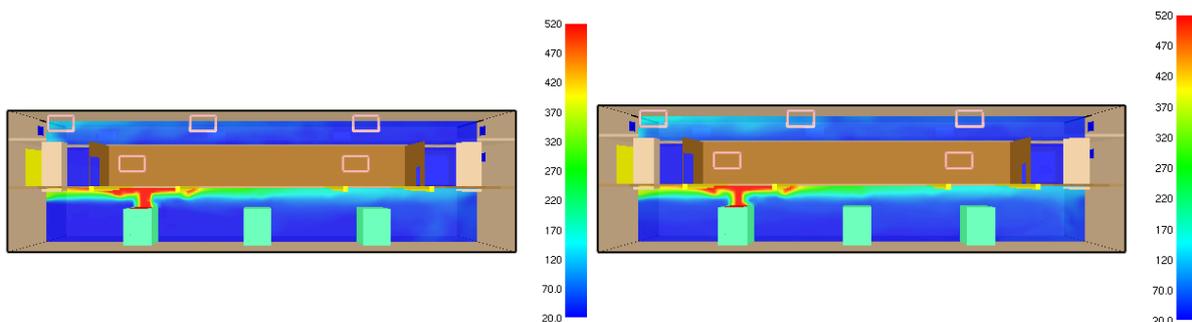


Fig 5.125: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S4

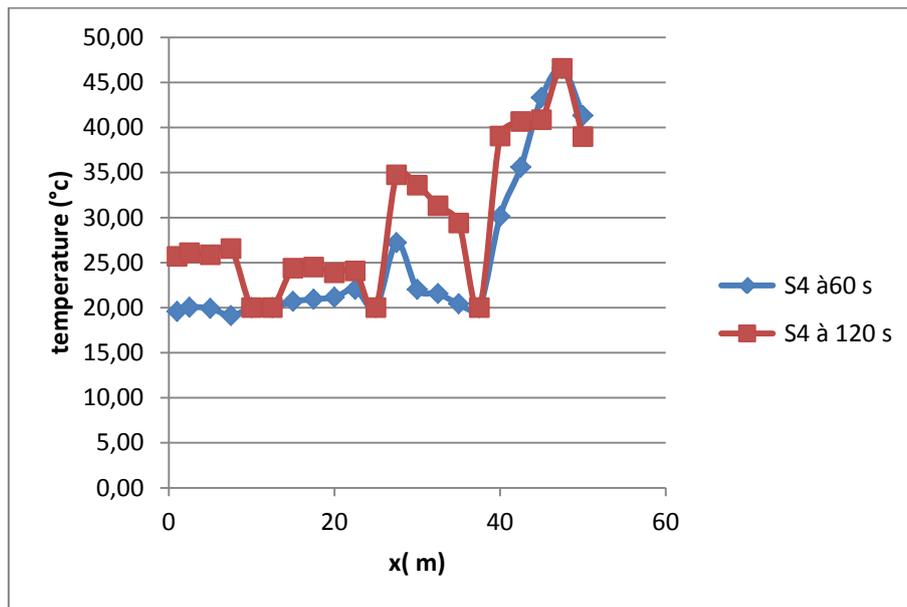


Fig 5.126: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur à t =60s et t =120s pour S4

Des figures 5.125 et 5.126, montrent que les températures à une hauteur de 1.5 m au niveau du sol ne dépassent pas une moyenne de 40°C, sauf au niveau des issues.

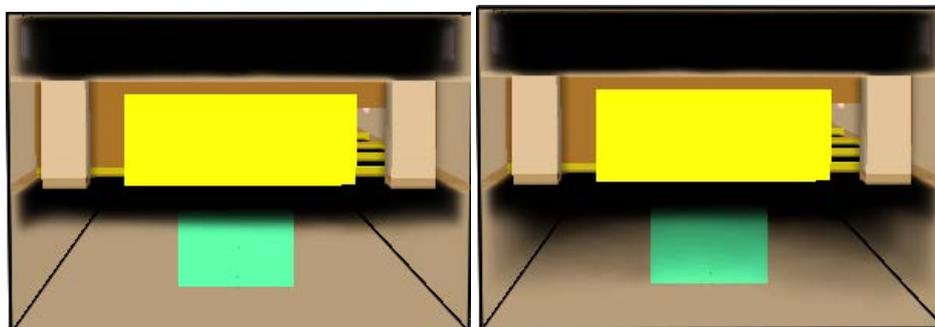
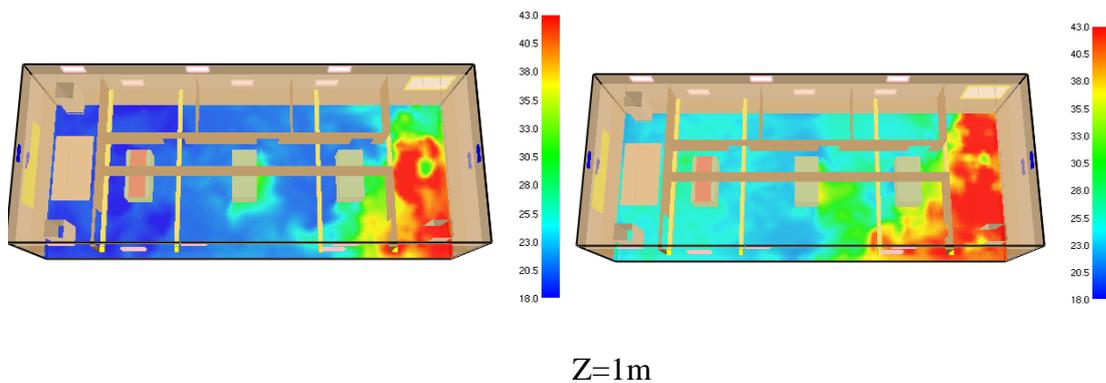


Fig 5.127: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t =60s et t =120s pour S4



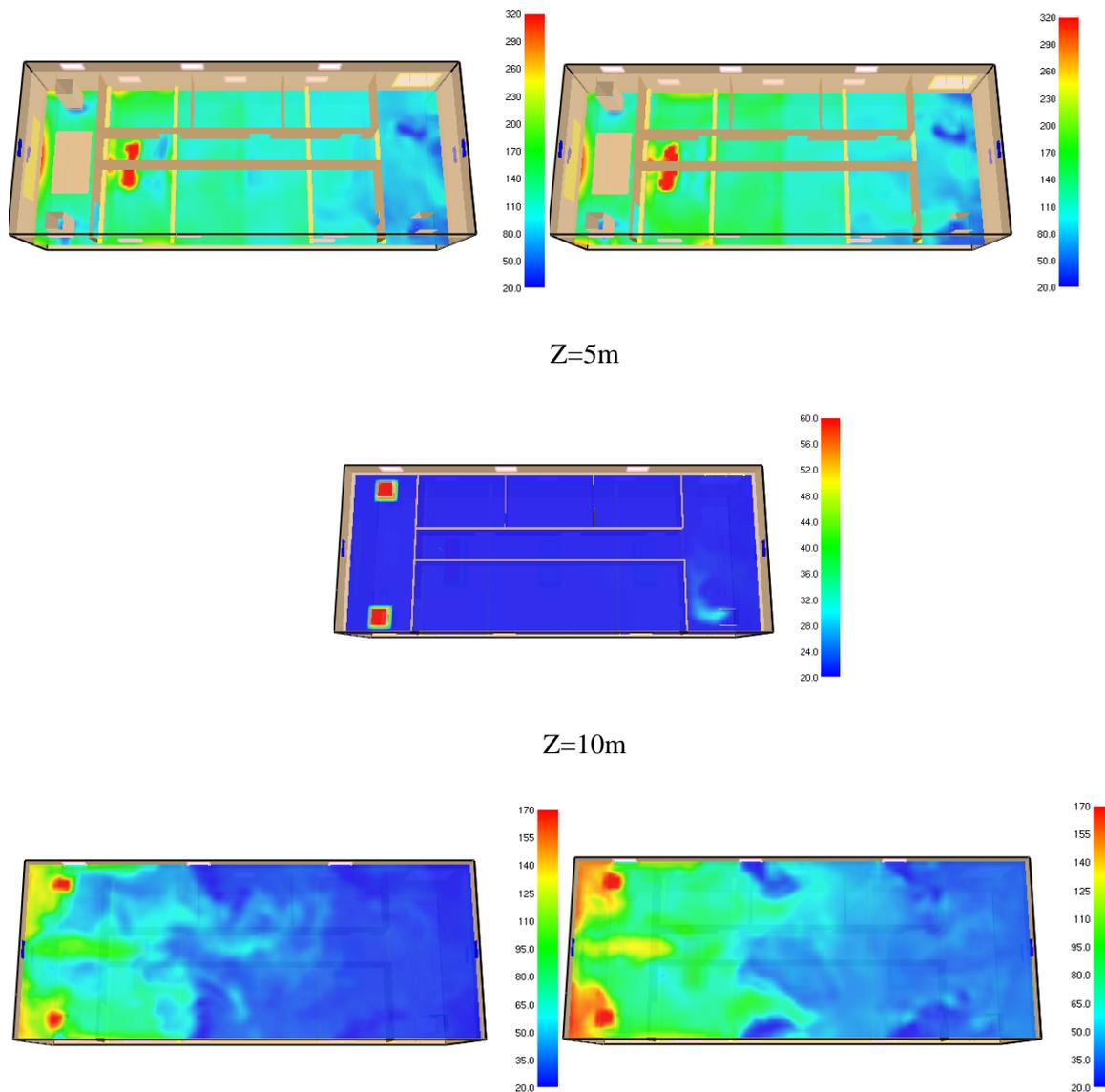


Fig 5.128: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S4

La figure 5.128 représente la distribution de la température à différentes hauteurs près de la source, la fumée se propage dans la centrale à des températures inférieures à celle enregistrée dans les stratégies précédentes et avec l'avantage d'une évacuation sans risque du personnel.

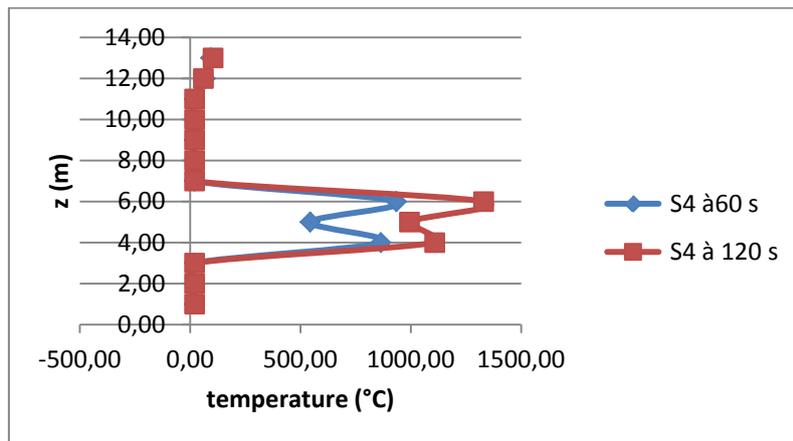


Fig 5.129 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t =60s et t=120s pour S4

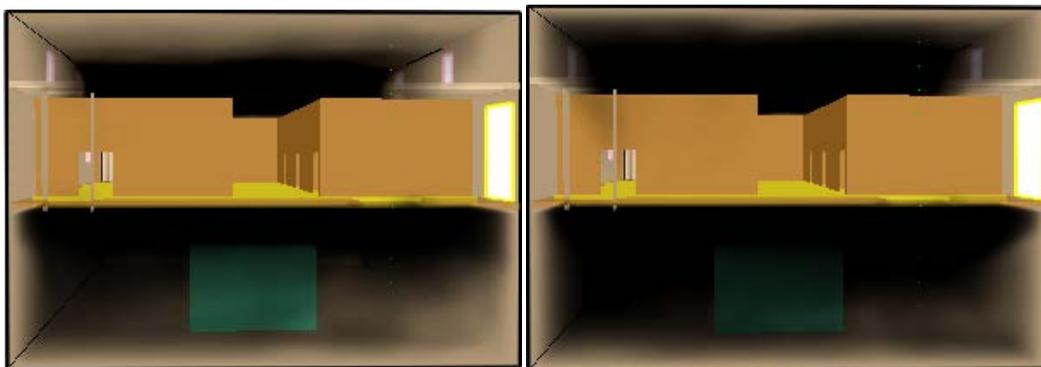


Fig 5.130 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour s4

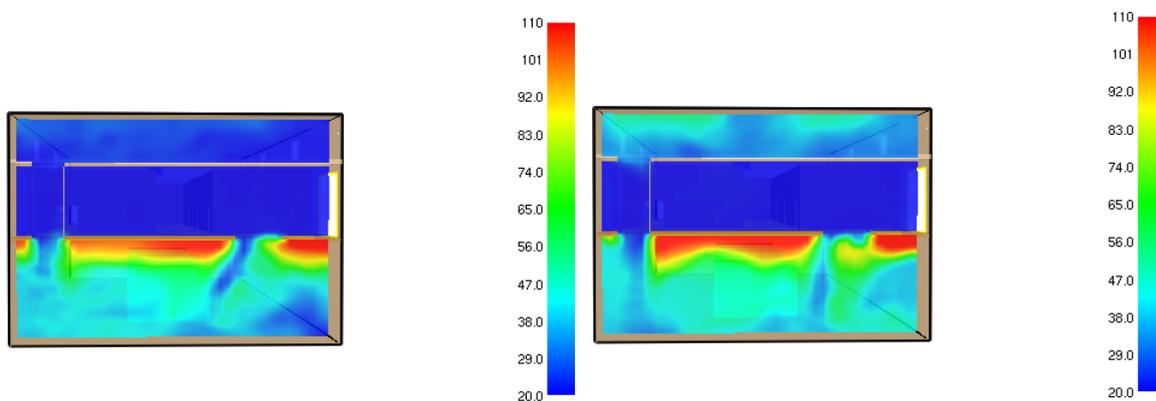


Fig5.131 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t =60s et t =120s pour S4

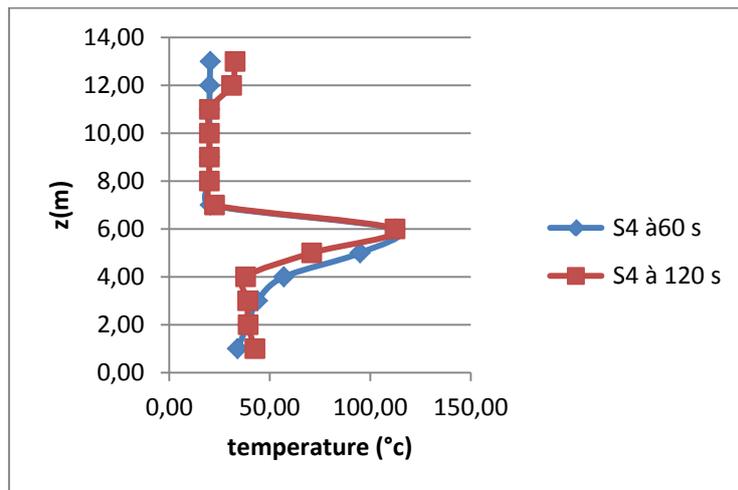


Fig 5.132: Distribution de la température près de la porte de sortie à t=60s et t=120s pour S4

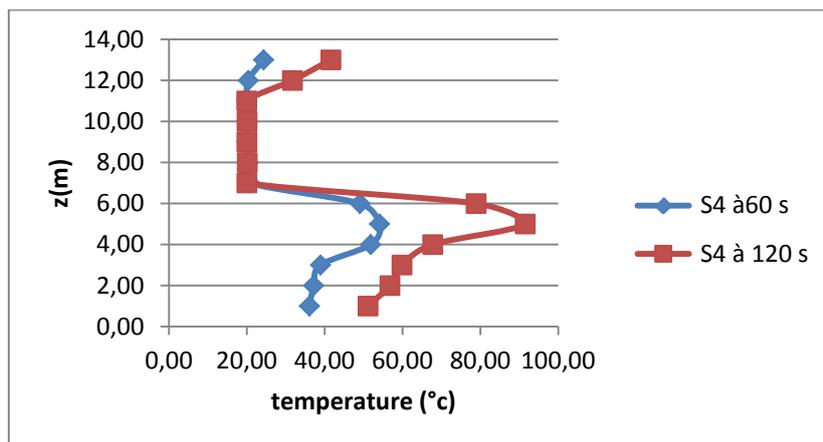


Fig 5.133: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à t=60s et t=120s pour S4

Les figures 5.132 et 5.133 montrent une diminution de la température par rapport à la stratégie précédente avec des températures moins élevées sauf dans les escaliers où elle augmente après t=120s. Le niveau supérieur des bureaux et de la salle de contrôle reste sécurisé. L'utilisation des évacuateurs et des extracteurs permet un désenfumage plus efficace est moins risqué pour l'évacuation des personnes.

La comparaison des profils de température pour les 4 stratégies proposées au temps $t=60s$ et $t=120s$ de par les résultats obtenus précédemment, (figures 5.134 et 5.135) confirme que la stratégie la plus sécurisée est celle avec les évacuateurs. La fumée atteint les voies de secours mais dans des temps plus long, ce qui permet le désenfumage et l'évacuation du personnel.

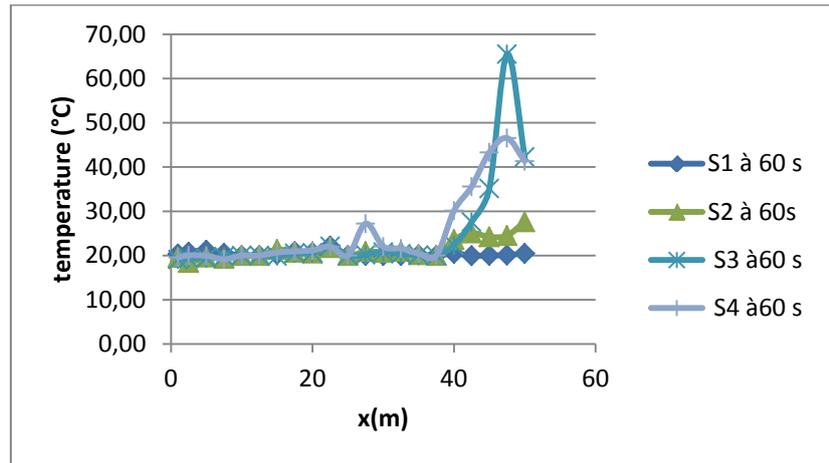


Fig 5.134: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t = 60s$

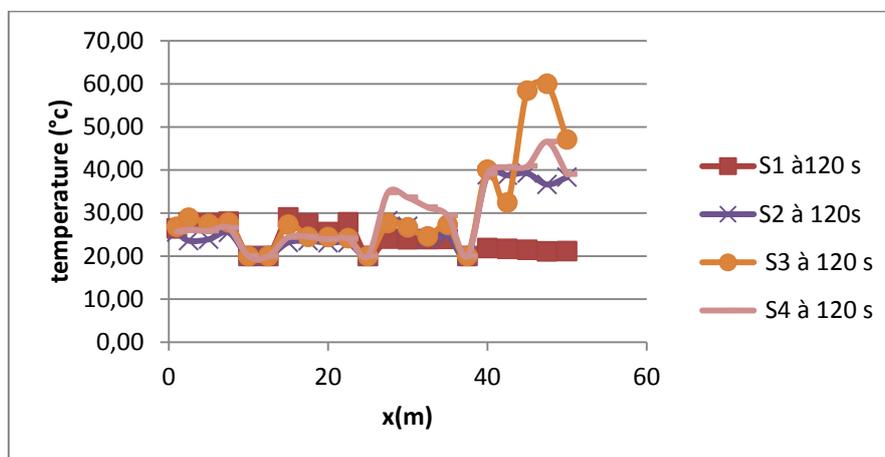


Fig 5.135: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à $t=120s$

5.4. Analyse des résultats du scénario quatre : feu dans la 2^{ème} turbine

Les résultats de ce scénario confirment l'efficacité de la quatrième stratégie avec les évacuateurs pour le désenfumage et l'évacuation des personnes.

5.5. Analyse des résultats du scénario cinq : feu dans la 3^{ème} turbine

5.5.1. La 1^{ère} stratégie :

La stratégie une (1) représente le confinement total de cette installation ou toutes les issues sont fermées excepté la porte d'entrée. On remarque la propagation rapide et opaque des fumées dans toute l'installation après $t = 60s$ seulement. Les températures mesurées sont très élevées et les voies de secours escaliers, couloir conduisant vers la sortie sont bloquées par les fumées. Ce qui rend l'évacuation et le sauvetage très difficile. Ce scénario est critique vu que le feu se déclenche près des escaliers.

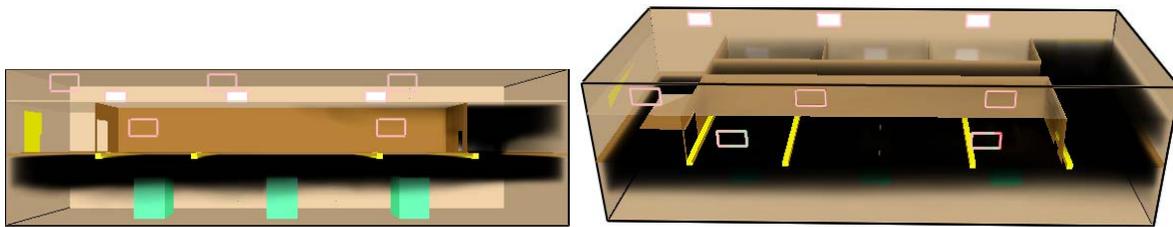


Fig 5.136 propagation de la fumée à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

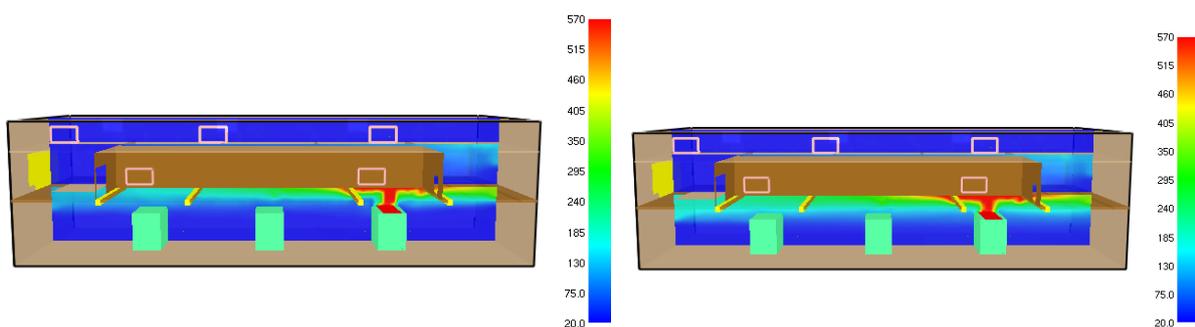


Fig 5.137: distribution de la température à $t = 60s$ et $t = 120s$ pour S1

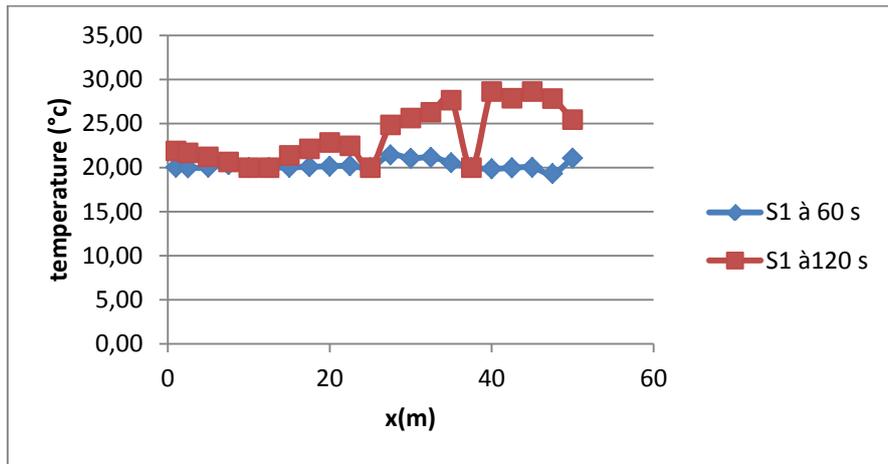


Fig 5.138 : distribution de la température à une hauteur 1.5m à t =60s et t =120s pour S1

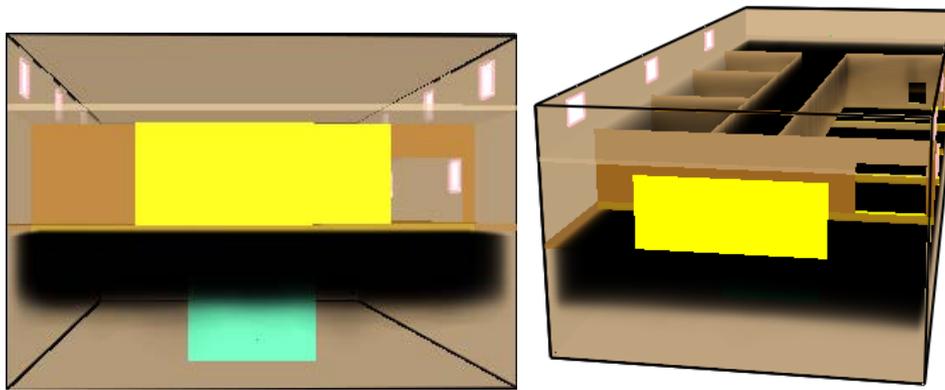


Fig 5.139 : Enfumage de la centrale du coté gauche de la centrale à t = 60s et t = 120s pour S1

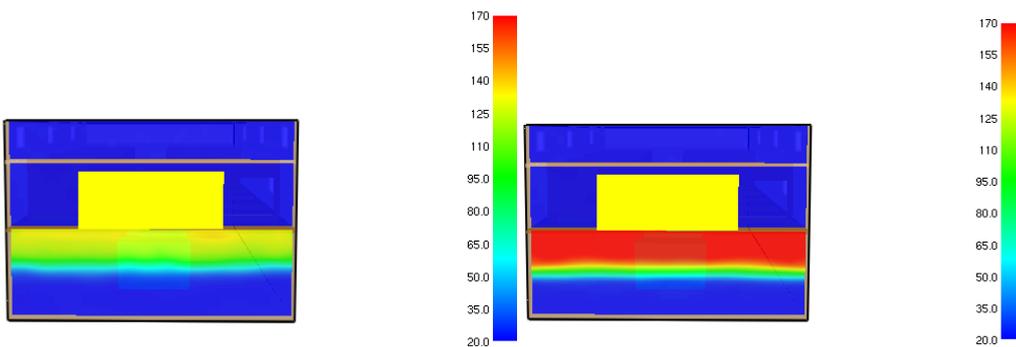


Fig 5.140: Distribution de la température en fonction de la hauteur au coté gauche de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S1

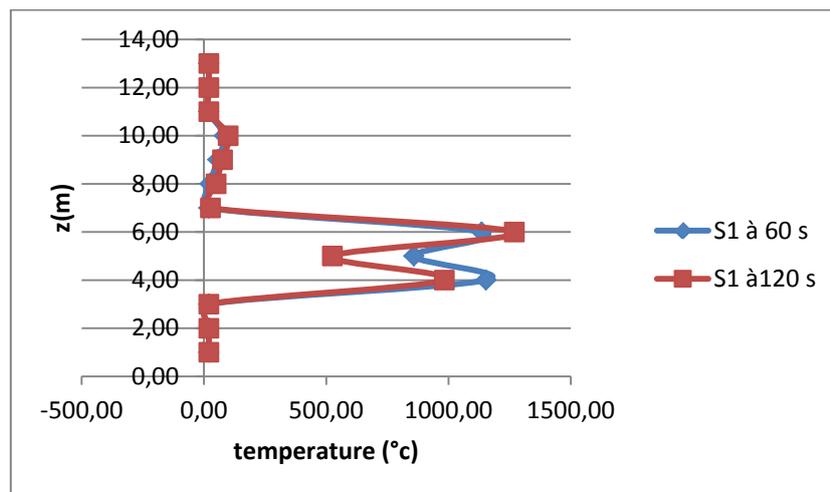


Fig 5.141: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S1

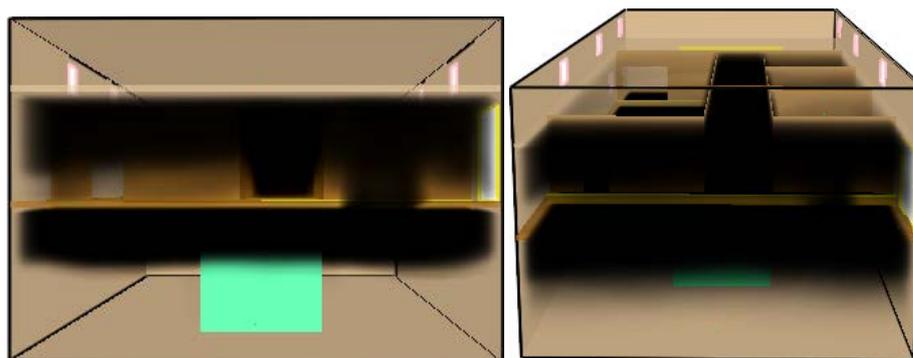


Fig 5.142 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t=120s pour S1

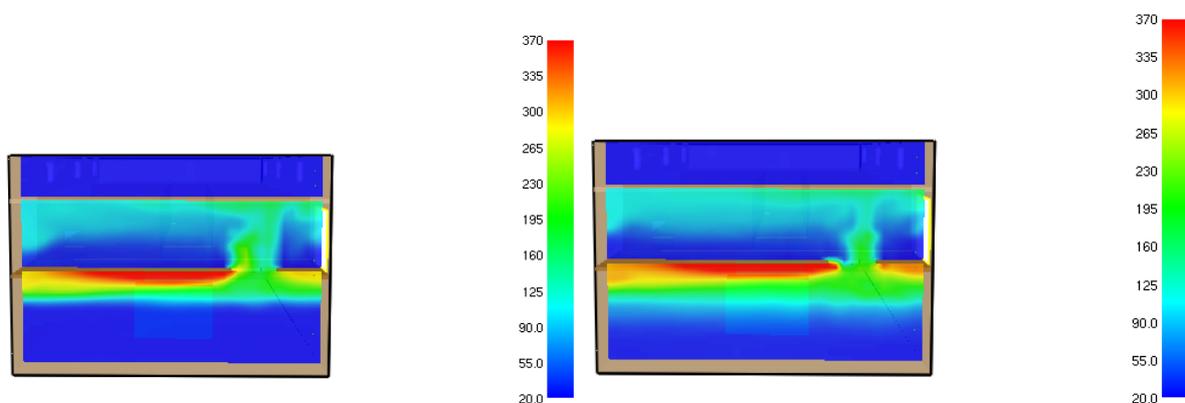


Fig 5.143 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t = 60s et t=120s pour S1

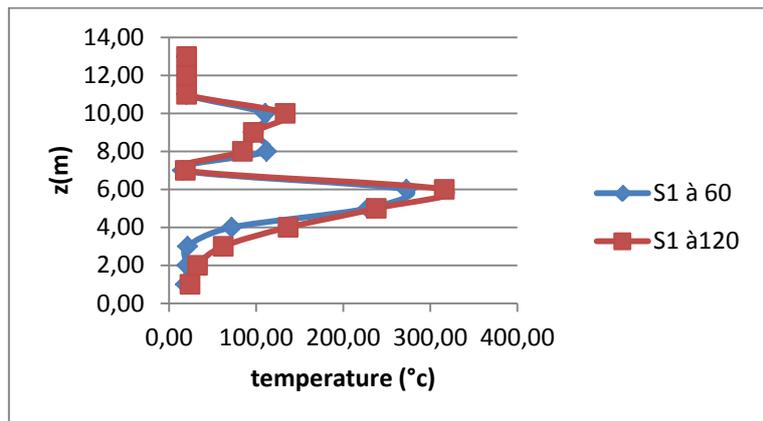


Fig 5.144 : Distribution de la température près de la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S1

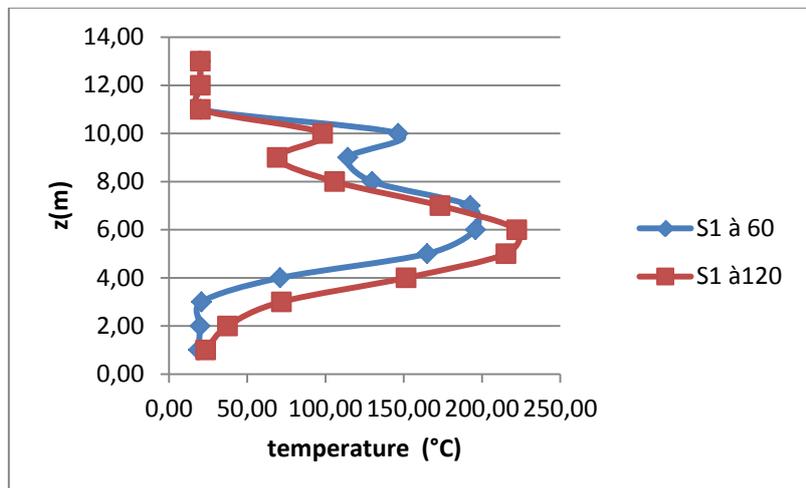


Fig 5.145: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à t = 60s et t=120s pour S1

5.5.2. La 2^{ème} stratégie :

On remarque pour cette stratégie que le deuxième niveau sera envahi par les fumées des deux coté, et les voies d'évacuations sont bloqués (figure 5.146) par la fumée très rapidement. La température enregistrée dans différent points est très élevée, et atteint 70°C pour un mètre de hauteur au milieu de la station figure 5.148, et 50°C près de la porte est dans les escaliers figures 5.154 et 5.155. Les ouvertures ne favorisent pas le désenfumage et l'évacuation des personnes. Cette stratégie est loin d'être utilisé dans ces situations pour le danger qu'elle représente.

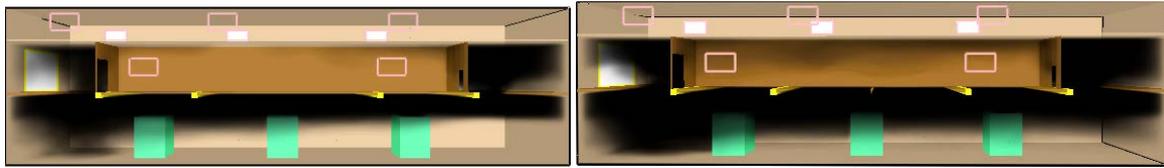


Fig 5.146 propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S2

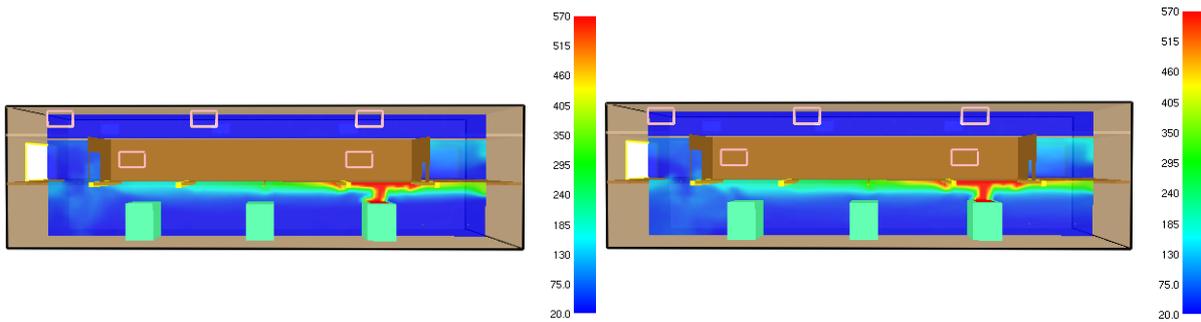


Fig 5.147: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S2

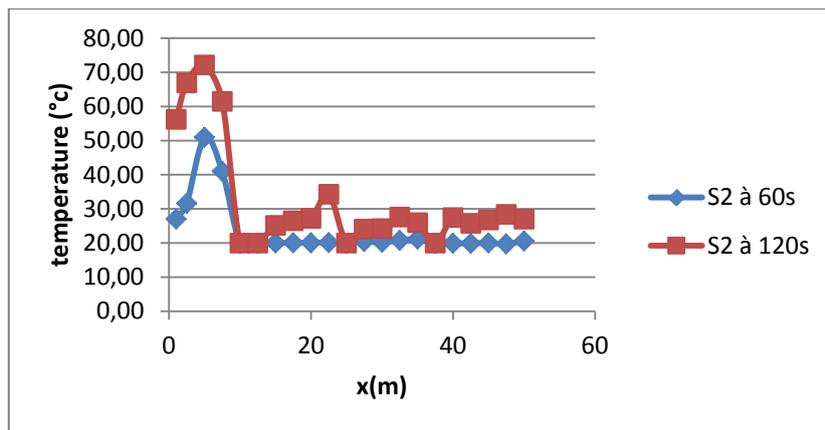


Fig 5.148: distribution de la température à une hauteur 1.5m à t =60s et t =120s pour S2

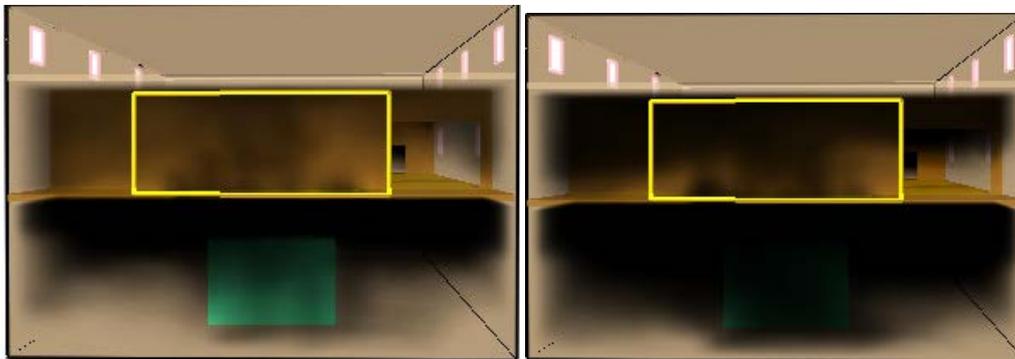


Fig 5.149: Enfumage de la centrale au coté gauche de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S2

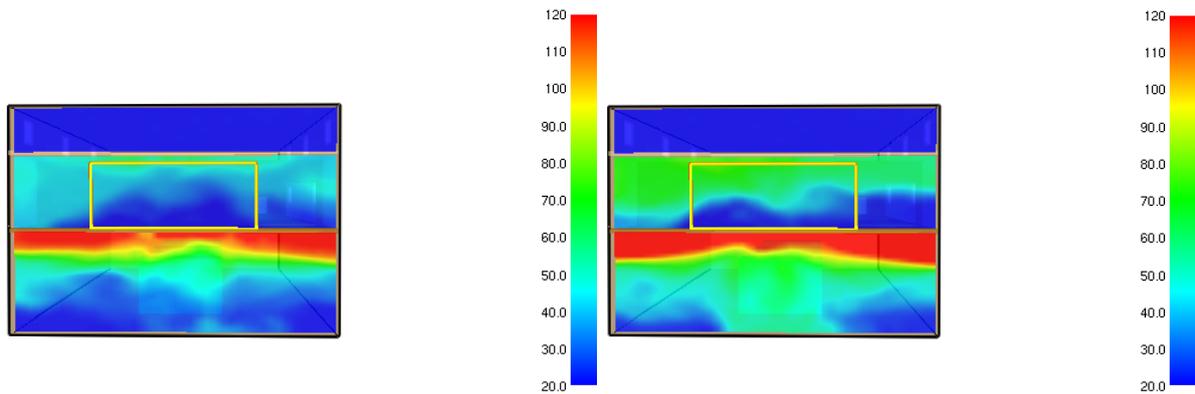


Fig 5.150: Distribution de la température en fonction de la hauteur au coté gauche de la source du feu à t = 60s et t= 120s pour S2

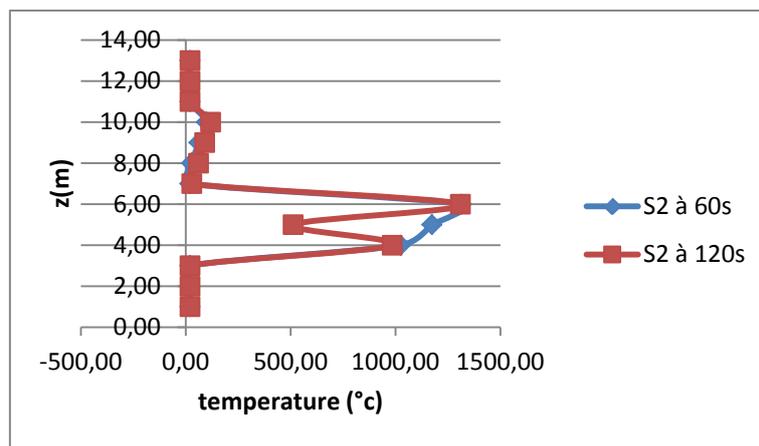


Fig 5.151: Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t =60s et t=120s pour S2

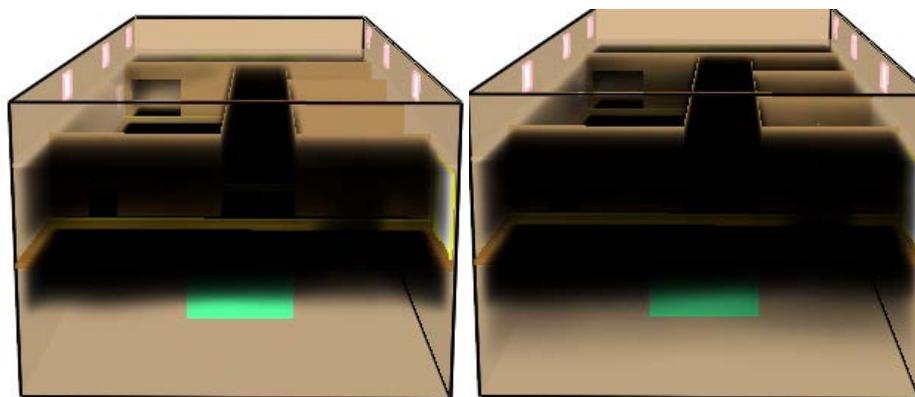


Fig 5.152: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S2

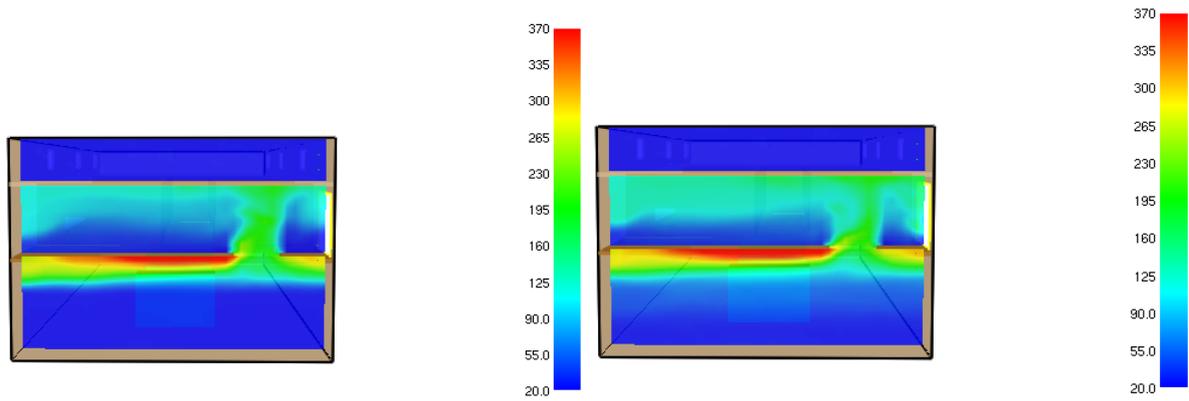


Fig 5.153 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t = 60s et t = 120s pour S2

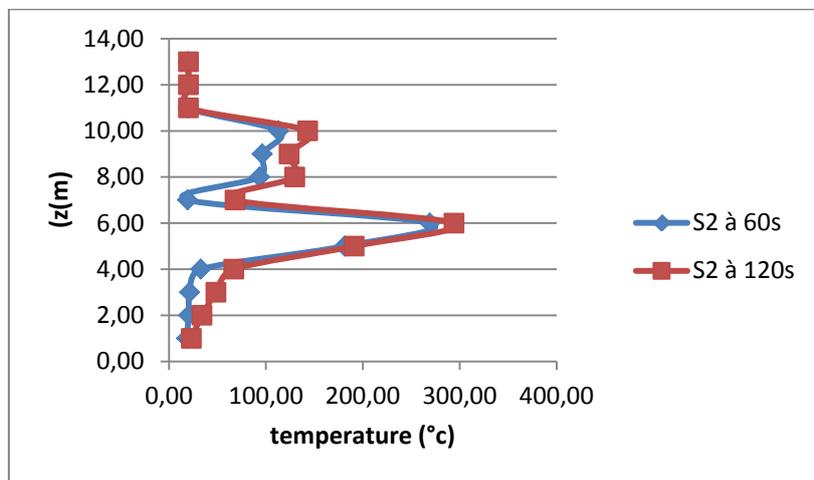


Fig 5.154: Distribution de la température près de la porte de sortie

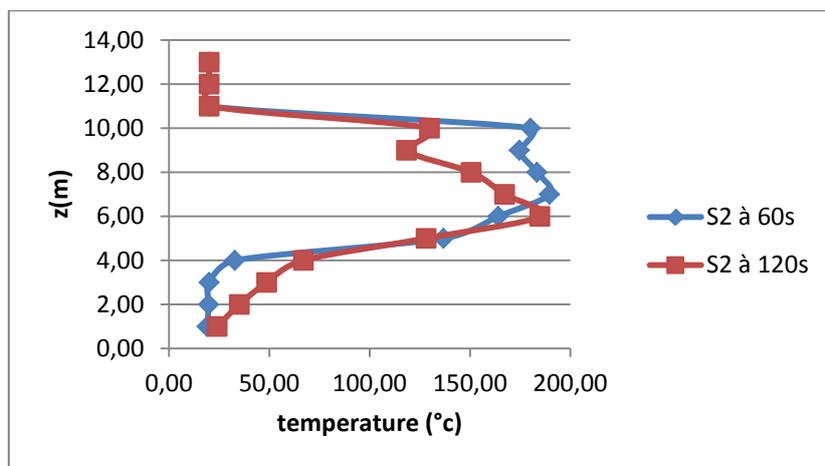


Fig 5.155 : Distribution de la température au milieu des escaliers hjgvhjg

5.5.3. La 3^{ème} stratégie :

Dans cette stratégie des trémies sont suggérées avec des extracteurs dans les murs latéraux. la figure 5.156 on remarque que la fumée se propage vers le coté gauche de l'installation à t=60 s et atteint le hall de déchargement pour traverser les trémies et se retrouve au faux plafond. A t=120s la fumée a envahie la centrale niveau supérieur et inferieur.

La température à 1 m du sol est de 33°C et la même dans tout le niveau inferieur figure 5.158, une valeur bien plus bas que celle enregistré pour la stratégie précédente. Les issues de secours escaliers et porte d'entrée figures 5.164 et 5.165 sont a des températures moyenne de 45°C.

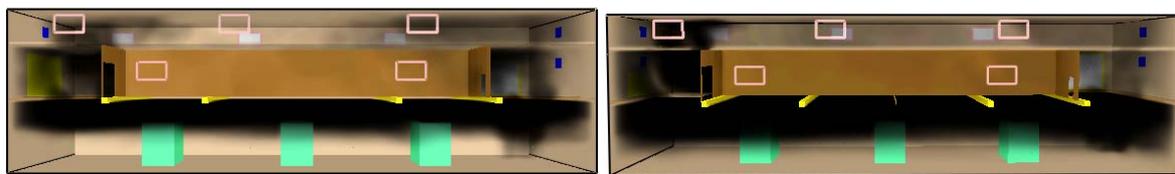


Fig5.156 : propagation de la fumée à t = 60s et t = 120s pour S3

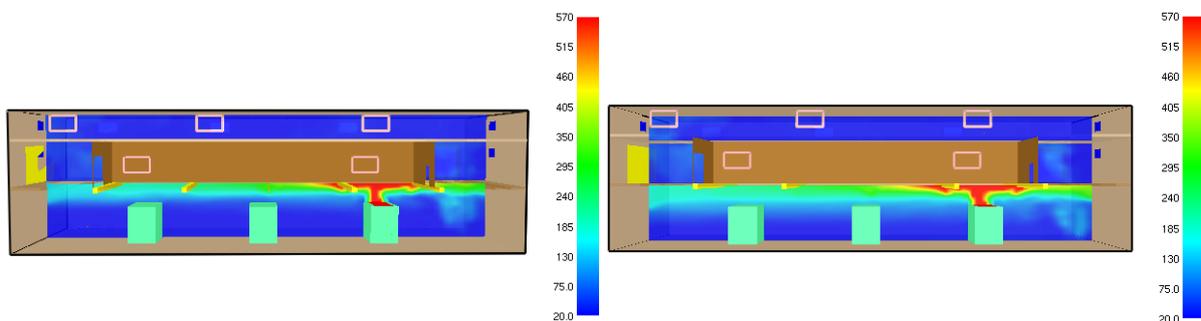


Fig 5.157: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S3

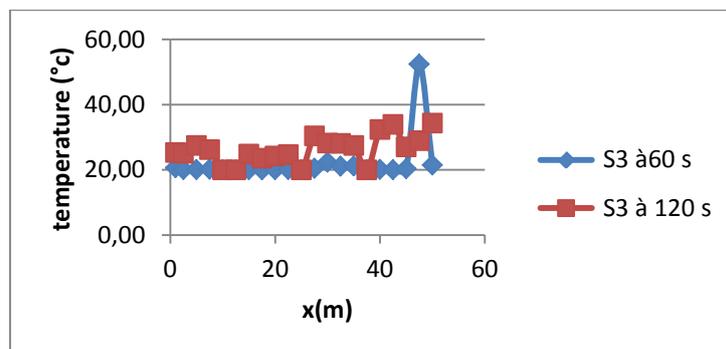


Fig 5.158: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol à t =60s et t =120s pour S3

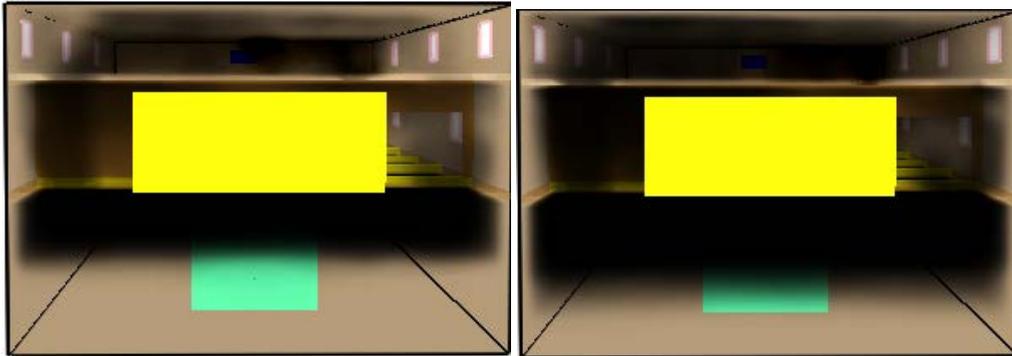


Fig 5.159: Enfumage de la centrale près de la source de chaleur à t = 60s et t = 120s pour S3

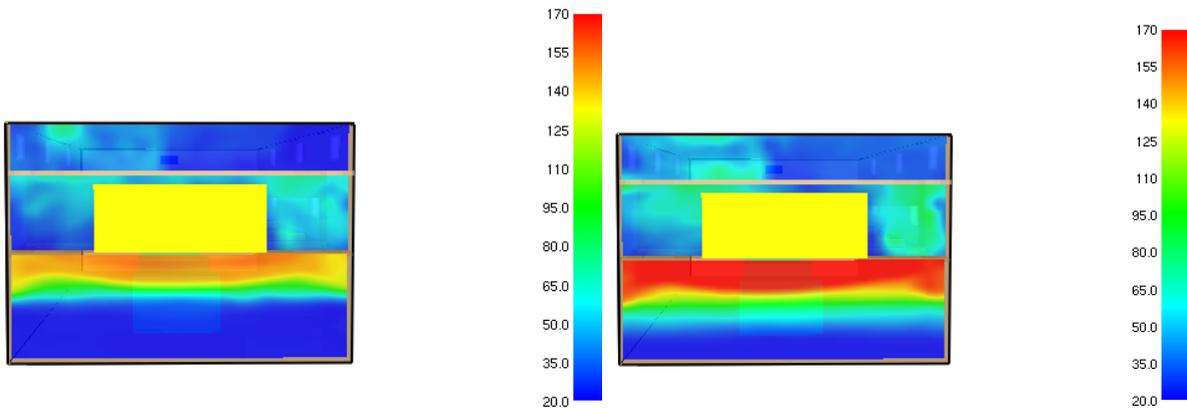


Fig 5.160 : Distribution de la température en fonction de la hauteur près de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S3

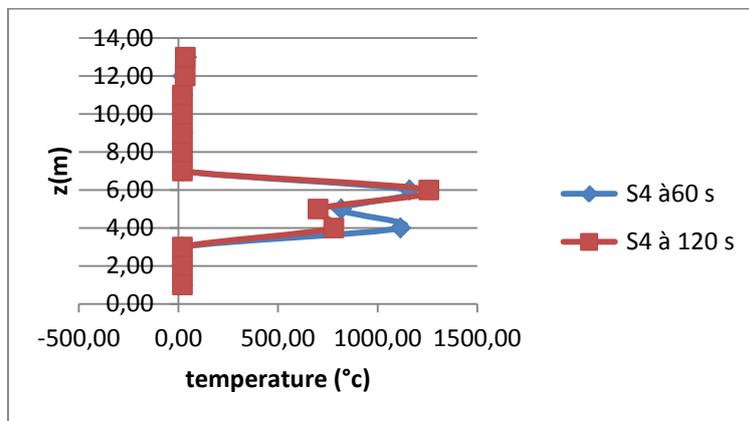


Fig5.161 : Distribution de la température en fonction de la hauteur au coté gauche de la source du feu à t = 60s et t = 120s pour S3

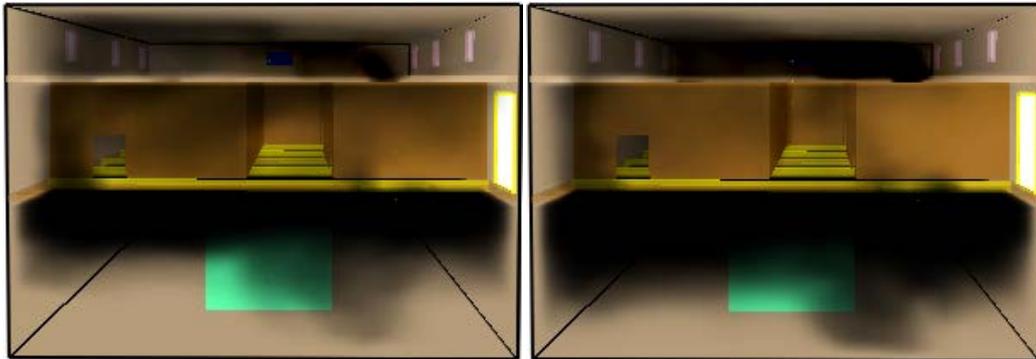


Fig 5.162: Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S3

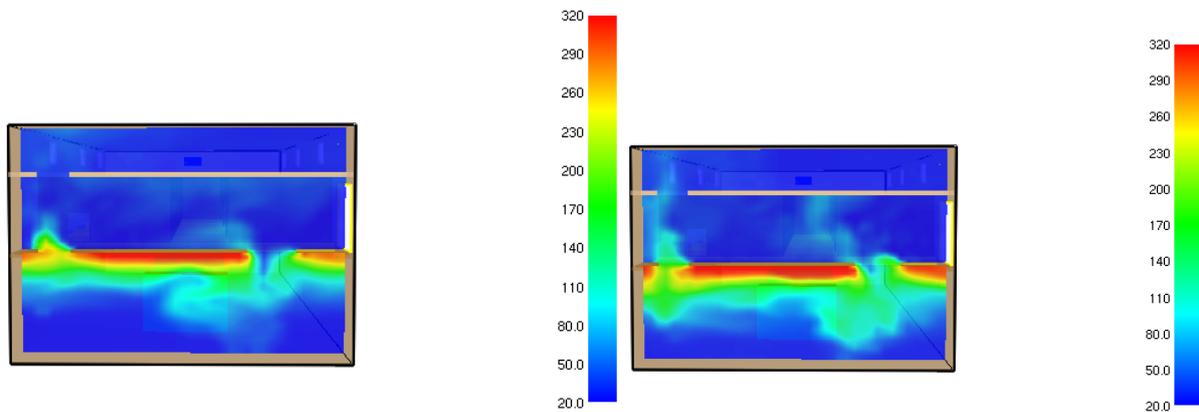


Fig 5.163: Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t = 60s et t = 120s pour S3

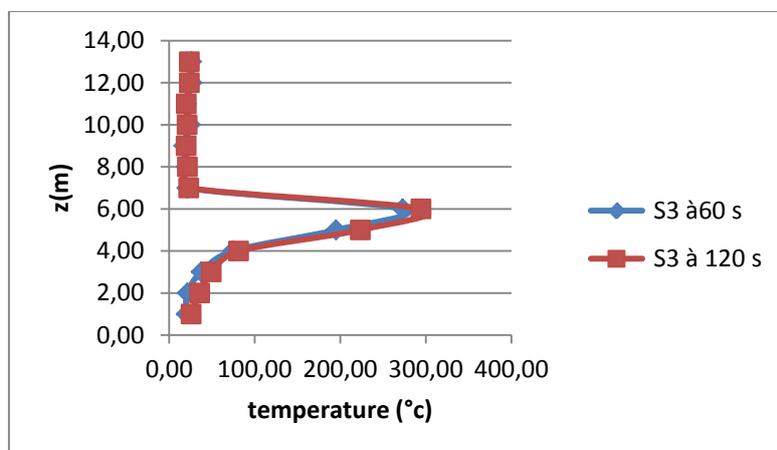


Fig 5.164: Distribution de la température près de la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour S3

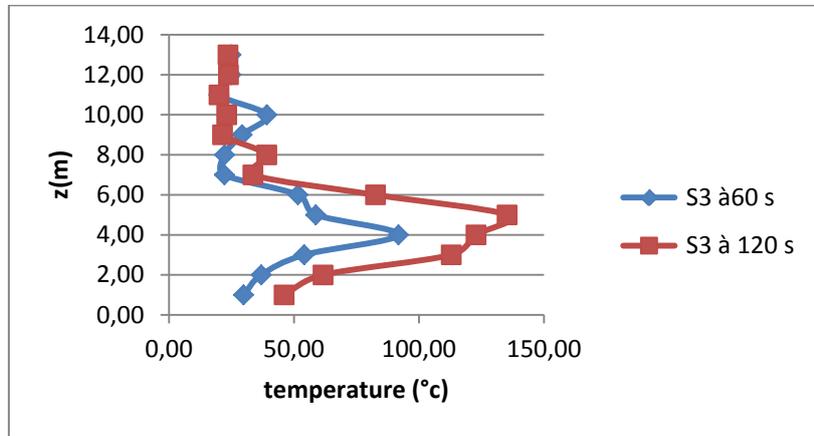


Fig5.165 : Distribution de la température au milieu de l’escalier sur toute la hauteur à t = 60s et t = 120s pour S3

5.5.4. La 4^{eme} stratégie :

Dans cette stratégie la fumée s’écoule par les évacuateurs qui traversent l’installation de bas en haut pour se propager du sol au faux plafond. Ainsi le deuxième niveau reste à l’abri des fumées à t= 60s et t= 120s donc aide l’évacuation du personnel. Une diminution de la température est constatée ce qui signifie que cette stratégie est la solution la plus approprié.

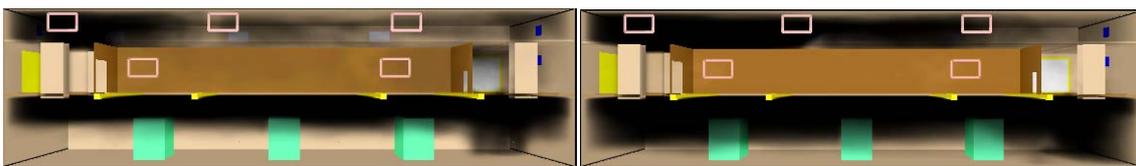


Fig 5.166 propagation de la fumée à t = 90s et t = 120s pour S4

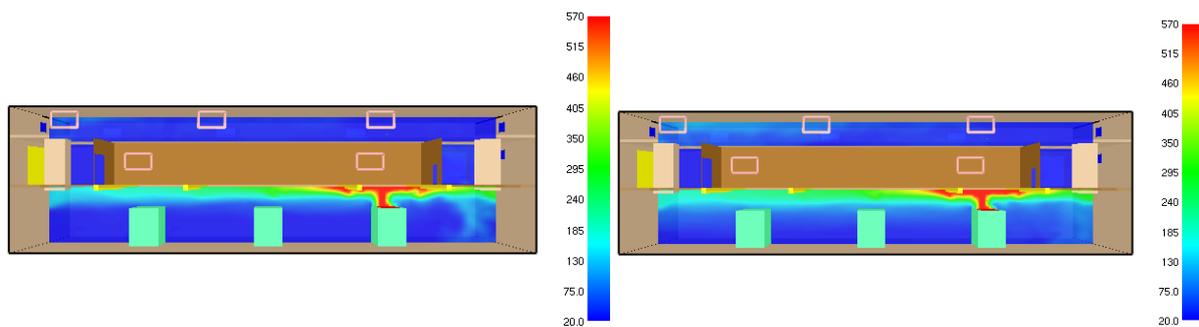


Fig 5.167: distribution de la température à t =60s et t =120s pour S4

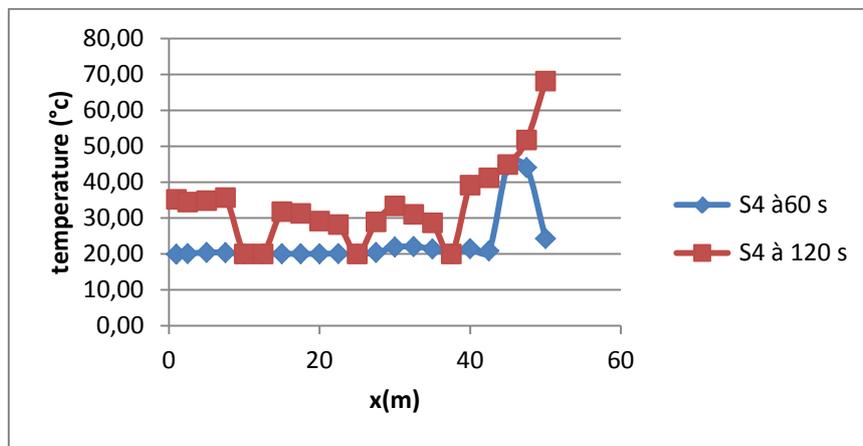


Fig 5.168: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur à t =60s et t =120s pour S4

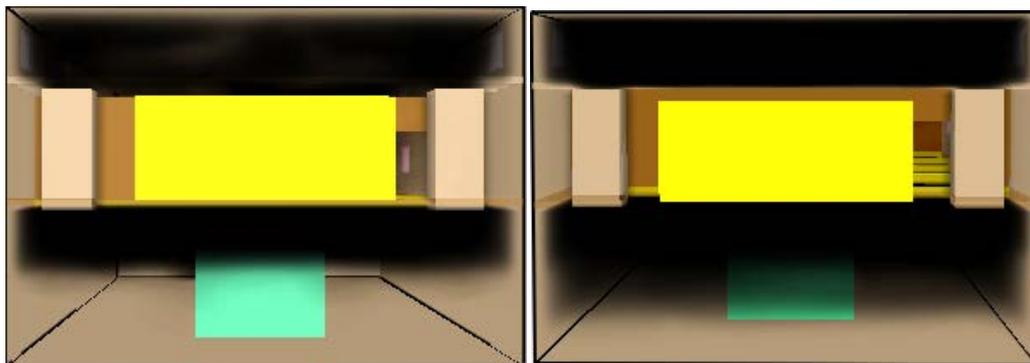


Fig 5.169: Enfumage de la centrale au coté gauche de la source de chaleur à t =60s et t =120s pour S4

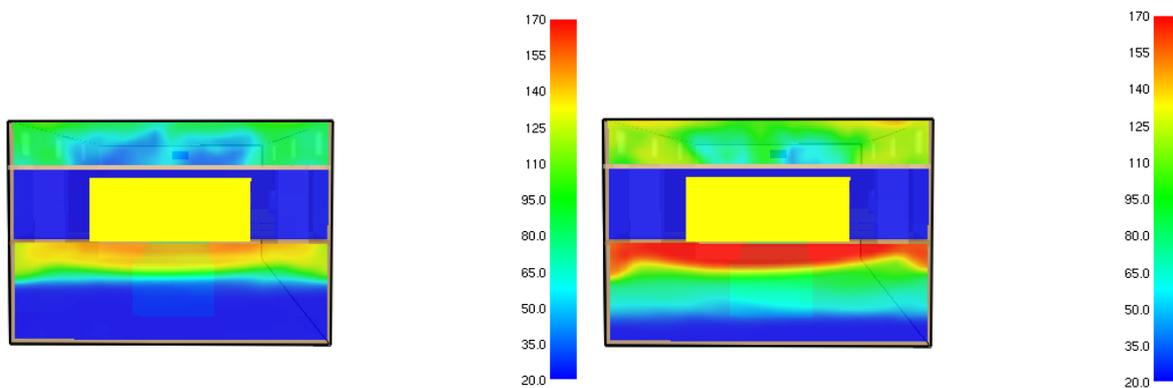


Fig 5.170: Distribution de la température en fonction de la hauteur au coté gauche de la source du feu à t =60s et t =120s pour S4

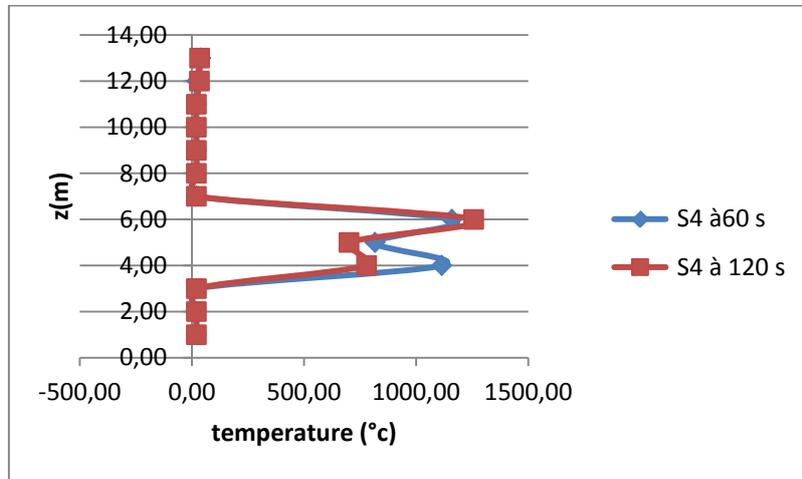


Fig 5.171: Distribution de la température en fonction de la hauteur au coté gauche de la source du feu à t =60s et t=120s pour S4

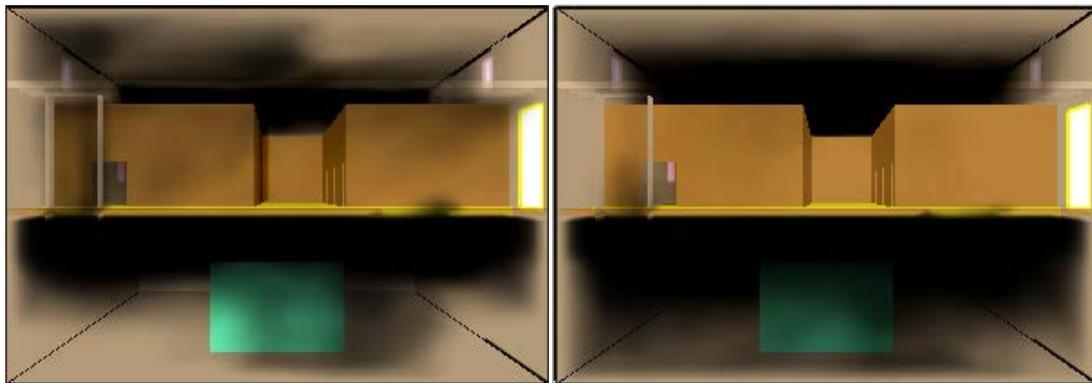


Fig 5.172 : Enfumage de la centrale à une position devant la porte de sortie à t = 60s et t = 120s pour s4

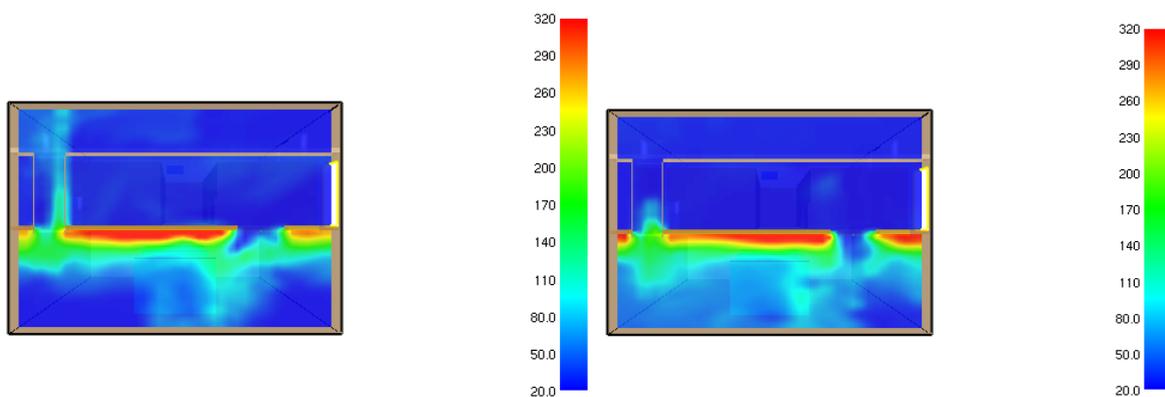


Fig5.173 : Distribution de la température en fonction de la hauteur devant la sortie à t =60s et t =120s pour S4

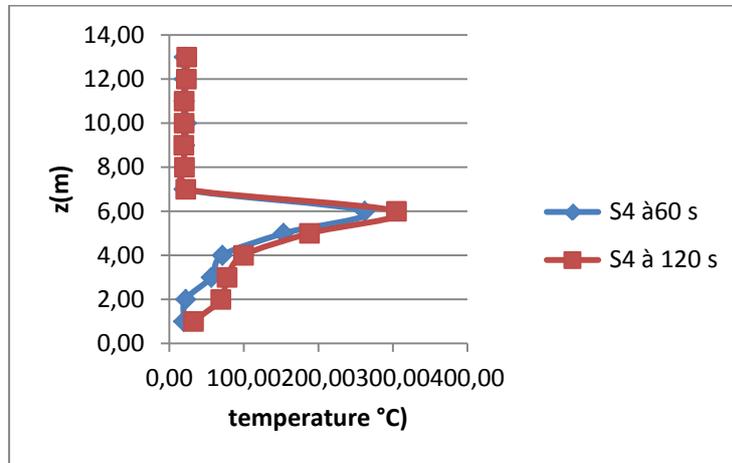


Fig 5.174: Distribution de la température près de la porte de sortie à t =60s et t =120s pour S4

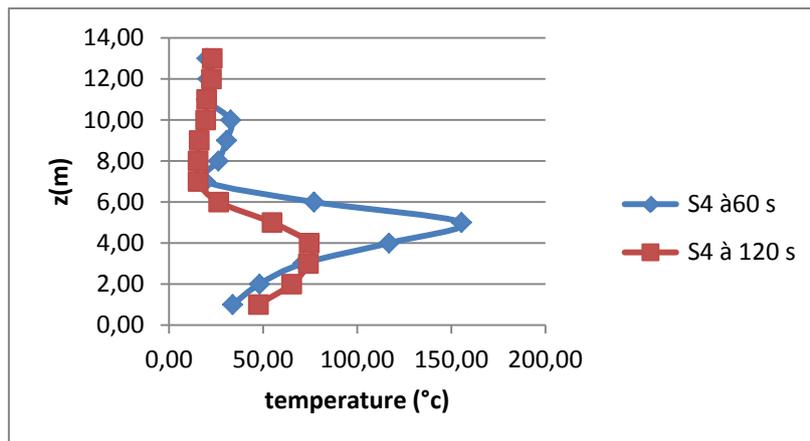


Fig 5.175: Distribution de la température au milieu de l'escalier sur toute la hauteur à t =60s et t=120s pour S4

les résultats obtenus précédemment permettent la comparaison des profils de température pour les 4 stratégies proposées au temps t= 60s et t= 120 s.

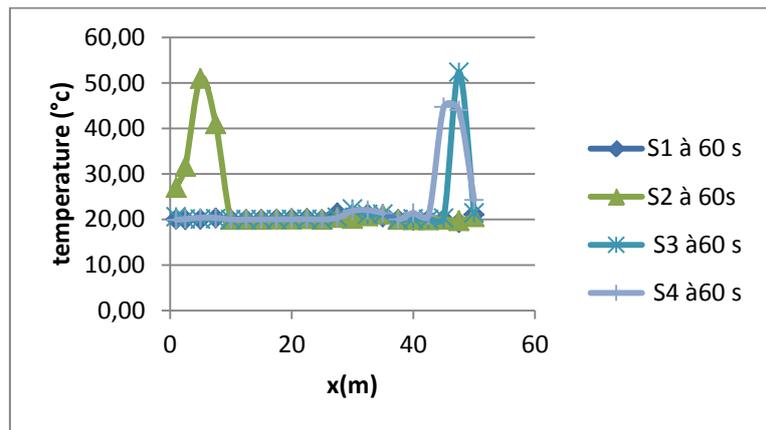


Fig 5.176: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à t = 60s

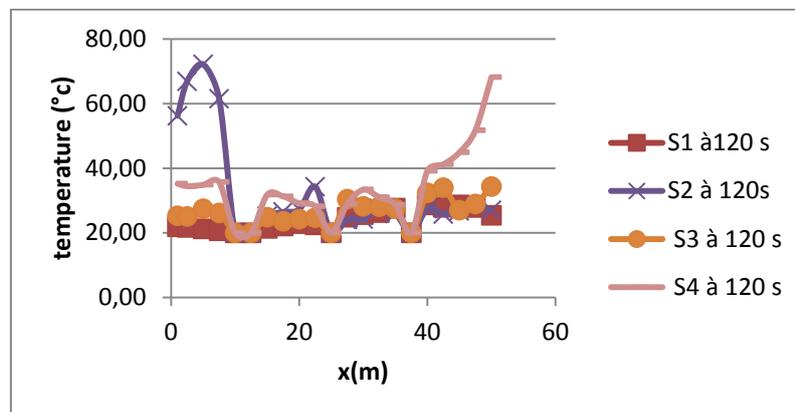


Fig 5.177: Distribution de la température a une hauteur 1.5 du sol sur toute la longueur pour les 4 stratégies étudiées à t=120s

Des figures (5.176) et (5.177) qui représentent la distribution de la température dans la centrale on peut voir que la deuxième stratégie avec tous les accès ouverts est favorable mais reste l'inconvénient de la fumée qui se propage rapidement dans la salle de contrôle.

La stratégie la plus adéquate est l'utilisation des évacuateurs, qui permet le désenfumage du niveau inférieur rapidement tout en gardant le niveau supérieur sécurisé, On remarque que la fumée atteint les voies de secours mais dans des temps plus long se qui permet une évacuation efficace.

CONCLUSION GENERALE :

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire a mis en évidence la contribution de la modélisation numérique dans la compréhension et la prédiction du mouvement des fumées qui sont indispensables pour établir une stratégie efficace de désenfumage qui permet d'assurer la sécurité des personnes lors d'un incendie d'une centrale hydro électrique. L'objectif de cette étude était de comprendre le phénomène de propagation des fumées et elle nous a permis de connaître l'importance de la position des voies de communication des différents niveaux de cette centrale. En effet, dans la présente étude, ces voies se situent au plafond sous lequel les fumées ont une tendance naturelle à se stratifier, cependant les débits qui franchissent les trémies perturbent cette stratification naturelle et la rende difficile.

Plusieurs stratégies de désenfumage pour différents scénarios ont été testées, ces différentes stratégies ont consisté principalement à l'utilisation des trémies, des extracteurs et en plus des évacuateurs qui traversent la centrale de bas en haut. Il est à noter que, pour les scénarios le feu se situe dans le niveau inférieur de la centrale à des positions différentes. Chacune de ces stratégies a des avantages et des inconvénients.

Le cas où les entrées sont toutes ouvertes présente un cas favorable, mais la sécurité des personnes n'est pas établie puisque le deuxième niveau sera envahi par les fumées rapidement ainsi que les voies d'évacuation qui sont les escaliers,

L'extraction par des trémies au sol et des extracteurs sur les murs latéraux pour le niveau occupé par le personnel et le niveau supérieur celui du faux plafond a permis le maintien de la stratification de la couche de fumées sous le plafond, ce qui était recherché, et d'une baisse de température assez satisfaisante au niveau inférieur, mais on note toujours que la fumée se propage et traverse le couloir du deuxième niveau et les escalier. L'entrée de la centrale induit des courants d'air qui descendent par les escaliers et qui perturbent la couche de fumée suite à une augmentation des niveaux de turbulence causé par les ouvertures

Le cas le plus intéressant et celui où l'extraction se fait par des évacuateurs et des extracteurs, non seulement on a une baisse de température importante dans la centrale mais l'avantage est

de garder le deuxième niveau loin des fumées et avoir plus de temps pour une évacuation des personnes par les escaliers avant la remontée des fumées et de la chaleur au niveau supérieur.

Finally, the study has shown the importance of smoke extractors on the stratification of smoke and the protection of people in the central part of the installation with two levels or one of them is underground. The maintenance of the stratification of smoke under the ceiling and their evacuation without spreading, allows the slowing down and the protection of communication routes between the two levels of the station before the rise of smoke and ensures the complete safety of this level. It is therefore important to take into account these results to carry out more research in this field to predict the most effective locations of smoke extractors according to the type and location of fire triggering.

Additional studies on the behavior of fires in confined and ventilated environments are still indispensable for the improvement of safety studies in industrial premises. They will allow the generation of a data base on the effect of confinement, the ventilation regime and the shape of openings between compartments on the flow of smoke generated by the fire.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] M. G. Vega, K. M. Diaz, J. M. F. Oro, R. B. Tajadura, C. S. Morros, "Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Memorial Tunnel case". *Tunneling and Underground Space Technology Journal*, vol 23, (2008), 539–551.
- [2] ventilation. Centre d'études des tunnels, dossier pilote des tunnels ; Equipements ventilation novembre 2003
- [3] R. Djedjig "Etude numérique du désenfumage en cas d'incendie dans une station de métro à deux niveaux", PFE, ENP, Algérie, 2009
- [4] M. Hadj Nacer, "Etude numérique sur la propagation des fumées et le désenfumage en cas d'incendie dans une station de métro", PFE, ENP, Algérie, 2008.
- [5] B. Debray, N. Gobeau, F. Waymel, rapport d'étude "Incendie en milieu confiné", INERIS, 2007.
- [6] L. Gay, E. Wizenne Sciences de l'ingénieur en incendie. Département Mécanique des Fluides, Energies et Environnement EDF France, août 2010
- [7] L.H. Hu, R. Huo, W. Peng, W.K. Chow, R.X. Yang, "On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires" , *Tunneling and Underground Space Technology Journal*, vol 21, (2006), 650–655.
- [8]] H. Kurioka, Y. Oka, H. Satoh, S. Sugawa, "Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels", *Fire Safety Journal*, vol 38(4), (2003), 319–340.
- [9] L.H. Hu, W. Peng, R. Huo Critical "wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel", *Journal of Hazardous Materials* vol 150, (2008), 68–75
- [10]] O. Vauquelin, " Parametrical study of the back flow occurrence in case of a buoyant release into a rectangular channel", *Exp. Therm. Fluid Sci.* 29, (2005), 725–731.
- [11]] P.H. Thomas, "The Movement of Buoyant Fluid Against a Stream and the Venting of Underground Fires", *Fire Research Note No. 351*, Fire Research Station, Watford, UK, 1968.
- [12] N.H. Danziger, W.D. Kennedy, "Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels", in: *Proceedings of the Fourth International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, York, UK, Mar. 23–25, (1982), p. 169–186.

-
- [13] Y. Oka, G.T. Atkinson, "Control of smoke flow in tunnel fires", *Fire Safety Journal*, vol 25, (1995), 305–322.
- [14] Y. Wu, M.Z.A. Bakar, "of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems- a study of the critical velocity", *Fire Safety Journal*, vol 35, (2000), 363–390.
- [15] J.P. Kunsch, "Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel", *Fire Safety Journal*, vol 37, (2002), 67–81.
- [16] O. Vauquelin, "Parametrical study of the back flow occurrence in case of a buoyant release into a rectangular channel", *Exp. Therm. Fluid Sci*, 29, (2005), 725–731.
- [17] H. Ingason , A. Lonnermark," Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnel", *Fire Safety Journal*, vol 40, (2005), 646–668
- [18] J. S. Roh, H. S. Ryou, D. H. Kim, W.S. Jung, Y. J. Jang," Critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation", *Tunnelling and Underground Space Technology Journal*, vol 22, (2007), 262–271
- [19] T.T. Aralt , A.R. Nilsen, "Automatic fire detection in road traffic tunnels". *Tunnelling and Underground Space Technology Journal*, vol 24, (2009), 75–83
- [20] Kayılı, Serkan, "CFD simulation of fire and ventilation in the stations of underground transportation systems", Thesis of master, Middle east technical university, Turquie, June (2005).
- [21] B. Karlsson , J. G Quintiere, " Enclosure Fire Dynamics" , by CRC Press LLC USA,(2000)
- [22] D. Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", 2nd edition Wiley, (1999)
- [23] F. CRETIN, A. CARRAU, "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 , INERIS (2000)
- [24] K. Mc.Grattan, "Fire Dynamics Simulator",(Version 5), User's Guide", National Institute of Standards and Technology, Février (2009).
- [25] K. McGrattan, "Fire Dynamics Simulator" (Version 5), Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model", National Institute of Standrads and Technology, Février (2009).

Annexe 1

Le développement des équations du chapitre 3

Considérant la figure suivante :

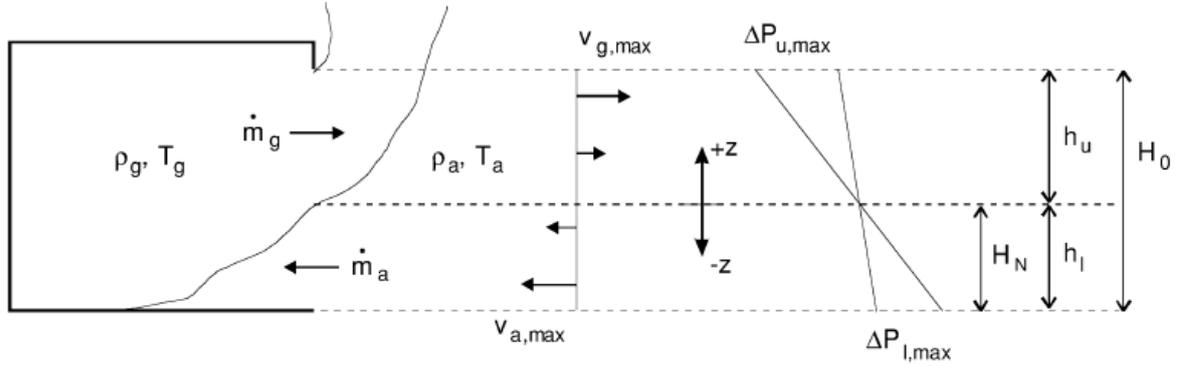


Fig. un confinement avec une température uniforme Tg plus élevée que Ta

$$\dot{m} = C_d \int_A \rho V dA \quad (1)$$

Si on met, $dA = W \cdot dz$ avec W est la largeur de l'ouverture, pour notre cas la vitesse qui coule à travers l'ouverture est en fonction de la hauteur, mais on la supposant constante à travers la largeur à n'importe quel hauteur, le débit massique à travers une certaine hauteur z de l'ouverture, du plan neutre :

$$\dot{m} = C_d \int_0^z W \rho_g V(z) dz \quad (2)$$

De l'équation précédente, on peut écrire ce débit massique des gaz chauds qui sort de l'ouverture :

$$\dot{m}_g = C_d \int_0^{h_u} W \rho_g V_g(z) dz \quad (3)$$

Les limites de l'intégrale varie du plan neutre ($z=0$), au point haut de l'ouverture ($z= h_u$).

Substituant l'équation : $V_g(z) = \sqrt{\frac{2Z(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}}$, dans l'équation précédente on obtient :

$$\dot{m}_g = C_d \int_0^{h_u} W \rho_g \sqrt{\frac{2Z(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} dz \quad (4)$$

Elle peut être réécrite en mettant les constante de coté et celle qui varie avec Z d'un coté :

$$\dot{m}_g = C_d W \rho_g \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} \int_0^{h_u} \sqrt{Z} dz \quad (5)$$

Cette équation devient après la résolution de l'intégrale :

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \rho_g \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} h_u^{3/2} \quad (6)$$

De la même manière on peut écrire l'expression du débit massique d'air froid qui coule à travers l'ouverture :

$$\dot{m}_a = C_d \int_0^{h_l} W \rho_a V_a(z) dz \quad (7)$$

Avec les limites de l'intégration, du plan neutre ($z = 0$) au point bas de l'ouverture ($z = l$), substituant on obtient :

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d W \rho_a \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} h_l^{3/2} \quad (8)$$

On a $h_l = H_0 - H_N$ alors :

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \rho_g \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} (H_0 - H_N)^{3/2} \quad (9)$$

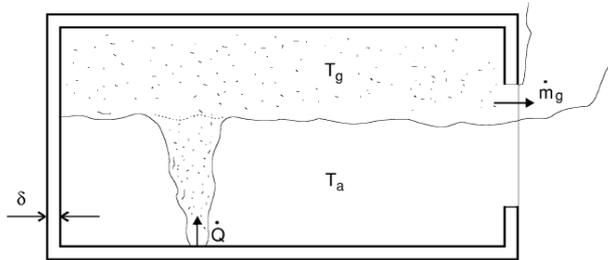
La densité peut être exprimée par la température d'après la loi des gaz parfait :

$$\rho_a T_a = \rho_g T_g \quad (10)$$

Et l'expression du débit :

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \rho_a \sqrt{2g \frac{T_a}{T_g} \left(1 - \frac{T_a}{T_g}\right)} (H_0 - H_N)^{3/2} \quad (11)$$

Le bilan d'énergie pour un compartiment s'écrit d'après la figure présentée :



Le taux d'énergie libéré dans le compartiment = le taux d'énergie perdu du au débit du fluide qui s'écoule à travers l'ouverture + le taux de chaleur perdu par les limites du compartiment

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_g - T_a) + \dot{q}_{perdu} \quad (12)$$

Et sachant que :

$$\dot{q}_{perdu} = h_k A_T (T_g - T_a) \quad (13)$$

Alors :

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T_g - T_a) + h_k A_T (T_g - T_a) \quad (14)$$

L'équation précédente peut être écrite pour $\Delta T = (T_g - T_a)$:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p + h_k A_T} \quad (15)$$

L'équation devient :

$$\frac{\Delta T}{T_a} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p T_a + h_k A_T T_a} = \frac{\dot{Q} / \dot{m}_g c_p T_a}{1 + \frac{h_k A_T}{\dot{m}_g c_p}} \quad (16)$$

Annexe 2

Prenant à titre d'exemple, un compartiment en feu, avec une porte ouverte d'une largeur de 1m et une hauteur de 2m, la fumée s'écoule à travers la porte, la couche de fumée observée est à une hauteur 1.5m du sol, et la température du gaz 300°C. D'après les équations :

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \rho_g \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} (H_0 - H_N)^{3/2} \quad (17)$$

Et :

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d W \rho_a \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} (H_N - H_D)^{1/2} \left(H_N - \frac{1}{2} H_D \right) \quad (18)$$

On obtient :

$$\sqrt{\rho_a} (H_0 - H_N)^{3/2} = \sqrt{\rho_a} (H_N - H_D)^{1/2} \left(H_N - \frac{1}{2} H_D \right) \quad (19)$$

Posant $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ et utilisant l'équation : $T = \frac{353}{\rho}$ et $\rho = \frac{353}{T}$

On trouve : $\rho_g = \frac{353}{(300+273)} = 0.616 \text{ kg/m}^3$ introduisant cette valeur est solvant pour

$$H_N \text{ donne : } H_N = \frac{\sqrt{0.616/1.2} (2 - H_N)^{3/2}}{(H_N - 1.5)^{1/2}} - \frac{1}{2} \cdot 1.5 \quad (20)$$

Solvant cette équation par itérations donne : $H_N = 1.512$

De l'équation qui donne le débit massique vers l'extérieur à travers l'ouverture, pour un $C_d = 0.7$:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \rho_g \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} (H_0 - H_N)^{3/2} \quad (21)$$

On obtient : $\dot{m}_g = 0.423$

Et le débit à travers l'ouverture de l'équation :

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d W \rho_a \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} (H_N - H_D)^{1/2} \left(H_N - \frac{1}{2} H_D \right) \quad (22)$$

On obtient : $\dot{m}_a = 0.429$

La différence entre le débit massique qui entre et qui sort est due au terme H_N .

Annexe 3

Ci-après un exemple d'un fichier d'entrée écrit pour le cas sans ouvertures dont le feu est dans l'angle :

```
&HEAD CHID='SOA', TITLE='centrale' /
&MESH IJK=100,40,56, XB=0.0,50.0,-10.0,10.0,0.0,14.0 /
&TIME T_END=120.0/
&MISC SURF_DEFAULT='BRICK WALL'
&MATL ID      = 'BRICK'
    CONDUCTIVITY = 0.69
    SPECIFIC_HEAT = 0.84
    DENSITY = 1600. /
&SURF ID      = 'BRICK WALL'
    MATL_ID = 'BRICK'
    COLOR = 'TAN'
    BACKING = 'EXPOSED'
    THICKNESS = 0.50 /
&OBST XB=0.0,8.0,-10.0,10.0,6.2,6.5 ,COLOR='BRICK',TRANSPARENCY=0.4 / PLAFOND
&OBST XB=8.4,16.4,-10.0,10.0,6.2,6.5 ,COLOR='BRICK',TRANSPARENCY=0.4 /
&OBST XB=16.8,24.8,-10.0,10.0,6.2,6.5 ,COLOR='BRICK',TRANSPARENCY=0.4 /
&OBST XB=25.2,33.2,-10.0,10.0,6.2,6.5 ,COLOR='BRICK',TRANSPARENCY=0.4 /
&OBST XB=33.6,41.6,-10.0,10.0,6.2,6.5 ,COLOR='BRICK',TRANSPARENCY=0.4 /
&OBST XB=42.0,50.0,-10.0,10.0,6.2,6.5 ,COLOR='BRICK',TRANSPARENCY=0.4 /
&OBST XB=8.0,8.4,-10.0,10.0,6.0,6.5 ,COLOR='YELLOW'/ les supp
&OBST XB=16.4,16.8,-10.0,10.0,6.0,6.5 ,COLOR='YELLOW'/ les supp
&OBST XB=24.8,25.2,-10.0,10.0,6.0,6.5 ,COLOR='YELLOW' / les supp
&OBST XB=33.2,33.6,-10.0,10.0,6.0,6.5 ,COLOR='YELLOW'/ les supp
&OBST XB=41.6,42.0,-10.0,10.0,6.0,6.5 ,COLOR='YELLOW'/ les supp
&OBST XB=0.0,50.0,-10.0,10.0,11.0,11.2 ,COLOR='TAN',TRANSPARENCY=0.6/ FAUX PLAFOND
&HOLE XB= 44.5,48.5,4.0,7.0,6.0,7.0 / PORTE ESCALIER
&VENT XB= 4.0,6.5,-10.0,-10.0,12.0,13.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE
&VENT XB= 18.0,20.5,-10.0,-10.0,12.0,13.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE
```

&VENT XB= 34.0,36.5,-10.0,-10.0,12.0,13.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE
&VENT XB= 4.0,6.5,10.0,10.0,12.0,13.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE
&VENT XB= 18.0,20.5,10.0,10.0,12.0,13.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE
&VENT XB= 34.0,36.5,10.0,10.0,12.0,13.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE
&VENT XB= 44.0,49.0,10.0,10.0,6.5,10.5,COLOR='YELLOW',SURF_ID = 'OPEN'/PORTE
&OBST XB=10.0,13.0,-3.0,3.0,0.0,4.0,COLOR='SEA GREEN' /TURBINE
&OBST XB=23.0,26.0,-3.0,3.0,0.0,4.0,COLOR='SEA GREEN' /TURBINE
&OBST XB=36.0,39.0,-3.0,3.0,0.0,4.0,COLOR='SEA GREEN' /TURBINE
&OBST XB=8.0,41.0,-1.0,-1.2,6.5,11.0,COLOR='BRICK' / MUR 1
&OBST XB=8.0,41.0,3.0,3.2,6.5,11.0,COLOR='BRICK' / MUR 2
&OBST XB=8.0,8.1,-10.0,10.0,6.5,11.0,COLOR='BRICK' / MUR ELEVATEUR
&OBST XB=19.0,19.2,3.2,10.0,6.5,11.0,COLOR='BRICK' / CHAMB
&OBST XB=30.0,30.2,3.2,10.0,6.5,11.0,COLOR='BRICK' / CHAMB
&OBST XB=41.0,41.2,3.2,10.0,6.5,11.0,COLOR='BRICK' / CHAMB
&OBST XB=41.0,41.2,-10.0,-1.0,6.5,11.0,COLOR='BRICK' / CHAMB
&HOLE XB= 41.0,41.3,-8.0,-6.5,6.5,8.5 / PORTE CHM DE MACHINE
&HOLE XB= 7.9,8.3,-9.5,-5.5,6.5,9.5 ,COLOR='PINK' / PORTE CHM DE MACHINE COTE ELEVATEUR
&HOLE XB= 15.0,17.5,3.0,3.5,6.5,8.5 / PORTE CHM
&HOLE XB= 26.0,28.5,3.0,3.5,6.5,8.5 / PORTE CHM
&HOLE XB= 37.0,39.5,3.0,3.5,6.5,8.5 / PORTE CHM
&VENT XB= 11.0,13.5,-10.0,-10.0,8.0,9.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE CHAM
&VENT XB= 33.0,35.5,-10.0,-10.0,8.0,9.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE CHAM
&VENT XB= 23.0,25.5,10.0,10.0,8.0,9.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE CHAM
&VENT XB= 10.0,12.5,10.0,10.0,8.0,9.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN'/FENETRE CHAM
&VENT XB= 33.0,35.5,10.0,10.0,8.0,9.5,COLOR='PINK',SURF_ID = 'OPEN' / ENETRE CHAM
&OBST XB= 0.0,0.1,-5.0,5.0,6.5,10.5,COLOR='YELLOW' /PORTE D LEVATEUR 2 CAS
&OBST XB= 2.0,6.5,-4.0,4.0,6.5,6.51 / PORTE DEU LEVATEUR 2CAS
&SURF ID='FIRE',HRRPUA=1500,COLOR='RED'/
&VENT XB= 0.0,2.0,-10.0,-8.0,0.0,0.0 , SURF_ID = 'FIRE' / SOURCE DE CHALEUR dans l'angle
&SLCF PBX=1.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=1.50, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=4.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&SLCF PBX=16.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=46.5, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=-9.50, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=-9.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=-5.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=2.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=5.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=1.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=5.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=10.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=13.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=1.50, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBX=4.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBX=16.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBX=46.5, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBX=-9.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBX=-5.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBX=2.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBX=5.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBZ=1.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBZ=5.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBZ=10.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&SLCF PBZ=13.0, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volum
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,1.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+1' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,2.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+2' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+3' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,4.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+4' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,5.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+5' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,6.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+6' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,7.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+7' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,8.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+8' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,9.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+9' /

&DEVC XYZ=1.5,-9.0,10.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+10' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,11.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+11' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,12.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+12' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,13.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+13' /
&DEVC XYZ=46.5,9.5,1.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+1P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,2.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+2P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+3P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,4.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+4P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,5.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+5P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,6.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+6P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,7.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+7P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,8.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+8P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,9.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+9P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,10.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+10P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,11.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+11P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,12.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+12P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.5,9.5,13.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+13P' /PORTE
&DEVC XYZ=46.0,5.5,1.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+1E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,2.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+2E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+3E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,4.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+4E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,5.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+5E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,6.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+6E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,7.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+7E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,8.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+8E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,9.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+9E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,10.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+10E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,11.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+11E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,12.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+12E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=46.0,5.5,13.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAZ+13E' /ESCALIER
&DEVC XYZ=1.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+1' /
&DEVC XYZ=2.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+1.5' /

&DEVC XYZ=5.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+2' /
&DEVC XYZ=7.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+2.5' /
&DEVC XYZ=10.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+3' /
&DEVC XYZ=12.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+3.5' /
&DEVC XYZ=15.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+4' /
&DEVC XYZ=17.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+4.5' /
&DEVC XYZ=20.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+5' /
&DEVC XYZ=22.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+5.5' /
&DEVC XYZ=25.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+6' /
&DEVC XYZ=27.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+6.5' /
&DEVC XYZ=30.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+7' /
&DEVC XYZ=32.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+7.5' /
&DEVC XYZ=35.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+8' /
&DEVC XYZ=37.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+8.5' /
&DEVC XYZ=40.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+9' /
&DEVC XYZ=42.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+9.5' /
&DEVC XYZ=45.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+10' /
&DEVC XYZ=47.5,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+10.5' /
&DEVC XYZ=50.0,0.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAX+11' /
&DEVC XYZ=1.5,-9.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+1' /
&DEVC XYZ=1.5,-7.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+2' /
&DEVC XYZ=1.5,-5.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+3' /
&DEVC XYZ=1.5,-3.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+4' /
&DEVC XYZ=1.5,-1.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+5' /
&DEVC XYZ=1.5,1.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+6' /
&DEVC XYZ=1.5,3.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+7' /
&DEVC XYZ=1.5,5.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+8' /
&DEVC XYZ=1.5,7.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+9' /
&DEVC XYZ=1.5,9.0,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TAY+10' /
&DEVC XB=1.5,5.5,-9.0,9.0,3.5,6.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='maxT', STATISTICS='MAX' /
&DEVC XB=3.0,3.0,-10.0,10.0,0.0,6.5, QUANTITY='VOLUME FLOW', ID='VOL_FLOW_SORTIE' /DEBIT

&DEVC XB= 44.5,48.5,4.0,7.0,6.2,6.2, QUANTITY='VOLUME FLOW', ID='VOL_FLOW_SORTIES'/DEBIT
PORTE ESCALIER

&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' /

&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /

&BNDF QUANTITY='BURNING RATE' /

&TAIL /