

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique**

Département Génie Mécanique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études

Réalisé par :

KHIRAT Mohamed Walid

Thème :

***Etude de désenfumage d'une centrale
hydroélectrique souterraine***

Proposé et suivi par :

Dr. Bouzid BENKOUSSAS

MC (A)

ENP

Dr. Amor BOUHDJAR

DR

CDER

En collaboration de:

Pr. Olivier VAUQUELIN

Prof

Université de la Méditerranée Marseille

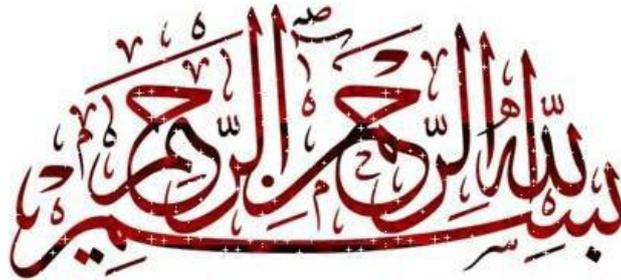
Pr. Philippe BOURNOT

Prof émérite

Université de la Méditerranée Marseille

Année universitaire 2010-2011

Remerciements



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.

Je remercie Monsieur B. BENKOUSSAS et Monsieur A. BOUHDJAR pour m'avoir sélectionné pour ce stage, pour avoir cru en moi et pour leurs soutiens et leurs conseils.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Ph. BOURNOT pour m'avoir accueilli au sein de l'UNIMECA, pour la confiance qu'il m'a accordé et pour m'avoir permis de réaliser ce travail dans de si bonnes conditions.

Je remercie Monsieur O.VAUQUELIN pour son encadrement remarquable et pour son aide et ses conseils avisés.

Je remercie les membres du jury Mr S.LARBI et Mr M.BOUBAKEUR pour avoir pris le temps et le soin de lire ce rapport.

Je tiens à remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique et plus spécialement ceux du département de Génie Mécanique qui m'ont donné les outils nécessaires pour mener à bien ce projet.

En fin, je remercie ma famille, mes amis et mes collègues de l'ENP et du MED'ACCUEIL pour leurs encouragements et leurs soutiens durant mon séjour à Marseille.

Dédicaces

A mes très chers parents, qu'Allah les protège

A mon frère et ma sœur

A mes amis Abdelkader et Yazid

Je dédie ce travail

ملخص

مشروع التخرج هذا، يندرج في إطار دراسة نظام إزالة الأدخنة من محطة توليد الكهرباء تحت أرضية. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد طريقة إزالة أدخنة من بين مجموعة من الطرائق، من التي تعطي أفضل النتائج في مواجهة سيناريوهات حرائق يحتمل أن ينشب في المحطة. لإجراء هذه المقارنة، إستعملنا برنامج FDS الرقمي، ثم قمنا بتجارب على نموذج للمحطة مصغر ب 1/50 بعرض التحقق من التشبيه الرقمي. من خلال تحليلنا للنتائج، لاحظنا أن التركيبة بشبه سقف هي الملائمة لأحسن إزالة للأدخنة.

كلمات مفتاحية: الوقاية من الحرائق، دخان، انتشار، استخراج الأدخنة، محطة توليد الكهرباء

Résumé

Ce projet est une étude portant sur le désenfumage d'une centrale hydroélectrique souterraine. Au cours de ce travail nous avons déterminé, parmi plusieurs configurations de désenfumage, quelle est celle qui donne les meilleurs résultats face aux différents scénarios de feux qui pourraient se déclencher dans la centrale. Pour faire cette comparaison nous avons utilisé en premier, le code FDS. Ensuite une maquette de la centrale au 1/50^{ème}, afin de valider les simulations numériques. En analysant les résultats obtenus, nous avons constaté que la configuration avec faux plafond est la meilleure configuration de désenfumage.

Mots clés: Sécurité incendie, Fumée, Propagation, Désenfumage, centrale hydroélectrique.

Abstract

This project is a study of the smoke extraction of an underground hydroelectric power plant. In this work we determined, among several configurations of smoke control, what is the one that works best against different scenarios of fires in the plant. To make this comparison we used first, the FDS code, then a model of the plant to 1/50th to validate numerical simulations. Analyzing results, we found that the configuration with false ceiling is the best configuration of smoke control.

Key words: Fire safety, smoke, Propagation, Smoke extraction, hydroelectric power plant.

Sommaire

Introduction Générale	1
CHAPITRE 1 : Généralités	3
1.1. Introduction	3
1.1.1. Généralités sur les incendies	3
1.1.2. Feu et combustion	3
1.2. Description générale d'un feu confiné	4
1.2.1. Évolution d'un incendie en milieu confiné	5
1.2.2. Phénomènes particuliers liés aux locaux sous-ventilés.....	6
1.2.3. Propagation d'un incendie dans un milieu confiné	7
1.3. Phénomènes régissant le mouvement des fumées	9
1.3.1. La dilatation thermique	10
1.3.2. Les forces de flottabilité.....	11
1.3.3. Effet de cheminée:.....	11
1.3.4. La surpression causée par le feu	12
1.4. Taux de dégagement de chaleur	13
1.4.1. Facteurs contrôlant le taux de dégagement de chaleur:	13
1.4.2. Effet de confinement	14
1.4.3. Incendies de dimensionnement	14
1.5. Le désenfumage.....	15
1.5.1. Méthodes d'extraction des fumées d'incendies	15
1.5.2. Contexte réglementaire	16
1.6. Définition de la Problématique.....	16
1.6.1. Dimensions types et volumes fonctionnels de la centrale hydroélectrique :	17
1.6.2. Les stratégies initialement proposées pour la maîtrise des fumées.....	19
1.6.3. Le système de ventilation mécanique	21
1.6.4. Les scénarios d'incendie.....	21
CHAPITRE 2 : Méthodologie de simulation d'un panache de fumées d'incendie par injection d'un gaz léger	22
2.1. Introduction	22
2.2. Modélisation d'un panache thermique par un panache densimétrique:.....	23
2.3. Procédure de réduction d'échelle	25
2.4. Discussion sur les limites du modèle	26
2.4.1. Conservation du nombre de Richardson	26

2.4.2.	Conservation de l'écart relatif de masse volumique relatif (ω).....	26
2.4.3.	Conservation du nombre de Reynolds:	27
CHAPITRE 3 : Etude numérique	.....	28
3.1.	Introduction	28
3.2.	Équations du modèle hydrodynamique	29
3.3.	Hypothèses du code :.....	30
3.3.1.	Approximation du faible nombre de mach	30
3.3.2.	Forme simplifié de l'équation de quantité de mouvement.....	30
3.3.3.	Modèle de combustion	31
3.4.	Résolution numérique.....	32
3.5.	Hypothèses générales, maillage et conditions aux limites	33
CHAPITRE 4 : Résultats des simulations numériques	.....	34
4.1.	Introduction	34
4.2.	Étude préliminaire sur l'efficacité des Configurations initialement proposées.....	36
4.3.	Influence des débits d'extraction	37
4.3.1.	Résultats pour la configuration avec faux plafond.....	38
4.3.2.	Résultats pour la configuration avec gaine d'extraction	40
4.3.3.	Résultats pour la configuration trappes/trémies	42
4.4.	Influence du débit de soufflages	44
4.4.1.	Résultats pour la Configuration Faux plafond avec trappes centrales:.....	44
4.4.2.	Résultats pour la Configuration trappes/trémies:.....	46
4.4.3.	Résultats pour la configuration avec gaine d'extraction	48
4.5.	Comparaison de l'efficacité des quatre configurations:.....	50
4.5.1.	Comparaison pour le scenario de feux de 1 MW	50
4.5.2.	Comparaison pour le scenario de feux de 3 MW	52
4.5.3.	Comparaison de l'efficacité des quatre configurations pour le feu de 25 MW	54
CHAPITRE 5: Etude expérimentale	.....	56
5.1.	Les modélisations avec la maquette au 1/50eme.....	56
5.2.	Les résultats obtenus avec la maquette.....	58
5.2.1.	Résultats pour la configuration de base :	58
5.2.2.	Résultats pour la configuration avec gaine d'extraction	59
5.2.3.	Résultats pour la configuration avec faux plafond.....	60
Conclusion générale	.....	62
Références bibliographiques	.....	64
Annexe	.....	64
Annexe Numérique	.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des figures

Figure 1: Triangle du feu.....	3
Figure 2: zones caractéristiques d'un feu confiné.....	4
Figure 3: phases classiques d'un incendie en milieu confiné	6
Figure 4: Développement de la flamme	8
Figure 5: Apparition de la couche thermique.....	8
Figure 6: Descente des couches thermiques, pyrolyse et inflammation des produits.....	9
Figure 7: Dilatation thermique.....	10
Figure 8: Effet de cheminée dans les bâtiments à grande hauteur	12
Figure 9: Mouvement d'air et différences de pression lors d'une phase de développement d'un incendie dans un local ayant une porte ouverte	13
Figure 10: Effet de confinement sur le taux de masse perdue	14
Figure 11: schémas vue de face et de dessus de la centrale	17
Figure 12: Spatialisation au sein de la centrale.....	18
Figure 14: Schémas de l'usine hydroélectrique souterraine type en configuration de base.....	19
Figure 13: Schémas de l'usine hydroélectrique souterraine type en configuration gaine d'extraction	19
Figure 15: Schémas de l'usine hydroélectrique souterraine type en configuration faux plafond	20
Figure 16: Configuration faux plafond avec trappes d'extraction dites «Trappe/trémies»	20
Figure 17: Procédure de réduction d'échelle	22
Figure 18: maillage	33
Figure 19: Visualisation des points de mesure de densités sur la maquette numérique.....	35
Figure 20: échelle des couleurs représentant les densités dans les simulations FDS	35
Figure 21: comparaison entre l'efficacité des différentes configurations.....	36
Figure 22: vecteurs vitesse au niveau des écrans de cantonnements	37
Figure 23: comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit d'extraction pour la configuration faux plafond.....	38
Figure 24: évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	39
Figure 25: évolution de la moyenne des densités sur la longueur en fonction du temps.....	39
Figure 26: comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit d'extraction pour la configuration gaine d'extraction	40
Figure 27 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur en fonction du temps.....	41
Figure 28 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	41
Figure 29: comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit d'extraction pour la configuration trappes/trémies.....	42
Figure 30 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur en fonction du temps.....	43
Figure 31 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	43
Figure 32 : comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit de soufflage pour la configuration faux plafond.....	44
Figure 33 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	45
Figure 34 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur en fonction du temps.....	45
Figure 35 : comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit de soufflage pour la configuration trappes/trémies.....	46
Figure 36 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	47

Figure 37 : évolution de la moyenne des densités sur longueur en fonction du temps.....	47
Figure 38 comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit de soufflage pour la configuration gaine d'extraction	48
Figure 39 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	49
Figure 40 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	49
Figure 41 : comparaison entre les trois configurations pour le scenario de feu de 1 MW	50
Figure 42 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	51
Figure 43 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur a la porte en fonction du temps ..	51
Figure 44 : comparaison entre les trois configurations pour le scenario de feu de 3 MW	52
Figure 45 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	53
Figure 46 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur a la porte en fonction du temps ..	53
Figure 47 : comparaison entre les trois configurations pour le scenario de feu de 25 MW	54
Figure 48: évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	55
Figure 49 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps	55
Figure 51 : dispositif d'encemement de l'hélium	57
Figure 50 : Maquette en plexiglas de la centrale hydroélectrique en configuration faux plafond avec petites trappes centrales	56
Figure 52 : Dispositif d'extraction des fumées de la maquette	57
Figure 53 : Débitmètres utilisés pour mesurer les débits d'air et d'hélium injectés dans la maquette	58
Figure 54 : Résultats obtenu pour la configuration de base	58
Figure 55 : Résultats obtenu pour la configuration avec gaine d'extraction	59
Figure 56 : Résultats obtenu pour la configuration avec faux plafond	60
Figure 57 : Résultats pour la configuration avec faux plafond et extraction localisé.....	61
Figure 58: explication de la procédure à suivre pour visualiser les plans de coupe des grandeurs physiques du système.....	Erreur ! Signet non défini.

NOMENCLATURE

B	Débit de flottabilité	(m ⁴ /s ³)
C _p	Chaleur spécifique	(kJ/kg.K)
D	Coefficient de diffusion	(m ² /s)
D	Diamètre du panache	(m)
f _b	Forces extérieures sauf pesanteur	(N)
G	Accélération de la pesanteur	(m/s ²)
H _α	Enthalpie spécifique de l'espèce α	(kJ/kg)
Q _c	Puissance thermique convective	(W)
m ^{'''} _α	Production de l'espèce α par unité de volume	(kg/m ³)
m ^{'''} _{α,b}	Production de l'espèce α par évaporation	(kg/m ³)
q _f	débit de fumée	(m ³ /s)
q ^{'''}	taux de dégagement de chaleur par unité de volume	(W/m ³)
q ^{'''} _b	puissance consommée par évaporation	(W/m ³)
q ^{''}	flux de chaleur	(W/m ²)
T _f	température de la fumée	(K)
T ₀	température ambiante	(K)
u (u, v, w)	vitesse	(m/s)
χ _{air}	fraction massique de l'air	(-)
χ _{hélium}	fraction massique de l'hélium	(-)
τ _{i,j}	contraintes visqueuses	(N/m ²)

Introduction Générale

D'après les études réalisées, un feu tous les ans, est constaté en moyenne sur chaque installation hydroélectrique. Le risque d'incendie est donc considéré comme une préoccupation pour la sûreté des installations, il est à l'origine de plusieurs accidents dans le monde. Le plus grave s'est produit à Windscale en 1957 [1] où l'air chaud et les fumées toxiques ont provoqué la mort de plusieurs personnes. Le nombre d'incendie est moins fréquent que dans les autres secteurs de l'industrie, mais les risques occasionnés peuvent présenter un impact tout aussi dangereux.

La prédiction du mouvement des fumées dans les espaces confinés et la conception d'un système de contrôle des fumées sont donc des éléments importants dans l'établissement d'une stratégie de sécurité de feu qui soit capable de permettre d'éviter des dégâts importants en victimes et installations.

Pour être capable de concevoir une telle stratégie, on a besoin d'établir plusieurs paramètres qui décrivent la dynamique et le mouvement des fumées et leurs impacts sur le personnel de la centrale. Toutefois, il est très onéreux d'examiner le comportement de la chaleur et de la fumée issues d'un incendie éventuel par le biais de tests réalisés dans une véritable centrale hydroélectrique.

Une solution à ce problème consiste à faire des études numériques afin de simuler la propagation et le comportement de la chaleur et des fumées, et ce, sur des logiciels qui soient capables de reproduire avec un niveau de fidélité acceptable les phénomènes de transport inhérents aux développements des feux. Ces codes peuvent être validés par la suite sur des maquettes à échelle réduite.

Les risques liés à l'incendie sont principalement dus aux fumées (gaz toxiques, suies et chaleur) et au rayonnement dégagé par le foyer. Un incendie cause de lourds dégâts engendrant de longues et coûteuses réparations ; De plus, la fumée étant un vecteur important de transport de chaleur (les flux de chaleur dans une couche de fumée stratifiée peuvent dépasser les 2 kW/m^2) cela peut être la cause de danger indirect pour les occupants d'un lieu en causant la dégradation d'équipements situés au plafond pouvant entraîner leurs chutes. Ce flux de chaleur peut aussi être la cause d'un dysfonctionnement d'équipements sensibles à l'élévation de la température ou à la présence de particules dans l'air (suies).

Les suies et les gaz imbrulés apparaissant le plus souvent par pyrolyse et manque de comburant, en plus d'être toxiques pour les occupants, elles sont hautement inflammables et peuvent par conséquent être à l'origine des phénomènes de « flash over » et de « back draft » dont les conséquences peuvent être extrêmement dangereuses pour les pompiers lors d'une intervention visant à circonscrire un incendie.

Enfin une combustion non contrôlée, comme c'est le cas lors d'un incendie, libère en plus des gaz imbrulés et des suies, d'autres gaz toxiques (HCl par exemple) pour les occupants du lieu et les secouristes opérants sur le sinistre.

Notre étude est structurée en cinq chapitres , dans le premier chapitre on parlera des généralités sur les incendies en milieux confinés et des fumées engendrées par ces derniers, du désenfumage et de la réglementation en ce qui concerne les lieux de travail pour introduire notre problématique qui est de trouver parmi plusieurs configurations de désenfumage quelle est celle qui donne les meilleurs résultats face aux différents scénarios de feux qui pourraient se déclencher dans la centrale, on passera ensuite au chapitre suivant dans lequel on expliquera la méthodologie suivie pour simuler un panache d'incendie par injection d'hélium, dans le troisième chapitre on parlera du code de calcul utilisé pour faire nos simulation numériques avant d'entamer le quatrième chapitre dans lequel on comparera les différentes configuration entre elles, après avoir déterminé les bons débits de soufflage et d'extraction à appliquer à chacune d'elles, et ce, sur la base de différents scénarios de feux les plus susceptibles de se déclencher, et pour finir le cinquième chapitre dans lequel on comparera expérimentalement les différentes configurations de désenfumage pour aboutir à celle qui donne les meilleurs résultats pour la maîtrise des fumées d'incendie.

CHAPITRE 1 : Généralités

1.1. Introduction

A l'heure actuelle, de nombreux modèles simples et empiriques pour l'étude des fumées d'incendie ont été mis en œuvre par les chercheurs afin d'évaluer les risques incendie, et d'en trouver des approches prédictives. Dans ce chapitre nous allons expliquer quelques notions inhérentes aux incendies en général, et aux incendies dans les milieux confinés en particulier.

1.1.1. Généralités sur les incendies

Par définition, un incendie est un feu destructeur qui résulte d'une réaction de combustion non maîtrisée dans le temps et l'espace, elle s'effectue à grande échelle où les dimensions géométriques, cinématiques et énergétiques du foyer mises en jeu sont démesurées. Les deux grandes familles d'incendies sont:

-Les incendies libres: leur foyer se trouve à l'extérieur (feu libre) tel est le cas d'un incendie de forêt, de groupes d'habitation... Ils libèrent de très grandes puissances calorifiques et leurs effets sur les bâtiments et les êtres vivants peuvent être graves.

-Les incendies confinés: c'est le cas contraire où le foyer se trouve en intérieur (feu confiné) donc le confinement agit sur le développement de l'incendie en limitant la quantité d'oxydant disponible à l'intérieur ce qui engendre une réduction de l'ampleur de l'incendie.

1.1.2. Feu et combustion

Un feu est un dégagement simultané de chaleur, de lumière et de flamme produit par la combustion vive de certains corps (bois, charbon, etc.). Il s'agit donc d'un phénomène physico-chimique basé sur la réaction d'un combustible (solide, liquide ou gazeux) avec un comburant, souvent l'oxygène de l'air, en présence d'une énergie de combustion dite énergie d'activation.

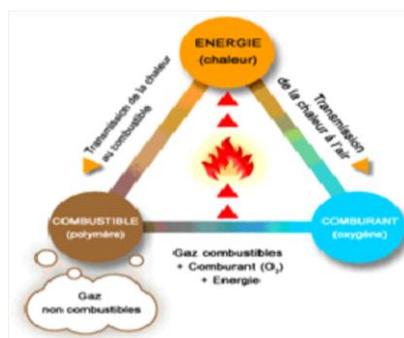


Figure 1: Triangle du feu

1.2. Description générale d'un feu confiné

Au cours d'un feu en intérieur, six régions caractéristiques peuvent être distinguées comme le montre la figure suivante :

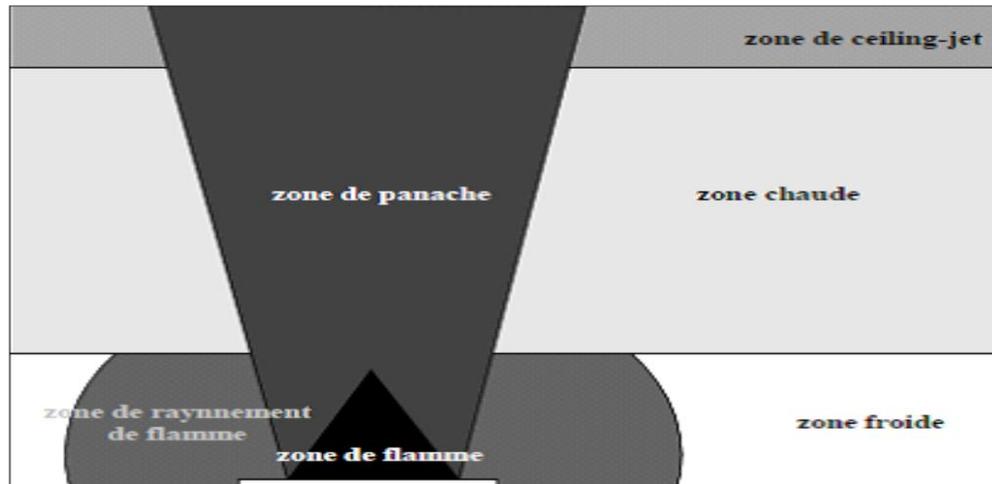


Figure 2: zones caractéristiques d'un feu confiné

- 1) La flamme: c'est la zone de combustion où la température est très élevée (jusqu'à 2000 °C). Elle peut être de deux types :
 - flamme de pré-mélange : lorsqu'elle résulte de l'inflammation d'un mélange gaz/air préexistant comme le bec benzène.
 - flamme de diffusion : si elle est générée par le contact entre le combustible et le comburant à travers un front de flamme, tel est l'exemple de la bougie.

Les flammes rencontrées en incendie sont le plus souvent des flammes de diffusion.

- 2) Le panache : c'est la zone de gaz chauds provenant de la combustion et du mélange avec l'air frais entraîné. La température est maximale dans cette zone.
- 3) Le chéiline-jet (jet au plafond) : il correspond à la zone d'impact où l'écoulement du panache est radial. Il est caractérisé par les échanges thermiques entre le milieu et l'extérieur à travers les parois. La température dans cette zone est inférieure à celle du panache puisque ce dernier est mélangé avec de l'air frais ambiant.
- 4) . La zone chaude: lorsque le chéiline-jet atteint les murs de l'enceinte, il est forcé de se déplacer vers le bas sur les cotés ; Toutefois, les gaz dans le jet sont encore plus chauds que l'air ambiant donc le flux se dirige vers le haut sous l'effet de la flottabilité et engendre l'accumulation des fumées et par la suite la formation d'une couche chaude.
- 5) La zone froide : au niveau de cette zone, le foyer est alimenté par l'air frais ambiant.

- 6) La zone de flux : elle est superposée à la zone froide et caractérisée par l'importance du rayonnement issu de la flamme et des fumées assurant la propagation de l'incendie.

1.2.1. Évolution d'un incendie en milieu confiné

La difficulté est nettement accentuée lorsque l'on veut décrire le comportement d'un feu en espace clos, car un grand nombre d'objets et d'interactions doivent être pris en compte pour étudier les transferts de matière et les transferts thermiques mis en jeu. En particulier, la quantité d'air et plus précisément d'oxygène disponible sera le paramètre fondamental qui va gouverner le développement ou non du feu [2]. De plus, en fonction de la géométrie, de l'infrastructure et du type de ventilation, plusieurs scénarios sont possibles dont la description et la prédiction sont très difficiles voire impossible.

Ce qui suit est une description générale classique proposée par Walton et Thomas lors de l'élaboration d'un incendie typique dans une enceinte confinée [3]:

- 1) l'ignition (ou initiation) : c'est la phase initiale d'un incendie déclenchée par l'allumage du foyer par le dégagement d'une énergie suffisante pour l'échauffement du combustible jusqu'à une température telle qu'une réaction de combustion s'amorce : c'est le mécanisme d'inflammation qui dépend de la nature du combustible utilisé.
- 2) la propagation (pré-flash over) : c'est le développement "lent" du foyer où la disposition des éléments combustibles dans le milieu joue un rôle important car c'est l'un des critères qui indiquera la progression ou non de l'incendie et sa propagation
- 3) l'embrassement généralisé (flash over) : dans le cas où la quantité du comburant est suffisante, l'incendie continue son évolution. Lorsque la température dans le local incendié devient très importante, une étape particulière de transition rapide vers un état d'embrassement total de la surface du combustible s'établit : c'est le flash over.
- 4) l'incendie pleinement développé (post-flash over) : c'est l'étape qui suit l'embrassement généralisé puisqu'elle suppose que la quantité d'oxygène mise en jeu est suffisante pour assurer la combustion des matériaux inflammables contenus dans le milieu incendié. Elle est caractérisée par la puissance maximale de l'incendie.
- 5) la décroissance (retombée du feu) : Comme le carburant devient rare, la production d'énergie diminue et donc la température moyenne du gaz dans le milieu baisse.

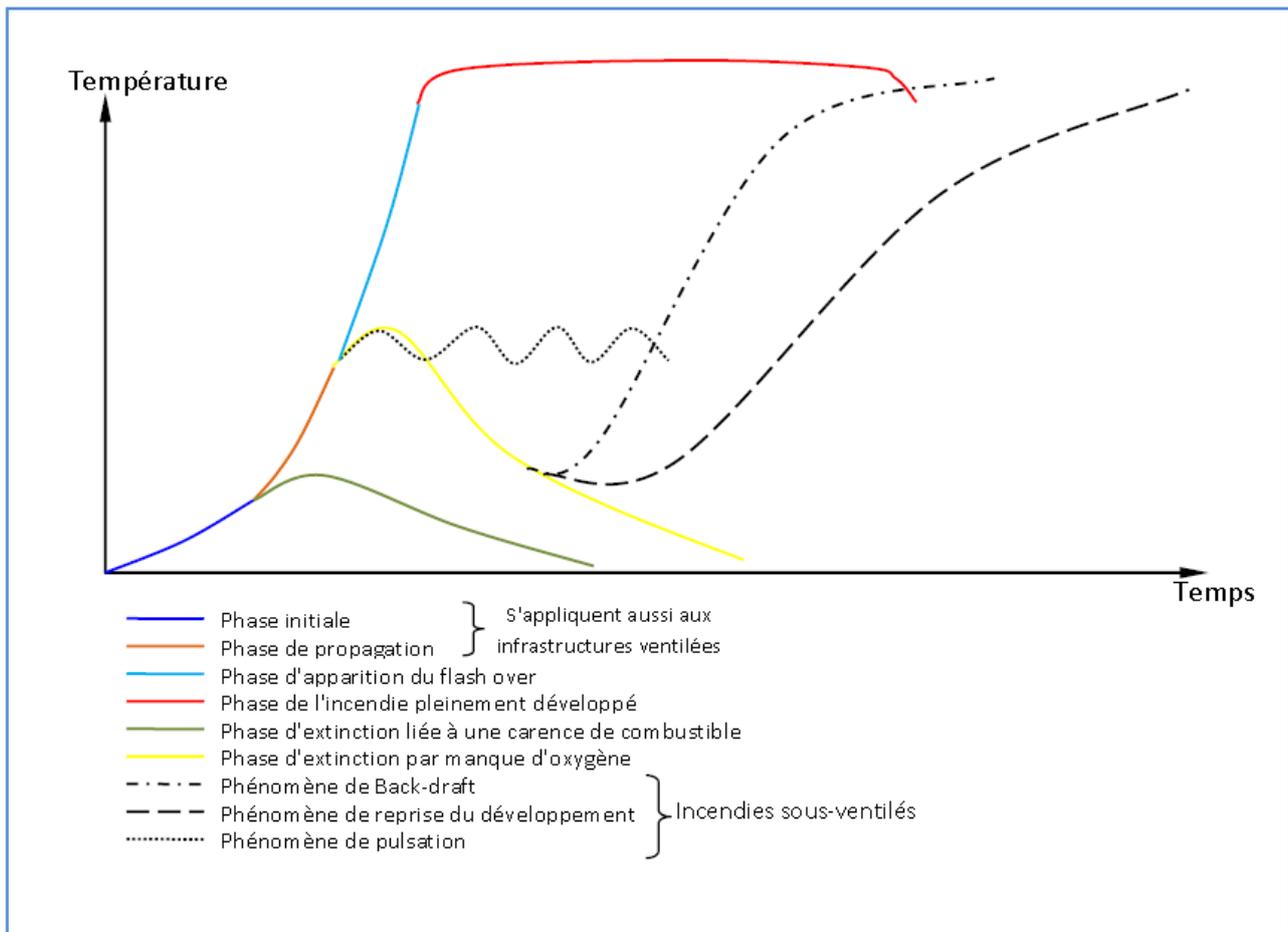


Figure 3: phases classiques d'un incendie en milieu confiné

1.2.2. 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 à ce stade que la combustion devient très difficile pour une concentration en oxygène dans le milieu inférieure à 12%. Ces phénomènes sont les suivants :

1.2.2.1. 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 la suite une surpression dans le local qui entraîne l'arrêt de l'apport d'air frais et le processus se répète successivement.

1.2.2.2. 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 combustible. 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 dans le local tandis que les gaz, riches en combustible, plus chauds, s'évacueront vers l'extérieur par la partie haute de l'ouverture. L'air et les gaz riches en combustible se mélangeront le long de l'interface entre les deux écoulements de gaz et d'air frais (de sens opposé).

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 un 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 [4].

1.2.2.3. Phénomène de reprise du développement

Ce phénomène apparaît dans les mêmes conditions qu'un BACK-DRAFT suite à un apport soudain d'air frais dans le local à l'exception que la température initiale des imbrûlés est supérieure à leur 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 BACK-DRAFT 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.

1.2.3. Propagation d'un incendie dans un milieu confiné

Pour les incendies en milieu confiné, le processus de propagation fait appel à différents mécanismes de transmission de la chaleur et suit certaines étapes.

a) Etape 1

L'inflammation du combustible déclenche l'incendie en faisant apparaître une flamme localisée qui est le siège d'une réaction de combustion dégageant les fumées de l'incendie. Cette flamme, considérée comme source de rayonnement infrarouge d'intensité très élevée, chauffe les substances combustibles qui lui sont proches ce qui peut mener à leur combustion.

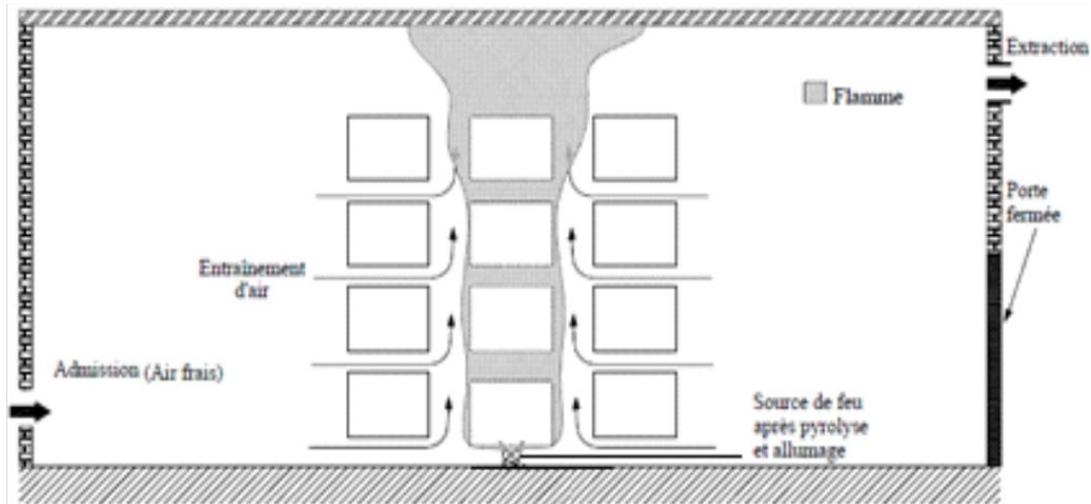


Figure 4: Développement de la flamme

b) Etape 2

Au bout d'un certain temps, les fumées de l'incendie impactent le plafond du local et une couche thermique se forme grâce aux effets de la flottabilité. L'intervention à la fois des mécanismes de convection naturelle des gaz chauds et du rayonnement de la flamme, est propice au début de la pyrolyse des autres matériaux combustibles se trouvant à ce niveau.

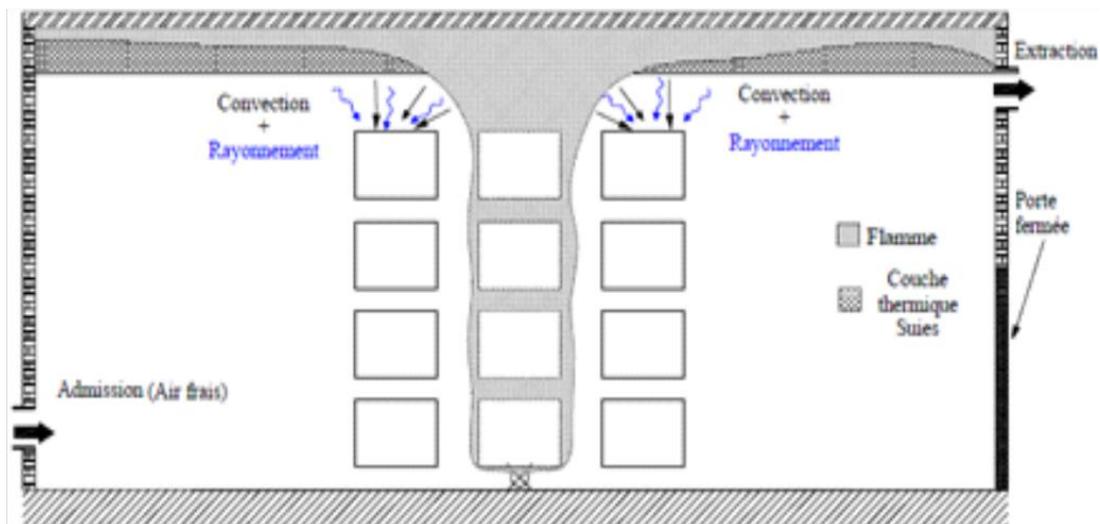


Figure 5: Apparition de la couche thermique

c) Etape 3

A cause du caractère confiné du milieu, et en cas d'absence d'extraction, les fumées sont emprisonnées au plafond formant une couche chaude instable qui descend et engendre, suite au contact des gaz chauds, l'inflammation des produits combustibles existant par convection.

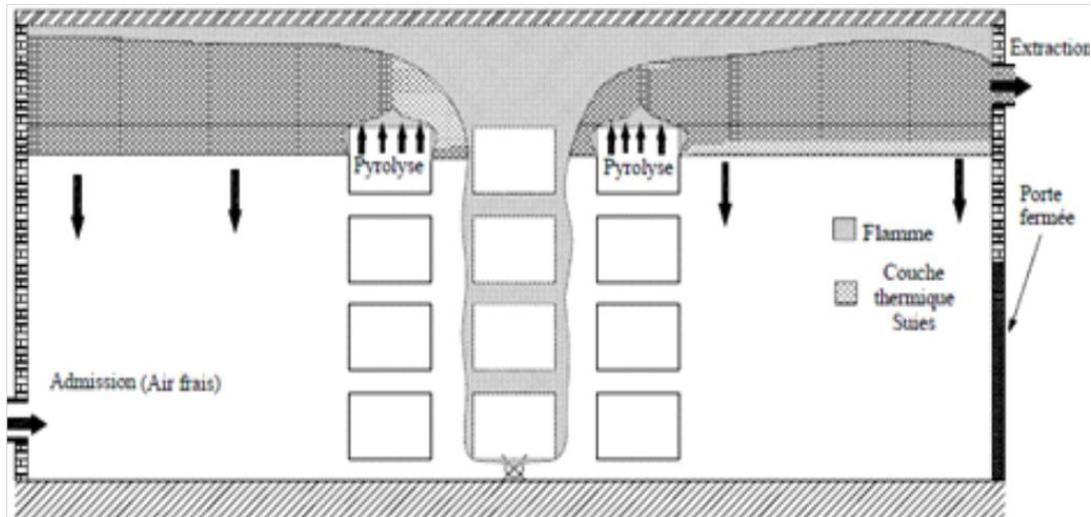


Figure 6: Descente des couches thermiques, pyrolyse et inflammation des produits

1.3. Phénomènes régissant le mouvement des fumées

En dépit de la composition toxique de la fumée, les risques d'embrasement généralisé et d'explosion de fumée, sont l'une des causes qui rendent la fumée très dangereuse, sans oublier son déplacement rapide, surnois et difficile à prévoir dans un bâtiment incendié.

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 d'un bâtiment.

La compréhension du mouvement des fumées est donc 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.
- De la disposition des pièces, types de plafonds, ouvertures verticales.
- Des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation.

- Des conditions climatiques extérieures.

L'écoulement des fumées issues d'un incendie est toujours turbulent, en raison de l'ampleur du feu et de l'énorme pression engendrée. Les forces qui conduisent les fumées sont la conséquence de plusieurs phénomènes:

1. La dilatation thermique.
2. Les forces de flottabilité (poussée d'Archimède et la gravité).
3. Effet de cheminée (Starck effect).
4. La surpression causée par le feu.

1.3.1. La dilatation thermique

Selon la loi des gaz parfaits, un gaz se dilaterait à $1/273$ de son volume initial pour chaque élévation de température de 1K à pression constante. Donc un incendie qui provoque une élévation de température de 800°C causerait une dilatation de l'air de quatre fois son volume initial. D'une façon générale, on pourrait dire que dans la plupart des incendies, le volume des gaz chauds devrait au moins tripler par rapport au volume d'air frais au départ.

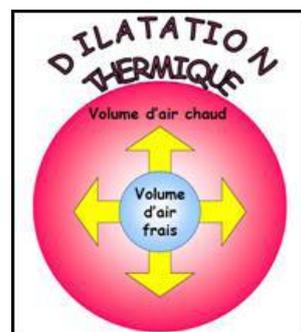


Figure 7: Dilatation thermique

Cette augmentation importante du volume des gaz chauds provoque ainsi l'expulsion des autres gaz présents au début de l'incendie, et elle continuera 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

1.3.2. Les forces de flottabilité

La chaleur dégagée par le feu réchauffe l'air et les produits de combustion qui voient leur densité diminuée. La différence de densité entre ces produits de combustion et l'air frais se manifeste alors par des mouvements de convection, étant plus léger que l'air frais, l'air chaud remonte sous l'effet de la poussée d'Archimède, de même l'air frais qui est plus dense descend et alimente ainsi le feu à sa base.

Les mouvements de convection engendrés par ces deux forces opposées expliquent des phénomènes comme la propagation d'un incendie aux étages supérieurs d'un bâtiment en laissant le milieu intact et de même 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, 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 remonter à nouveau. Ce mouvement de montée/descente continuera jusqu'à ce que le plafond atteigne la même température que la fumée.

1.3.3. Effet de cheminée:

Lorsqu'un incendie prend naissance aux niveaux inférieurs d'un bâtiment de grande hauteur, la fumée a tendance à se propager rapidement vers les étages supérieurs par les ouvertures verticales telles que les cages d'escaliers et les puits de lumière. Il s'agit de l'une des forces majeures qui conduisent les fumées dans les incendies en bâtiments: l'effet de cheminée (Starck effect), en effet l'air se réchauffe et devient moins dense à cause de la chaleur dégagée par la combustion, par la suite, des forces de flottabilité conséquentes se génèrent et conduisent ainsi l'air contenant les fumées à remonter par les cages d'escaliers, les ascenseurs et les puits de lumière.

Dans la plupart des incendies la différence de pression due à l'effet de cheminée est plus importante que celle causée par les autres effets comme l'expansion des gaz de combustion, et l'effet du vent. Dès que l'effet de cheminée se manifeste, la fumée produite dans un bâtiment remonte à travers les cages d'escaliers et les ascenseurs. L'effet de cheminée devient ainsi un phénomène important que les concepteurs des systèmes de contrôle des fumées doivent absolument en tenir compte.

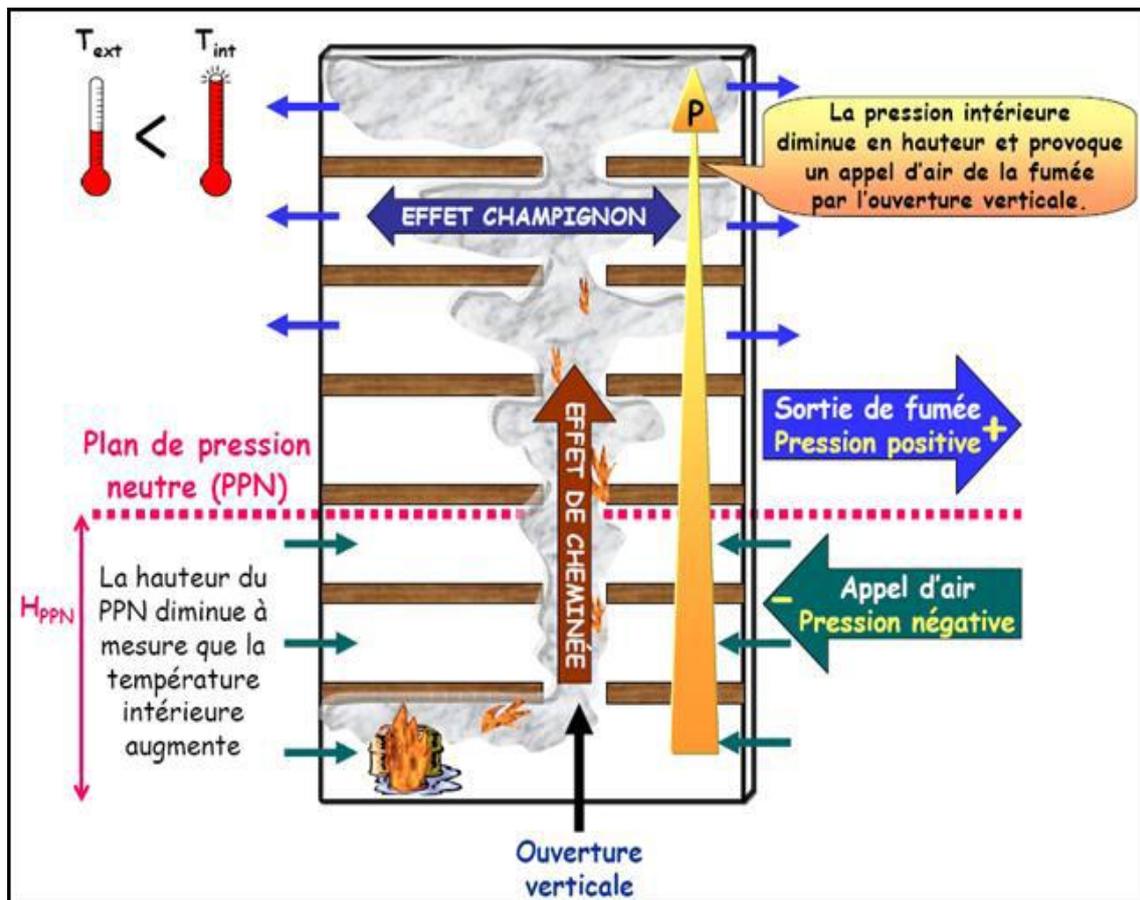


Figure 8: Effet de cheminée dans les bâtiments à grande hauteur

1.3.4. 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 : cette surpression en hauteur engendre une baisse de pression au niveau du sol, créant ainsi un mouvement d'air qui est aspiré, en milieu fermé, à travers les ouvertures à des niveaux inférieurs, comme le bas des portes, les fenêtres et les pertes d'étanchéité d'un bâtiment. 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.

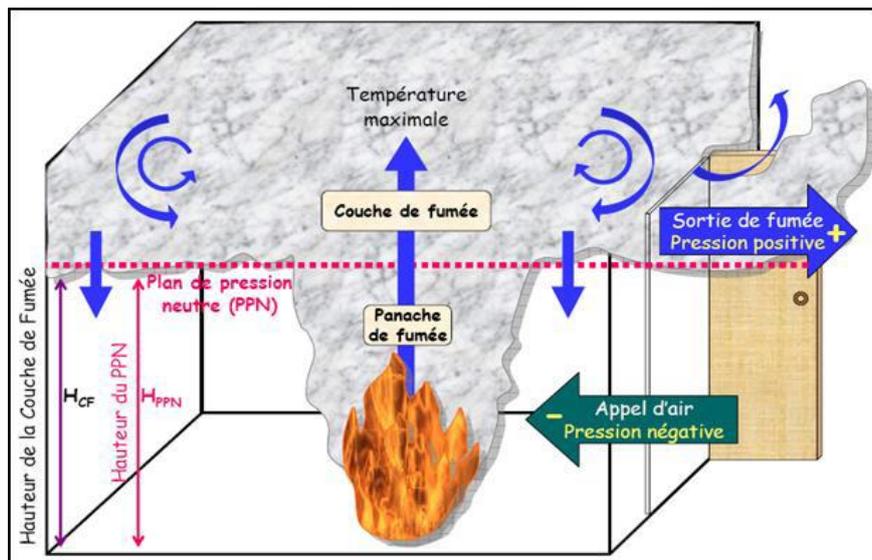


Figure 9: Mouvement d'air et différences de pression lors d'une phase de développement d'un incendie dans un local ayant une porte ouverte

1.4. Taux de dégagement de chaleur

Lorsqu'un objet est siège d'une réaction de combustion, celui-ci dégage une certaine quantité d'énergie par unité de temps, cette quantité est appelée taux de dégagement de chaleur (Heat Release Rate HRR) et est mesuré en Watt, kW et MW. Pour la plupart des matériaux, cette quantité varie au cours du temps.

1.4.1. Facteurs contrôlant le taux de dégagement de chaleur:

Le taux de dégagement de chaleur dépend principalement du type, de la quantité et de l'arrangement des matériaux combustibles, ainsi que du degré de confinement. Il est fonction du temps. Le taux de masse perdue est la quantité de matière ayant été vaporisée et brûlée, il est exprimé en kg/s, mais peut quelque fois être exprimé par unité de surface (kg/m².s), il est lié au taux de dégagement de chaleur par la relation:

$$m'' = \frac{\dot{q}''}{\Delta H_g}$$

Avec:

q'' : Flux de chaleur de la flamme en kW

ΔH_g : Chaleur de gazéification en kJ/kg

1.4.2. Effet de confinement

Deux facteurs principaux influencent le HRR d'un incendie en milieu confiné:

- Premièrement, les gaz chauds se mettent sous le plafond et chauffent ainsi le plafond et les murs. Ces surfaces et la couche de gaz chauds transmettent leurs chaleur à la surface du combustible par rayonnement ce qui augmente le HRR par augmentation de la fraction de combustible brûlée.
- Deuxièmement, le confinement réduit la disponibilité en oxygène nécessaire à la combustion. Cette réduction, a pour conséquence la diminution de la quantité de combustible brûlée suite à une réduction du taux de dégagement de chaleur, et une augmentation de la concentration des gaz imbrûlés.

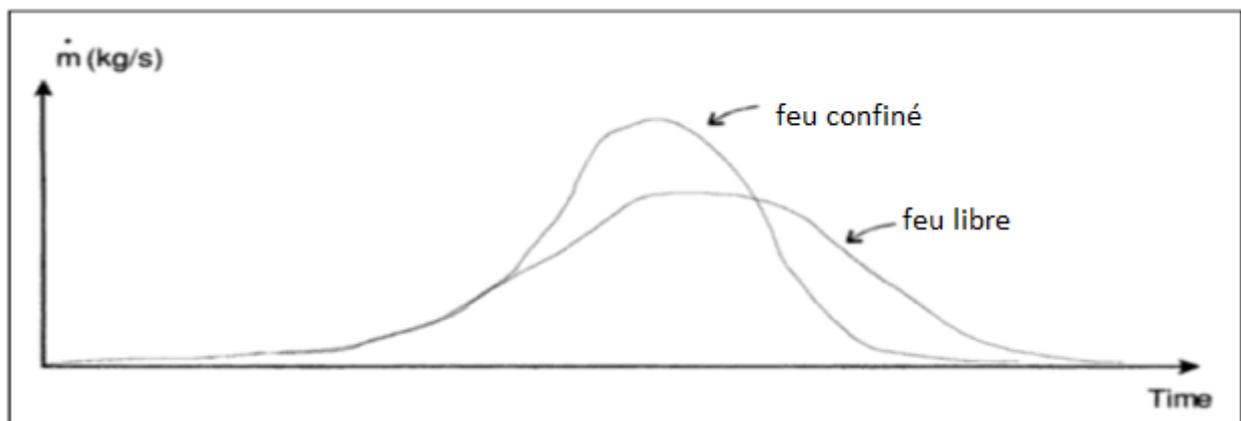


Figure 10: Effet de confinement sur le taux de masse perdue

1.4.3. Incendies de dimensionnement

Selon qu'un incendie se déclare dans une voiture ou dans un grand camion, son taux de dégagement de chaleur varie. Afin de contourner l'incertitude sur les puissances, la réglementation définit des incendies de dimensionnement. Afin de tester le niveau de sécurité d'un ouvrage, des incendies violents sont pris en compte

Le tableau 1.1 suivant donne quelques puissances thermiques utilisées pour le dimensionnement

Type de véhicule	HRR en MW
Véhicule léger	5 à 8
Camionnette	10 à 15
Poids lourd sans marchandises dangereuses	30
Poids lourd avec marchandises dangereuses	200

1.5. Le désenfumage

Le désenfumage a pour objectif de maintenir un chemin d'accès ou de sortie praticable pour les occupants et les secours, c'est à dire présentant un air salubre et une visibilité suffisante, et dans un second temps, de diminuer la dégradation des biens ou la propagation de l'incendie par les fumées, entraînant une amélioration de la sécurité lors de l'évacuation des occupants et de l'intervention des pompiers tout en réduisant les coûts du sinistre.

1.5.1. Méthodes d'extraction des fumées d'incendies

Les fumées d'incendie peuvent être extraites soit de manière naturelle (exutoires et ouvrants) soit de manière mécanique (ventilation). Dans tous les cas le régime d'écoulement se doit de toujours être le plus laminaire possible; ceci afin d'éviter que des structures tourbillonnaires ne se créent ce qui aurait pour effet d'entraîner un mélange entre l'air frais et les fumées.

Un feu produit un flux massique et volumique de fumées important, le but sera donc de toujours laisser stratifier les fumées au plafond, puis de les extraire afin d'évacuer un flux massique aussi proche que possible du flux massique produit par le feu, tout en évitant au maximum la dilution des gaz de fumée avec de l'air. Cette méthode est la plus efficace pour désenfumer un local.

Il est également prévu par la législation d'effectuer un balayage de faible vitesse d'air, c'est-à-dire un soufflage afin de créer une surpression qui va pousser les fumées vers le plafond, puis une extraction pour évacuer ces derniers, ceci afin d'éviter l'accumulation de fumées toxiques dans une région de l'espace et donc de laisser un chemin toujours praticable par les occupants et les secours.

Une autre méthode consiste à bloquer la propagation de la fumée dans les zones non sinistrées, et ce en créant une hiérarchie de pressions par injection d'air frais permettant ainsi de compartimenter les zones enfumées (technique employée notamment dans les bâtiments sensibles comme les centrales nucléaires ou l'on souhaite bloquer les polluants que le feu et les fumées peuvent transporter).

Dans notre cas une extraction mécanique et un simple balayage seront mis en œuvre.

1.5.2. Contexte réglementaire

Le désenfumage est obligatoire pour tous les locaux dont la surface excède 300 m² (*Article R4216-13 du code du travail*)

L'évacuation des fumées est réalisée par des bouches raccordées à un ventilateur d'extraction par des conduits, avec les obligations suivantes:

- La vitesse de passage de l'air aux amenées d'air doit être toujours inférieure à 5m/s (*Instruction technique 246*)
- Les amenées d'air mécanique doivent avoir un débit de l'ordre de 0,6 fois le débit extrait (*Instruction technique 246*)
- Le débit d'extraction doit être calculé sur la base de 1m³/s pour une surface de 100 m² (*Article R4216-15 du code du travail*)

1.6. Définition de la Problématique

Notre étude portera sur le désenfumage d'une centrale hydroélectrique souterraine. Cette centrale présente une plateforme supérieure ouverte sur l'extérieur grâce à une porte, cette dernière peut permettre à un camion de passer afin de décharger du matériel, et toute la problématique réside dans le fait que la porte soit proche de l'extracteur, donc ce dernier va puiser le débit à extraire de la porte et non de la centrale, ce sera à nous de trouver la configuration de désenfumage qui va distribuer l'extraction sur toute la longueur afin d'extraire au mieux les fumées d'incendie.

Les feux peuvent avoir plusieurs origines (armoires électriques, flaques d'huiles au niveau des carters des turbines ou feu de camion sur la plateforme) et être localisés en fonction de ces origines.

Nous devons pour faire l'étude, réaliser une série de simulations sur une maquette de centrale hydroélectrique que nous concevrons. Ceci nous permettra d'étudier le comportement des fumées d'incendie aux seins des volumes complexes qui constituent la centrale hydroélectrique.

La maquette qui est envisagée reproduit les volumes fonctionnels et les dimensions typiques des centrales existantes ou en projet. Les deux projets pris en comptes sont les projets des centrales de Gavet (massif de Belledone) et de Redenat (Limousin). Nous procéderons au préalable à des simulations numériques avec le code CFD FDS (Fire Dynamical Systems), avant de passer aux expérimentations sur la maquette pour appuyer les résultats obtenus numériquement.

Il existe un système de trémies alignées, associées à chaque turbine, permettant d'atteindre le niveau inférieur. Cette disposition est récurrente. Dans les études d'ingénierie incendie, elle a été utilisée pour permettre au panache de fumées d'atteindre le volume principal de la caverne où les dispositifs d'extraction sont installés. Ces trémies sont localisées contre la paroi nord de la centrale (le côté sud correspond à la galerie d'accès de la centrale). Les turbines (trois dans la maquette) déterminent un maillage qui crée un début de compartimentage.

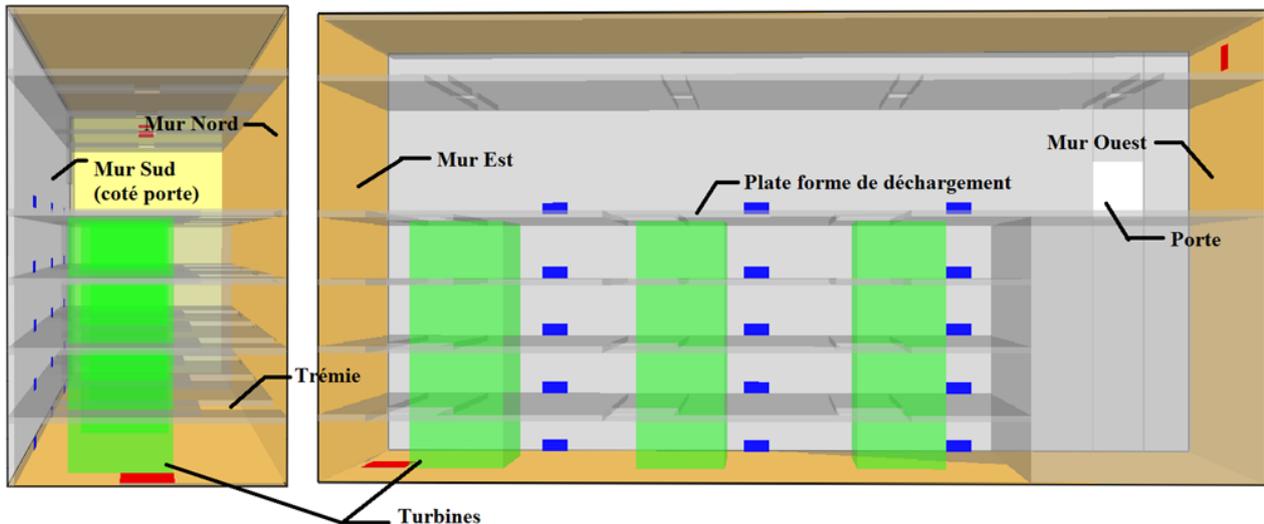


Figure 12: Spatialisation au sein de la centrale

La maquette offre la possibilité d'ajouter un faux plafond ou une gaine d'extraction au niveau de la voûte afin d'étudier le comportement des fumées d'incendies avec ces configurations. Le détail des configurations utilisé est donné plus loin.

1.6.2. Les stratégies initialement proposées pour la maîtrise des fumées

Trois configurations générales de désenfumage sont prises en compte.

- La configuration réglementaire: Elle comporte une ou plusieurs gaines d'extraction qui occupent la longueur de l'usine. On peut proposer des conduits dans les niveaux inférieurs puisque cette disposition se prête à des interprétations différentes de la réglementation. Cette disposition correspond à la pratique de l'application des textes. Elle se traduit par un débit d'extraction relativement faible puisque les taux horaires ne peuvent pas être mis en œuvre à cause des pertes de charges qui résultent dans les conduits.

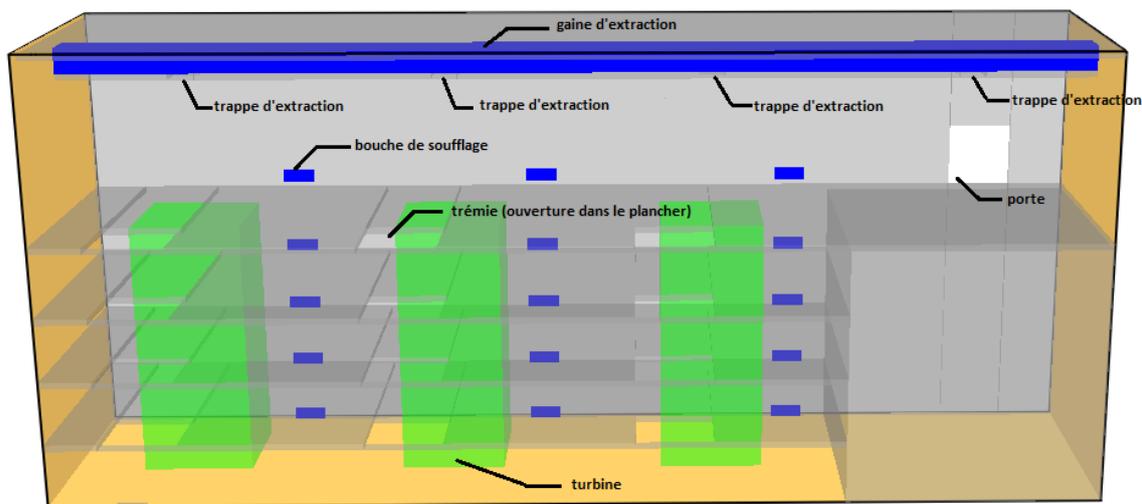


Figure 13: Schémas de l'usine hydroélectrique souterraine type en configuration gaine d'extraction

-La configuration de base qui est celle retenue par EDF à l'heure actuelle: Il s'agit de la solution qui globalise l'extraction dans le volume supérieur de la centrale, en utilisant les trémies comme exutoires, dans le cas d'un feu qui se produirait dans les niveaux inférieurs.

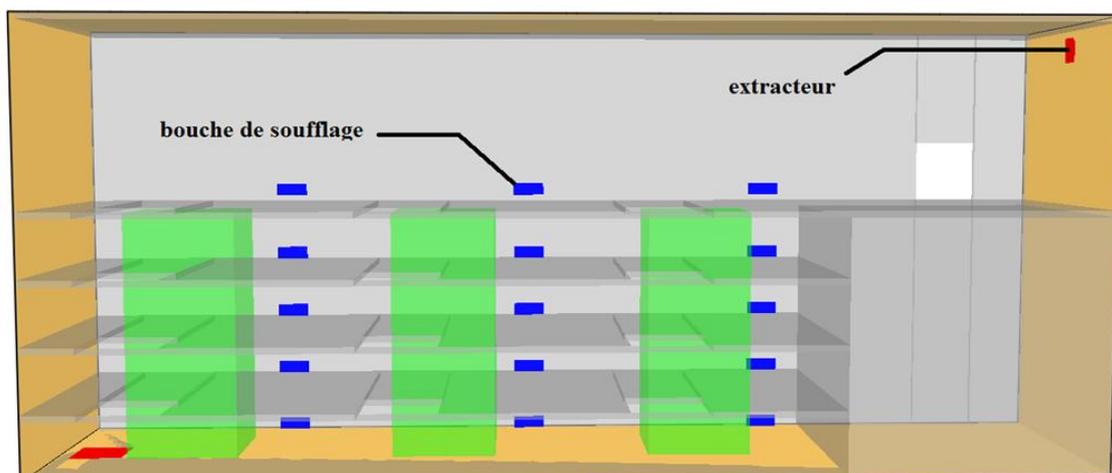


Figure 14: Schémas de l'usine hydroélectrique souterraine type en configuration de base

-La configuration avec faux plafond au niveau de la voute du volume supérieur: Le faux plafond est équipé de trappes motorisées et télécommandables. Le faux plafond se situe à 10 mètres de hauteur au-dessus de la plate forme de déchargement.



Figure 15: Schémas de l'usine hydroélectrique souterraine type en configuration faux plafond

-La configuration faux plafond trappe/trémie dans cette configuration les trappes d'évacuations situées dans le faux plafond sont de la même taille et à la même position que les trémies servant d'exutoires en cas d'incendie, ou, d'accès au sous sol en temps normal. Une trappe supplémentaire est placée au milieu du faux plafond au niveau de la porte en cas d'incendie localisé sur le début de la plate forme de déchargement

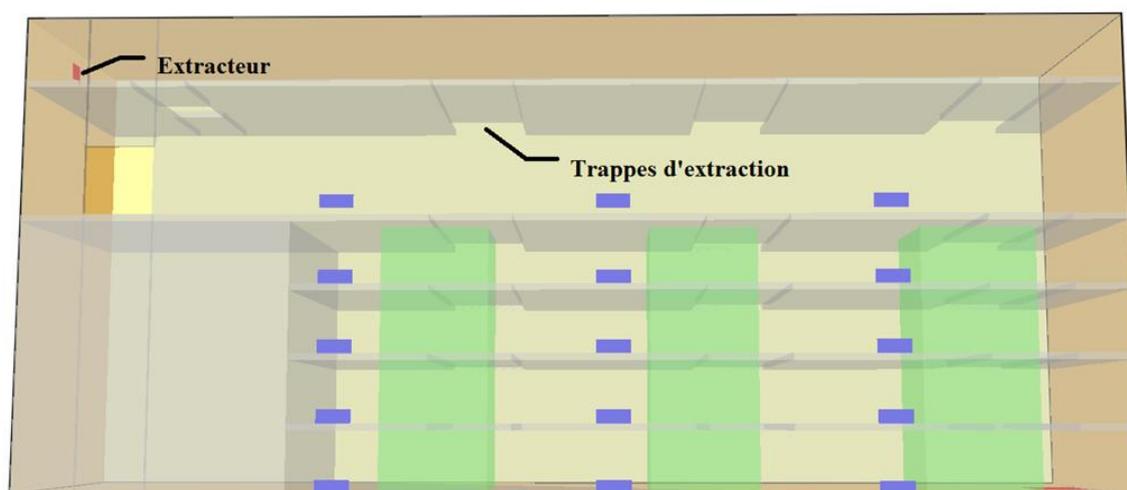


Figure 16: Configuration faux plafond avec trappes d'extraction dites «Trappe/trémies»

Toutes les dispositions citées précédemment peuvent être complétées par des écrans de cantonnement à tous les étages afin de limiter l'effet de propagation longitudinale des fumées dans ces volumes.

1.6.3. Le système de ventilation mécanique

La centrale sera équipée de deux réseaux de ventilation:

- Une distribution d'air frais à tous les niveaux, elle même divisée en différents points de soufflage (un point de soufflage par niveaux et par volume de turbine)

- l'extraction, localisée en un point unique au dessus de la plate forme de déchargement, dans la paroi ouest. Elle est localisée en partie supérieure, ce qui est une disposition naturelle pour le désenfumage. Elle est également compatible avec la présence d'un faux plafond qui déterminerait alors une gaine d'extraction.

Les deux réseaux de ventilation ne délivrent pas le même débit. Une compensation se développera au travers de la galerie d'accès, qui est supposée ouverte sur l'atmosphère extérieure en permanence. Elle est, dans le cas de la maquette, représenté par une ouverture dans la paroi sud.

Les valeurs de débits pour l'extraction et le soufflage seront pris pour commencer comme étant égales au valeurs réglementaires, elle seront ensuite modifiées et leurs influences seront étudiées.

1.6.4. Les scénarios d'incendie

Les scénarios d'incendie sont relativement peu nombreux. Ils dépendent des matériaux concernés, c'est à dire de la localisation du foyer. On distinguera trois positions d'incendies:

- Sur la plate forme de déchargement: le feu peut concerner un poids lourd, c'est à dire une puissance de l'ordre de 25 MW.

- Sur le niveau supérieur: Le risque est lié à la présence d'armoires électriques. La puissance de référence est de l'ordre de 3 MW.

- Pour les niveaux inférieurs, on peut prendre ce dernier scénario en référence, ou considérer que le feu peut concerner un épandage d'huile. La puissance qui sera considérée est en fonction des hypothèses de 1MW à 3 MW.

Ces données ont été prises en compte dans les études d'ingénierie du désenfumage de la centrale de Gavet.

CHAPITRE 2 : Méthodologie de simulation d'un panache de fumées d'incendie par injection d'un gaz léger

2.1. Introduction

Au cours de nos expérimentations, nous allons devoir simuler un panache de fumée dont la différence de masse volumique qui est à l'origine du débit de flottabilité vient de la température du foyer de l'incendie; et ce par l'injection d'un gaz léger, dans notre cas de l'hélium. Cette approche isotherme fixe des conditions aux limites adiabatiques pour lesquelles les forces de flottabilité sont les forces qui gouvernent les mouvements fluides. Cette approche permet de modéliser l'écoulement issu de fumées d'incendie dans un local complexe sans avoir recours aux simulations thermiques plus difficiles à mettre en œuvre. La modélisation d'un panache de fumées d'incendie par un gaz léger se fait en deux temps.

-La première étape consiste à modéliser le comportement d'un panache thermique (issue d'un foyer) par un panache densimétrique (hélium). Ceci nous donne la relation entre le débit volumique d'hélium à injecter dans la maquette et la puissance convective du foyer qui nous est fourni puisque faisant partie des scénarios à tester.

-La deuxième étape consiste à faire une réduction d'échelle. En effet les débits d'hélium trouvés afin de pouvoir simuler des feux compris entre 1 et 25 MW sont compris entre 3,3 et 82,5 m³.s⁻¹. Ceci est scientifiquement et techniquement inopportun.

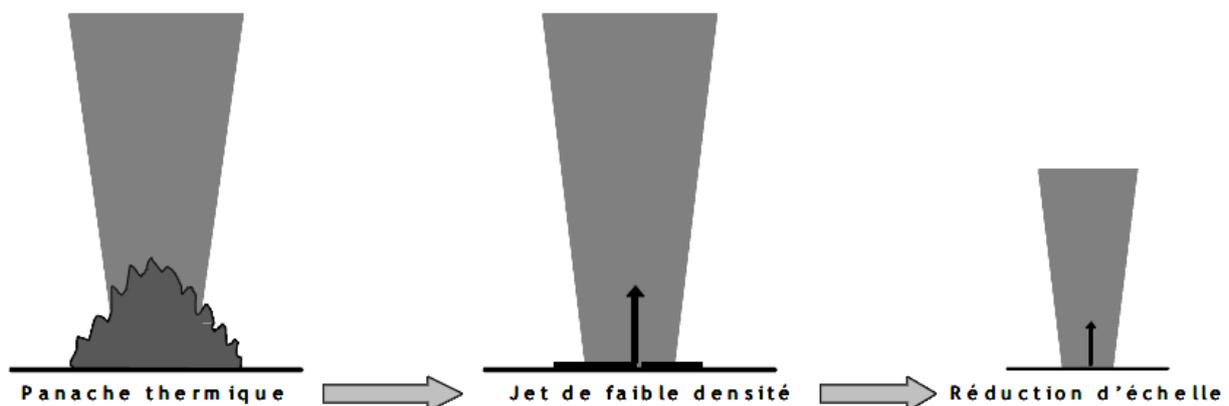


Figure 17: Procédure de réduction d'échelle

2.2. Modélisation d'un panache thermique par un panache densimétrique:

Afin de modéliser le panache thermique par un panache densimétrique, nous associons le débit de flottabilité du jet de gaz léger à la puissance thermique convective produite par le feu:

Le débit de flottabilité est défini de la manière suivante:

$$B = \frac{(\rho_0 - \rho_f) g q_f}{\rho_0} \quad (2.1)$$

Pour sa part la puissance thermique convective est définie de la manière suivante:

$$Q_c = \rho_f C_{pf} q_f (T_f - T_0) \quad (2.2)$$

- Avec:
- ρ_0 la masse volumique de l'air en kg/m^3
 - ρ_f la masse volumique des fumées en kg/m^3
 - g l'accélération de pesanteur en m/s^2
 - q_f le débit volumique des fumées en m^3/s
 - Q_c la puissance convective en MW
 - C_{pf} la capacité calorifique massique de la fumée en $\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

En considérant que les fumées se comportent comme des gaz parfaits, il est possible d'exprimer la puissance convective en fonction de la différence de masse volumique:

$$\rho_f T_f = \rho_0 T_0 \quad (2.3)$$

Par conséquent la variation relative de masse volumique par rapport à la masse volumique de la fumée est égale à la variation relative de température par rapport à la température ambiante:

$$\frac{-\Delta\rho}{\rho_f} = \frac{\Delta T}{T_0} \quad (2.4)$$

Ainsi en introduisant l'équation (4) dans l'équation (2) il vient l'expression de la puissance convective en fonction de la différence de masse volumique:

$$Q_c = C_{pf} q_f T_0 (\rho_0 - \rho_f) \quad (2.5)$$

D'où:

$$\Delta\rho = \frac{Q_c}{C_{pf} \rho_0 T_0} \quad (2.5')$$

En réinjectant l'équation (2.5) dans l'équation (1) on obtient le débit de flottabilité en fonction de la puissance convective:

$$B = \frac{Q_c g}{C_{pf} \rho_0 T_0} \quad (2.6)$$

Il est courant d'utiliser un mélange d'air et d'hélium pour le jet de faible masse volumique. L'ajout d'air à l'hélium dans le jet permet de reproduire les écarts de densité présents entre les fumées et l'air ambiant dus; dans la réalité; à la température des fumées, sans pour autant changer la puissance convective du foyer.

La masse volumique du mélange s'écrit alors:

$$\rho_f = (\rho_{air} \chi_{air}) + (\rho_{hélium} \chi_{hélium}) \quad (2.7)$$

Avec χ_{air} et $\chi_{hélium}$ les fractions massiques respectives d'air et d'hélium et $\chi_{air} + \chi_{hélium} = 1$.

En supposant que le fluide ambiant soit de l'air, on montre en remplaçant ρ_f dans la relation (2) que:

$$Q_c = C_p T_0 q_f \chi_{hélium} (\rho_{air} - \rho_{hélium}) \quad (2.8)$$

Cette dernière relation permet d'expliciter le débit volumique d'hélium $q_{hélium}$ nécessaire afin de reproduire une puissance convective ou un débit de flottabilité:

$$q_{hélium} = \frac{Q_c}{C_p T_0 (\rho_{air} - \rho_{hélium})}$$

Ou (2.9)

$$q_{hélium} = \frac{\rho_{air}}{g(\rho_{air} - \rho_{hélium})}$$

Dans notre cas nous n'utiliserons qu'une injection d'hélium pur ce qui correspond à une température de fumée en sortie de foyer d'environ 1800°C.

Pour un fonctionnement dans des conditions normales à la température ambiante $T_0 = 20^\circ\text{C}$, on aura $C_p = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho_{air} = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$, $\rho_{He} = 0,166 \text{ kg.m}^{-3}$, ce qui conduit aux relations suivantes:

$$q_{hélium} = 3,3Q_c \text{ Ou } q_{hélium} = 0,12B \quad (2.10)$$

Avec Q_c en MW et $q_{hélium}$ en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$.

2.3. Procédure de réduction d'échelle

Les similitudes entre le rejet de faible masse volumique et les fumées d'incendie étant établis il faut désormais trouver les similitudes permettant la réduction d'échelle. Nous allons pour ce faire considérer un jet de faible masse volumique ρ_f , rejeté de façon continue à travers une ouverture de diamètre d avec un débit q_f . Nous utiliserons l'équation de conservation de la quantité de mouvement:

$$\frac{d}{dz} \left[\frac{\rho}{\rho_0}^j u^2 d^2 \right] = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} g d^2 \quad (2.11)$$

L'exposant j est utilisé afin de couvrir les cas particuliers basés sur l'approximation de Boussinesq ($j=0$) et le cas général non-Boussinesq ($j=1$). En retranchant de part et d'autre de la relation (2.11) la quantité:

$$\frac{d}{dz} \left[\frac{\rho}{\rho_0}^j u^2 d^2 \right] = \frac{d}{dz} (u^2 d^2) \quad (2.12)$$

On obtient une nouvelle relation dans laquelle n'apparaît plus la masse volumique ρ mais seulement l'écart de densité $\Delta\rho/\rho_0$

$$\frac{d}{dz} \left[u^2 d^2 \left(1 - j \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \right] = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} g d^2 \quad (2.13)$$

On procède alors à l'a dimensionnement de cette équation en considérant une échelle de longueur L , une échelle de vitesse U et un écart de masse volumique caractéristique $\Delta\rho_i$.

On pose:
$$\tilde{z} = \frac{z}{L}, \quad \tilde{d} = \frac{d}{L}, \quad \Delta\tilde{\rho} = \frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_i}$$

Ceci permet d'écrire l'équation de conservation de la quantité sous forme adimensionnelle:

$$\frac{d}{d\tilde{z}} \left[\tilde{u}^2 \tilde{d}^2 \left(1 - j \frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} \Delta\tilde{\rho} \right) \right] = \frac{\Delta\rho_i g L}{\rho_0 U^2} \Delta\tilde{\rho} \tilde{d}^2 \quad (2.14)$$

Il apparaît ainsi qu'il est nécessaire de conserver deux nombres sans dimensions: le nombre de Richardson global Ri (ou nombre de Froude densimétrique) et l'écart de densité ω définit par:

$$Ri = \frac{\Delta\rho_i g L}{\rho_0 U^2} \quad \text{Et} \quad \omega = \frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} \quad (2.15)$$

Ceci implique:

$$\frac{gL}{U^2_{maquette}} = \frac{gL}{U^2_{réel}} \quad (2.16)$$

$$\omega = \frac{\Delta\rho_i}{\rho_0_{maquette}} = \omega = \frac{\Delta\rho_i}{\rho_0_{réel}}$$

Nous pouvons ainsi déterminer les facteurs de correspondance entre l'échelle réelle et la maquette. Pour une réduction d'échelle α , en conservant le même fluide ambiant (masse volumique ρ_0) nous obtenons le tableau (2.2) suivant:

<i>Longueurs</i>	α
<i>Vitesse</i>	$\alpha^{1/2}$
<i>Temps</i>	$\alpha^{1/2}$
<i>Masses volumique</i>	α^0
<i>Débit volumique</i>	$\alpha^{5/2}$
<i>Débit massique</i>	$\alpha^{5/2}$
<i>Puissance ou Flux de gravité</i>	$\alpha^{5/2}$

2.4. Discussion sur les limites du modèle

2.4.1. Conservation du nombre de Richardson

Il est assez aisé de comprendre pourquoi il est impératif de conserver le nombre de Richardson. En effet ce dernier permet de déterminer la prédominance entre les forces gravitationnelles (flottabilité) et les forces inertielles (effet de la vitesse). Ainsi ce nombre donne une des caractéristiques essentielles d'un panache [4] sur les lois de similitudes en ingénierie incendie). C'est pourquoi nous ferons en sorte de le conserver au cours de nos simulations.

2.4.2. Conservation de l'écart relatif de masse volumique relatif (ω)

Cette conservation n'est imposée que si l'on ne peut retenir l'approximation de Boussinesq pour le modèle. Certaines simulations utilisant des maquettes hydrauliques contraignent les expérimentateurs à travailler avec des écarts de masses volumiques plus faibles que dans la réalité. Ceci entraîne une distorsion obligatoire de ω en contradiction avec le développement fait en II.2. Nous pouvons cependant légitimement penser que la conservation de ce nombre adimensionnel permet de reproduire correctement la contribution des forces de flottabilités sur la dynamique de l'écoulement. Il a aussi été mis en évidence; dans le cas général non-Boussinesq [5] que la fonction de panache joue un rôle dans le pilotage de la nature d'un jet de faible masse volumique. La fonction panache traduit l'importance relative des effets d'inertie et de flottabilité dans l'écoulement. Elle s'exprime comme étant le produit du nombre de Richardson par la racine carré du rapport des masses volumiques ρ_0/ρ_i . Ceci implique donc qu'une distorsion de la masse

volumique conduit obligatoirement à une dérive de la fonction panache et donc à une modification des caractéristiques en champs proche dans le cas d'un rejet de faible masse volumique.

2.4.3. Conservation du nombre de Reynolds:

Nous aurions pu faire apparaître le nombre de Reynolds dans les équations en ajoutant des forces de frottement à l'équation (11). Cependant pour une forte réduction d'échelle avec le même fluide il n'est pas possible de conserver simultanément le Richardson et le Reynolds. Nous devons donc nous assurer, sur des dispositifs à échelle réduite, que les vitesses d'écoulements soient typiquement supérieures à 10^3 aux échelles caractéristiques. Ceci permettra d'obtenir des écoulements turbulents peu dépendants des caractéristiques intrinsèques du fluide (viscosité et diffusivité).

CHAPITRE 3 : Etude numérique

3.1. Introduction

Nous utiliserons la simulation numérique afin de déterminer des scénarios discriminants pour différentes configurations de désenfumage et de feux. Ceci permettra une économie d'hélium et nous simplifiera la tâche pour ne pas avoir à tester un grand nombre de configurations sur une maquette.

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

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

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

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

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

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

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

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

Ce code a été spécialement développé dans le but de modéliser les conséquences d'incendie de taille industrielle. Les objectifs poursuivis dans le développement du code FDS sont multiples. Premièrement en tant que code CFD, il permet la modélisation de la dynamique du feu. On peut penser qu'à terme avec l'amélioration croissante de la puissance de calcul il sera possible d'obtenir une résolution permettant une simulation de plus en plus proche de la réalité.

Deuxièmement il est destiné à prévoir les conséquences d'un incendie dans de très diverses géométries. Il est à l'heure actuelle au cœur d'un programme entre le NIST et les industriels américains pour améliorer la prédiction des moyens de protection (influences entre sprinklers, cantonnements et événements).

3.2. Équations du modèle hydrodynamique

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

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = m_b''' \quad (3.1)$$

Conservation des espèces :

$$\frac{\partial(\rho Y_\alpha)}{\partial t} + \nabla \rho Y_\alpha U = \nabla \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + m_\alpha''' + m_{\alpha,b}''' \quad (3.2)$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \rho u u + \nabla P = \rho g + f_b + \nabla \tau_{ij} \quad (3.3)$$

Conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \nabla h_s u = \frac{DP}{Dt} + q''' - q_b''' - \nabla q'' + \varepsilon \quad (3.4)$$

3.3. Hypothèses du code :

Le code FDS se base pour la résolution des équations cité ci-dessus et sur des hypothèses simplificatrices que l'on va présenter.

3.3.1. Approximation du faible nombre de mach

L'approximation de faibles vitesses implique la filtration des ondes acoustiques tout en permettant une grande variation de la température et de la densité. Ceci donne aux équations un caractère elliptique approprié aux écoulements à faibles vitesses avec convection thermique. En effet, résoudre les équations pour des régimes transsoniques nécessiterait un pas de temps extrêmement court pour parvenir à avoir l'information qui se déplace à la vitesse du son, ce qui rend les simulations très difficiles.

Une approximation de l'équation d'état est faite par le biais d'une décomposition du champ de pression en une pression "background" de référence et une perturbation:

$$p(\vec{x}, t) = p(z, t) + \tilde{p}(\vec{x}, t)$$

L'objectif de cette décomposition consiste à ce que pour les écoulements à faible nombre de Mach, la température et la densité peuvent être supposées inversement proportionnelles.

Ainsi l'équation d'état peut être approximée par :

$$\tilde{p}_m = \frac{\rho T R}{W}$$

La pression p dans l'équation d'état et dans l'équation de l'énergie est remplacée par la pression filtrée \tilde{p}_m pour filtrer les ondes acoustiques qui se déplacent beaucoup plus rapidement que les écoulements rencontrés dans les applications de feux et les simulations des incendies.

3.3.2. Forme simplifié de l'équation de quantité de mouvement

Soit l'équation de conservation de la quantité de mouvement:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla P = \rho g + f_b + \nabla \tau_{ij}$$

L'approximation du faible nombre de mach nous permet d'écrire :

$$\nabla P = \rho_n g + \nabla \tilde{P}$$

En décomposant :

$$(u \cdot \nabla) u = \frac{\nabla |u|^2}{2} - u \times \omega$$

Et aussi:

$$\frac{1}{\rho} \nabla \tilde{P} = \nabla \left(\frac{\tilde{P}}{\rho} \right) - \tilde{P} \nabla \frac{1}{\rho}$$

On définit ensuite la pression H comme suit:

$$H = \frac{|u|^2}{2} + \frac{\tilde{P}}{\rho}$$

Ainsi en remplaçant dans l'équation de la quantité de mouvement on obtient :

$$\frac{\partial u}{\partial t} - u \times \omega + \nabla H - \tilde{P} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_n)g + f_b + \tau_{ij}]$$

Cette équation peut aussi s'écrire :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + H + F = 0$$

3.3.3. Modèle de combustion

Il existe deux modèles de combustion utilisés dans le code FDS, celui qui est par défaut utilise la fraction du mélange qui est une quantité conservée représentant 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 d'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 grande échelles LES.

Etant donné un volume qui contient un mélange d'espèces gazeux, la fraction du mélange peut être définie comme étant le rapport entre la masse partielle des espèces et la masse totale présente dans le volume. La fraction du mélange est une fonction de l'espace et du temps. Si l'on suppose qu'après le mélange la réaction de combustion entre l'oxygène et le combustible se produit d'une façon instantanée et complète, on pourrait dire que le processus de combustion est contrôlé par le mélange, et dans ce cas toutes les espèces aux quelles on s'intéresse peuvent être décrite en fonction uniquement de la fraction du mélange.

Nota: Lorsque l'objectif de la simulation est simplement la prédiction du transport de la fumée et de la chaleur à partir d'un feu "spécifié", en d'autres termes, lorsque le HRR du feu est un paramètre que l'utilisateur introduit, comme dans le cas de notre étude, FDS convertit le HRR introduit pour une surface donnée, en flux massique suivant la relation:

$$m'' = \frac{\dot{f}(t) \cdot q''_{user}}{\Delta H_g}$$

L'utilisateur n'introduit dans ce cas que le HRRPUA=quser'' et une fonction en escalier . Dans notre étude on considère un feu de puissance constante (f t =1) et égale à HRR=15MW.

3.4. Résolution numérique

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

1 on commence par calculer la vitesse moyenne u_n entre 2 mailles adjacentes

2 on estime ρ , $Y\alpha$, P_m en utilisant les équations approprié, exemple pour la densité:

$$\frac{\rho - \rho^n}{\Delta t} + \nabla \rho^n u^n = 0 \rightarrow \text{On obtient } \rho^*$$

3 on estime le gradient de u^* en utilisant les quantités thermodynamique estimés

4 résoudre l'équation de poisson pour la pression p

$$\nabla^2 H^n = -\left[\frac{\nabla u^* - \nabla u^n}{\Delta t}\right] - \nabla F^n$$

5 on estime la vitesse u^* comme suit :

$$\frac{u^* - u^n}{\Delta t} + F^n + \nabla H^n = 0$$

6 on s'assure que le pas de temps vérifie les conditions suivantes :

$$\Delta t \max\left(\frac{|u|}{\Delta x}, \frac{|v|}{\Delta y}, \frac{|w|}{\Delta z}\right) < 1 \text{ Et } 2\Delta t \cdot \nu \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}\right) < 1$$

Si le pas de temps est trop grand, il est réduit de sorte qu'il satisfasse à la fois les deux contraintes et la procédure retourne au début du pas de temps. Si le pas de temps satisfait aux critères de stabilité, la procédure se poursuit à l'étape de correction

Ceci conclue l'étape pré-directrice et marque le début de la deuxième étape

1 on calcul u^* la vitesse moyenne estimé entre deux mailles adjacente

2 on corrige les grandeurs thermodynamique estimées à l'étape précédente en appliquant la méthode de runge-kutta d'ordre 2, par exemple la densité est corrigée Comme suit :

$$\frac{\rho^n - \frac{1}{2}(\rho^* + \rho^n)}{\frac{\Delta t}{2}} + \nabla \rho^* \cdot u^* = 0$$

3 on calcul le gradient de u^{n+1} en utilisant les grandeurs thermodynamique corrigées

4 on estime la fluctuation de pression comme suit :

$$\nabla^2 H^* = - \left[\frac{\nabla u^{n+1} - \frac{1}{2}(\nabla u^* + \nabla u^n)}{\frac{\partial t}{2}} \right] - \nabla F^*$$

5 Mise à jour de la vitesse par l'intermédiaire de la deuxième partie du régime de Runge-Kutta

$$\frac{u^{n+1} - \frac{1}{2}(u^* + u^n)}{\frac{\partial t}{2}} + \nabla H^* + F^* = 0$$

6 on passe ensuite a la maille suivante et on recommence.

3.5. Hypothèses générales, maillage et conditions aux limites

Dans le cadre de notre étude nous allons simuler les fumées produites lors d'un incendie par l'injection d'hélium, en partant de la on va devoir trouver les bons débits de soufflage et d'extraction a appliquer a chacune des différentes configurations de désenfumage présentées précédemment, et par la suite comparer ces différentes configurations entre elles sur la base de différents scenarios de feu afin de déterminer quelle est la configuration de désenfumage qui donne les meilleurs résultats.

La discrétisation de géométrie est faite avec un maillage rectangulaire: la géométrie est divisée en petits cubes de 1 cm³ (1 cm x1 cm x1 cm), ce qui nous fait 427899 cellules.

Les conditions aux limites imposées sont les suivantes: sur la porte une condition de type OPEN, et sur l'extracteur et les bouches de soufflage les débits seront en fonction de la stratégie de ventilation testée.

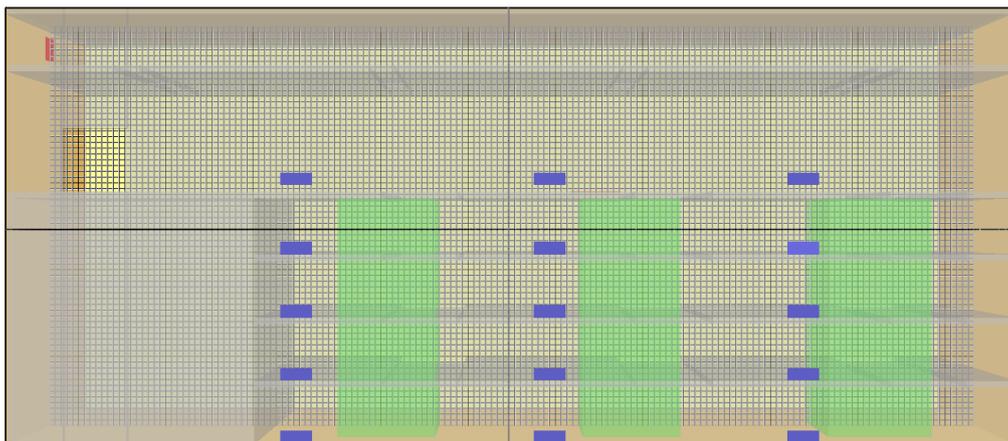


Figure 18: maillage

CHAPITRE 4 : Résultats des simulations numériques

4.1. Introduction

Nous allons effectuer notre étude numérique en trois parties, premièrement on fera une étude préliminaire sur l'efficacité des configurations afin d'écarter celles qui sont les moins adéquates, ensuite on déterminera (en nous basant sur la réglementation en ce qui concerne les lieux de travail) les bon débits de soufflage et d'extraction à appliquer sur chacune des configuration pour obtenir des résultats de désenfumage optimum , enfin on comparera ces différentes configuration entre elles pour déterminer quelle est celle qui donne les meilleurs résultats face au fumées d'incendie

Nous avons basé nos comparaisons sur la moyenne d'une série de relevés de densités effectués sur une ligne allant de $x=0,4m$ à $x=1,4m$ en $y=0,2m$ et $z=0,1m$ (voir figure 19). Nous n'avons pas pris en compte les 20 premiers mètres de l'usine car comme nous le constaterons plus tard cette partie de la maquette est quasiment totalement exempte de fumée pour chaque configuration; il en est de même pour les dix derniers mètres du fond qui sont quasiment enfumés, même légèrement jusqu'au sol. Ceci ne présente aucun caractère discriminant puisque étant communs à toutes les configurations testées.

Nous avons aussi placé une série de point de mesure de façons à obtenir la moyenne des densités sur un plan se situant au niveau de la première bouche d'extraction. Ceci nous permettra de mesurer l'influence de la porte qui sert à équilibrer les débits entrants et sortants sur la stratification des fumées, et aussi à mesurer le niveau d'avancement du front de fumée. Ce sont ces deux séries de mesures qui nous on permit de déterminer les situations de désenfumage optimales.

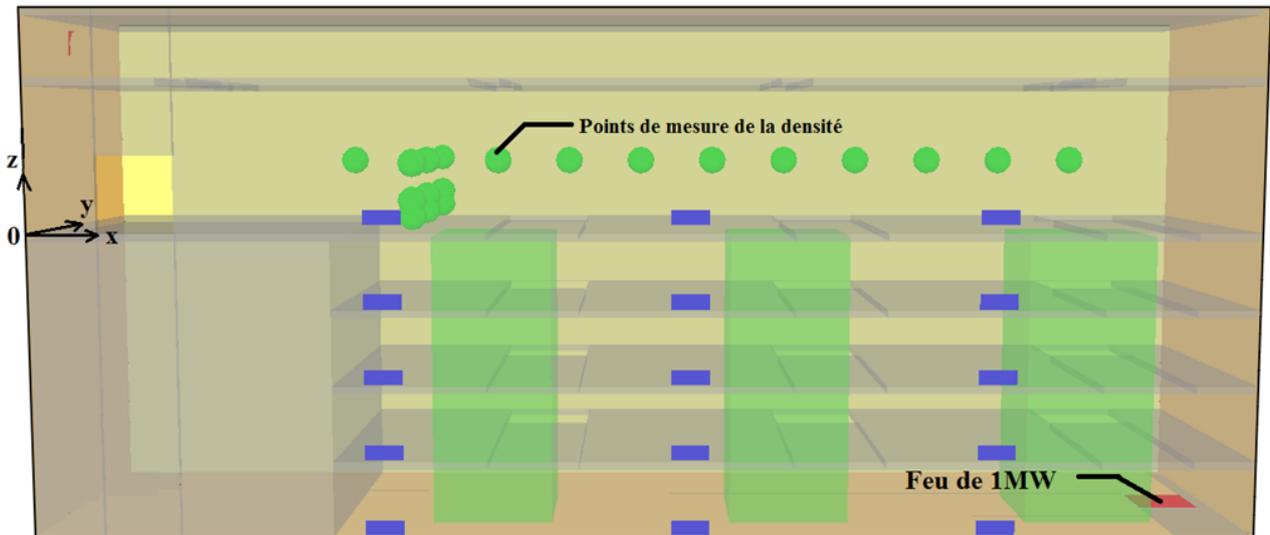


Figure 19: Visualisation des points de mesure de densités sur la maquette numérique

Nous avons utilisé ces emplacements de mesures car ce sont ceux qui nous semblaient les plus restrictifs et par conséquent les plus intéressants. Dans l'hypothèse d'une couche stratifiée les points situés à une même hauteur sont sensés présenter les mêmes valeurs de densités. Mais dans notre cas de figure rien ne nous permet d'affirmer qu'on soit dans ce cas de figure d'où la nécessité d'une moyenne sur plusieurs points.

On utilisera lors de notre étude des images qui représenteront des coupes planes des distributions de la densité des gaz contenus dans le volume dans la maquette dans le temps. Comme la densité des fumées $\rho_{\text{fumées}} = \chi_{\text{air}} \rho_{\text{air}} + \chi_{\text{hélium}} \rho_{\text{hélium}}$, cette dernière donne une bonne représentation de la salubrité de l'air. La figure 12 donne la correspondance entre les couleurs affichés par FDS et les densités. Une forte concentration en fumées est donc proche du bleu et l'air pur est représenté par le rouge.



Figure 20: échelle des couleurs représentant les densités dans les simulations FDS

Nous pouvons remarquer que l'échelle ci dessus part de 0,80 alors que la densité de l'hélium pur est de 0,16. Ceci s'explique par le fait que le débit d'injection modélisant le panache de fumées est de l'ordre de $2.10^{-4} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pour un feu de 1 MW se répartissant sur un grand volume initial d'air pur.

Il est à noter que nous parlerons toujours des temps maquettes et des distances maquettes. De plus l'orientation et les axes sont donnés sur la figure 19 et seront toujours les mêmes par la suite.

4.2. Étude préliminaire sur l'efficacité des Configurations initialement proposées

Les premières configurations testées l'ont été sur la base du cahier des charges présenté plus haut. Les valeurs réglementaires de désenfumage leurs ont été appliqués; les figures ci dessous ont été obtenues pour des valeurs d'extraction de 10 volumes/heure ($0,008\text{m}^3/\text{s}$) et des valeurs de soufflage de 6 volumes/heure ($0,0003\text{ m}^3/\text{s}$).

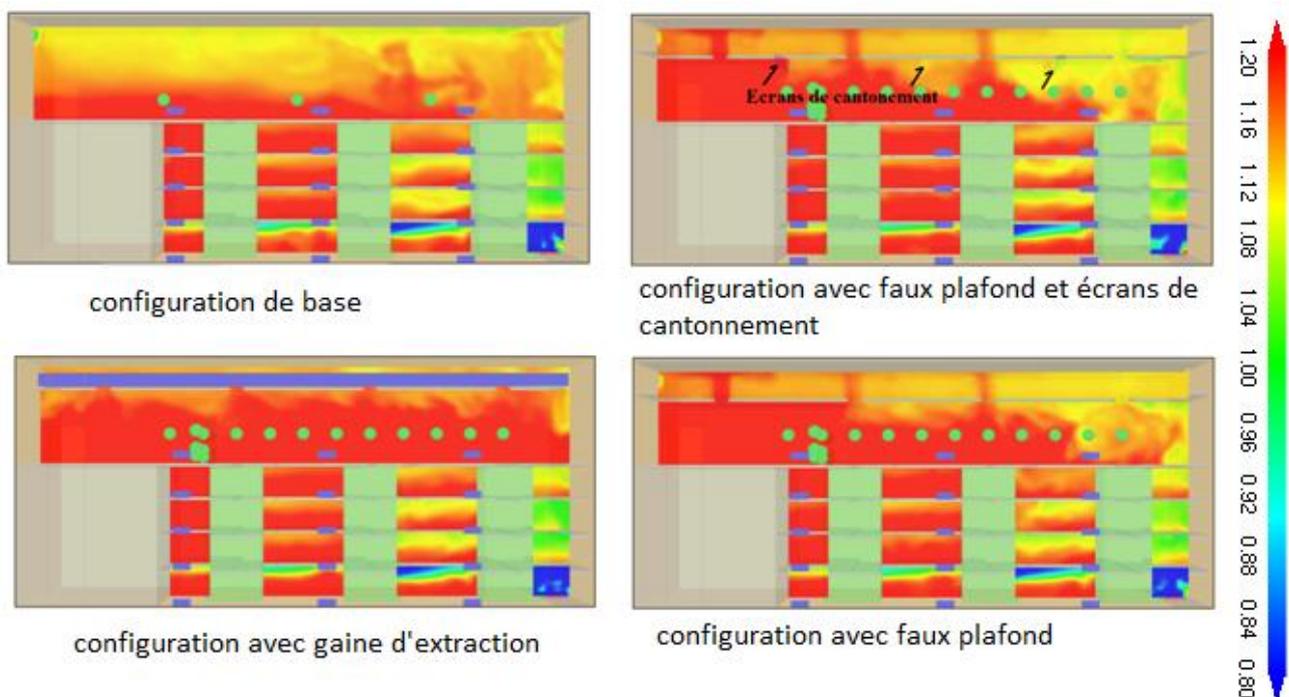


Figure 21: comparaison entre l'efficacité des différentes configurations

La figure 21 ci dessus est une image prise à un temps $t= 55$ secs du début d'injection d'hélium elle regroupe les quatre configurations de base gaine d'extraction, faux plafond sans et avec écrans de cantonnements, elle montre l'inefficacité de la configuration de base par rapport aux autres. Cette configuration est sensée globaliser les volumes d'extraction dans la partie supérieure de la centrale. Mais elle engendre un enfumage de toute la plate forme de déchargement.

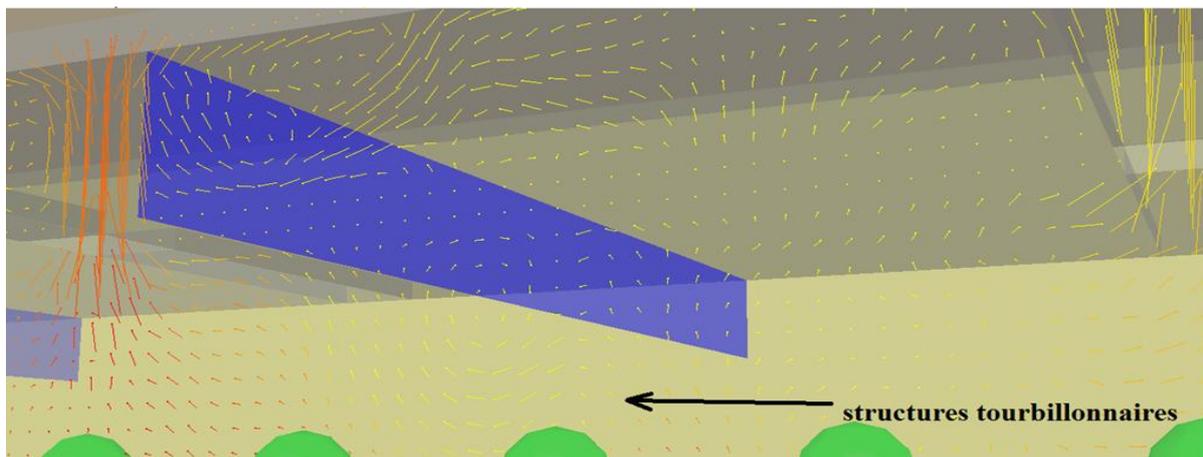


Figure 22: vecteurs vitesse au niveau des écrans de cantonnements

Nous pouvons ensuite constater que les écrans de cantonnements n'apportent pas d'efficacité supplémentaire à la configuration faux plafond. En effet ces derniers sont sensés permettre une accumulation des fumées au niveau des extracteurs, afin d'augmenter la concentration en fumée des gaz évacués. Dans notre cas ils font obstacles à l'écoulement des fumées, les obligeant à descendre plus bas vers le sol pour les contourner, créant ainsi des structures tourbillonnaires, et destratifiant aussi la couche de fumée, la figure ci-dessus illustre cet effet.

Cette première série de résultats pour le scénario de feu de 1 MW au niveau du 4^{ème} sous-sol va nous permettre d'écarter en premier lieu la configuration de base et la solution avec écrans de cantonnement comme configuration à proposer pour le désenfumage de la centrale, nous allons donc concentrer notre étude sur la configuration avec gaine d'extraction et celle avec faux plafond.

4.3. Influence des débits d'extraction

Dans cette partie on va essayer de déterminer quel est le débits d'extraction à appliquer sur chacune des différentes configurations de désenfumage pour extraire les fumées d'incendie de la centrale sans pour autant faire un appel d'air trop important qui aura pour conséquence de destratifié les fumées et induire un mélange excessif de ces dernières avec l'air frais, ou un poinçonnage au niveau des trappes d'extraction au cours duquel de l'air frais serait aspiré à travers la couche de fumée à la place de cette dernière au niveau des trappes d'extraction.

Et pour ce faire on va tester différentes valeurs de débits d'extraction, en commençant par la valeur réglementaire, mais comme on peut l'imaginer, cette dernière ne sera pas suffisante, et ce, à cause de la proximité de la porte par rapport à l'extracteur, car ce dernier va puiser le débit à extraire de la porte et non de la centrale, ensuite on augmentera les débits jusqu'à atteindre notre objectif de désenfumage.

4.3.1. Résultats pour la configuration avec faux plafond

Nous avons ci-dessous des images de la distribution de la densité des gaz sur la coupe longitudinale de la centrale pour différentes valeurs du débit d'extraction et au même instant depuis le début de l'injection d'hélium $t=120$ secondes

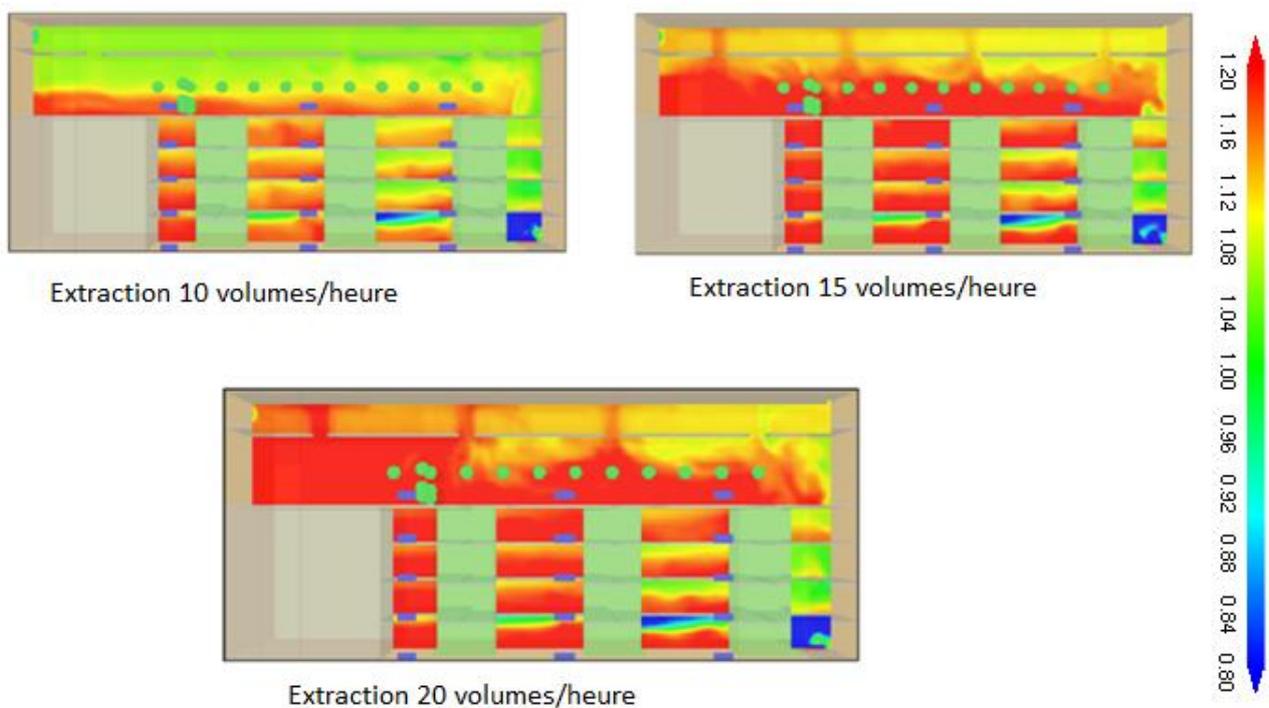


Figure 23: comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit d'extraction pour la configuration faux plafond

On constate que le fait d'appliquer un débit d'extraction de 10 volumes/heure ne donne pas de bon résultats, car comme on peut le voir, toute la partie supérieure est enfumée, et on remarque clairement la différence avec les deux autres valeurs de débits d'extraction, par contre pour départager les débits d'extraction de 15 et 20 volumes/heure, nous allons regarder les graphes obtenus grâce aux capteurs de densités

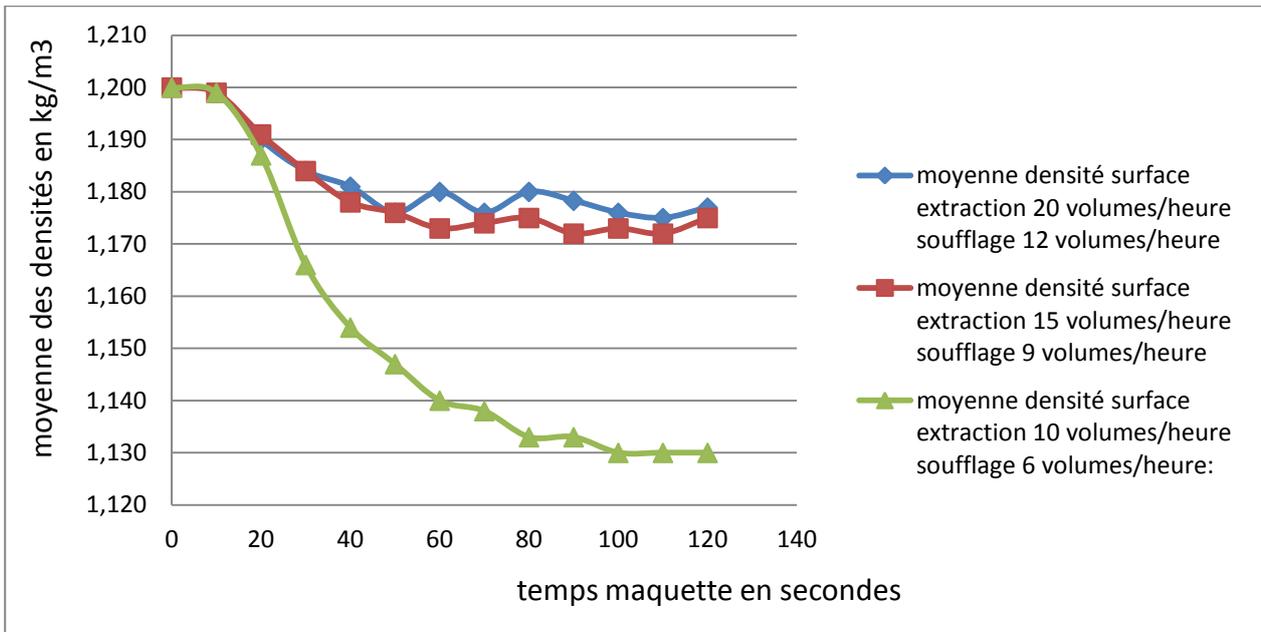


Figure 24: évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

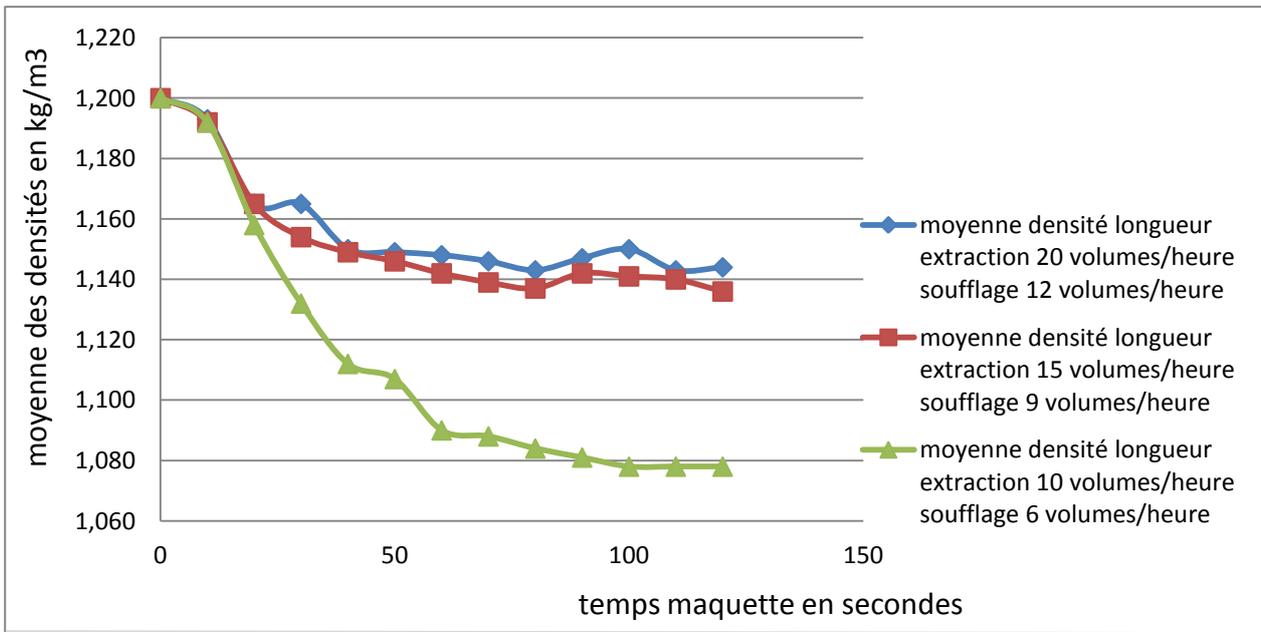


Figure 25: évolution de la moyenne des densités sur la longueur en fonction du temps

On remarque en analysant les deux figures ci-dessus, qui représentent respectivement l'évolution de la moyenne des densités au cours du temps, obtenu grâce aux capteurs mis sur le plan adjacent à la porte et sur la longueur, que les courbes obtenus pour des débits d'extraction appliqués au sein de la centrale de 15 et 20 volumes/heures (respectivement 0,011 m³/s et 0,015 m³/s) sont proche, ceci signifie qu'elles ont des efficacités de désenfumage quasiment identiques. Nous allons donc pour cette configuration choisir le débit de 15 volumes heure.

4.3.2. Résultats pour la configuration avec gaine d'extraction

Comme pour la configuration avec faux plafond, nous commençons l'étude afin de déterminer le bon débit d'extraction à appliquer au sein de la centrale dans cette configuration avec gaine d'extraction, par une figure qui va illustrer les résultats obtenus pour les différentes valeurs du débit d'extraction.

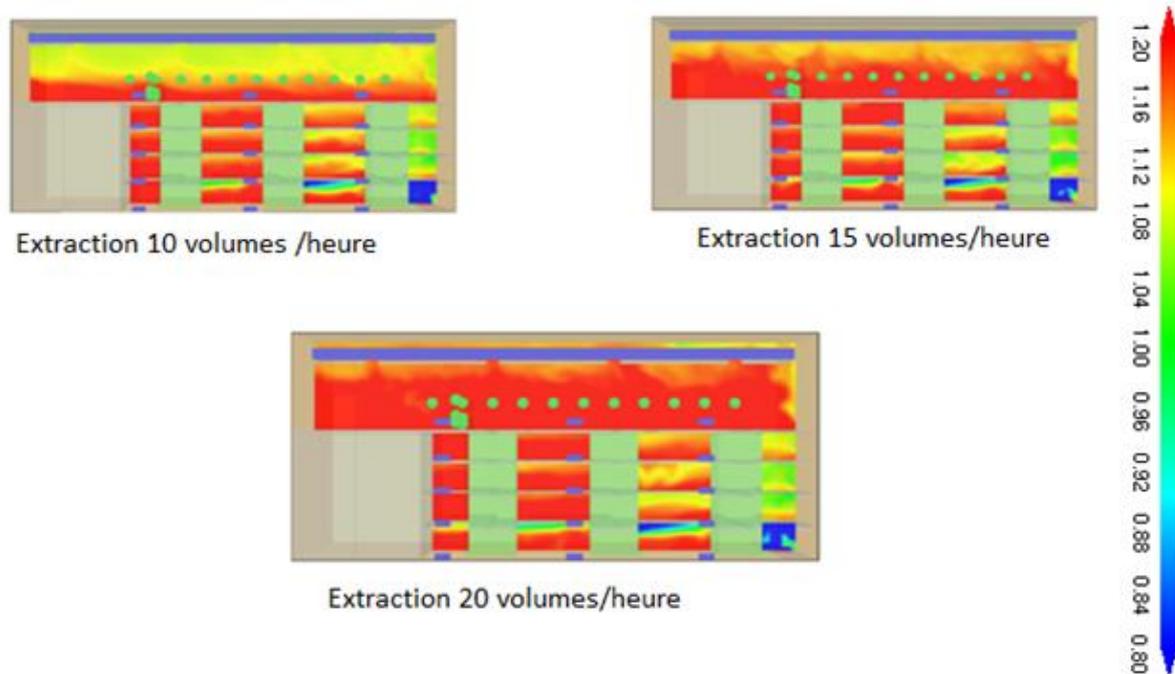


Figure 26: comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit d'extraction pour la configuration gaine d'extraction

On remarque en analysant ces images, qui représentent la distribution de la densité des gaz présent au sein de la maquette sur le plan médian à l'instant $t=120$ secs, que le fait d'appliquer un débit d'extraction de 10 volumes/heure est insuffisant pour extraire les fumées ou dans notre cas le mélange air/hélium, et contrairement à la configuration précédente on arrive même à constater une nette différence entre les images représentant la distribution de la densité pour les débits d'extraction de 15 et 20 volumes/heure, ceci doit être due aux pertes de charge occasionnées par la gaine d'extraction.

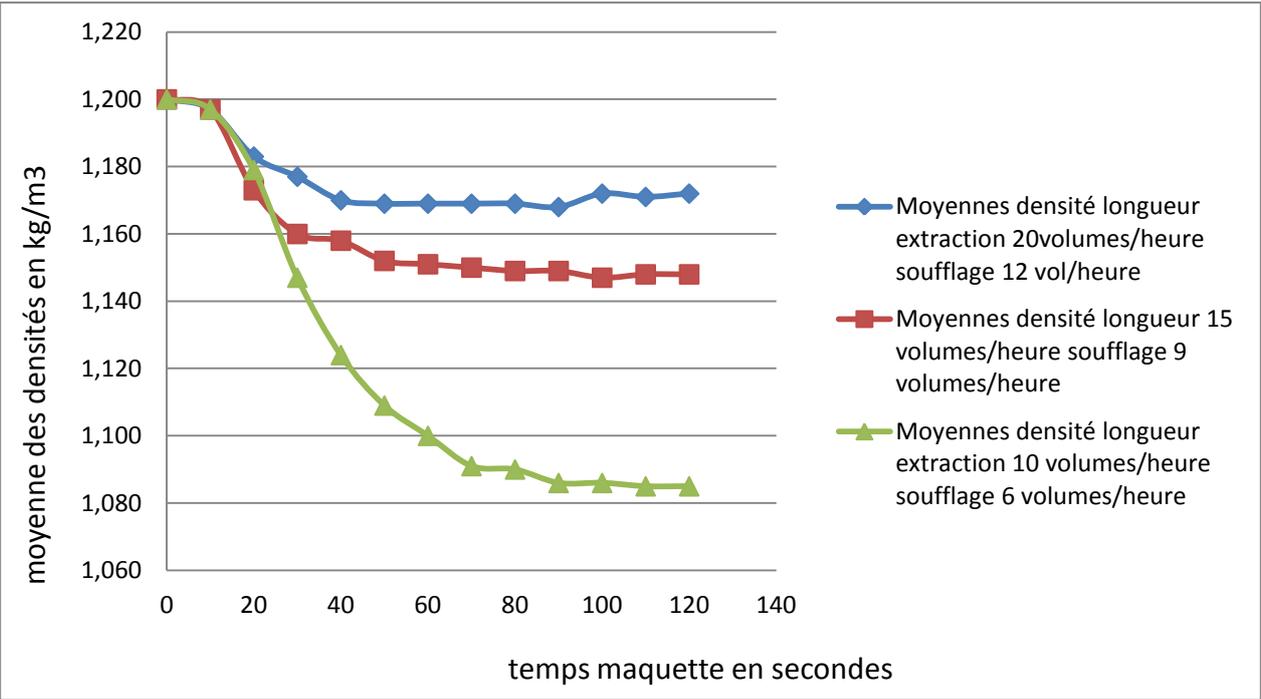


Figure 27 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur en fonction du temps

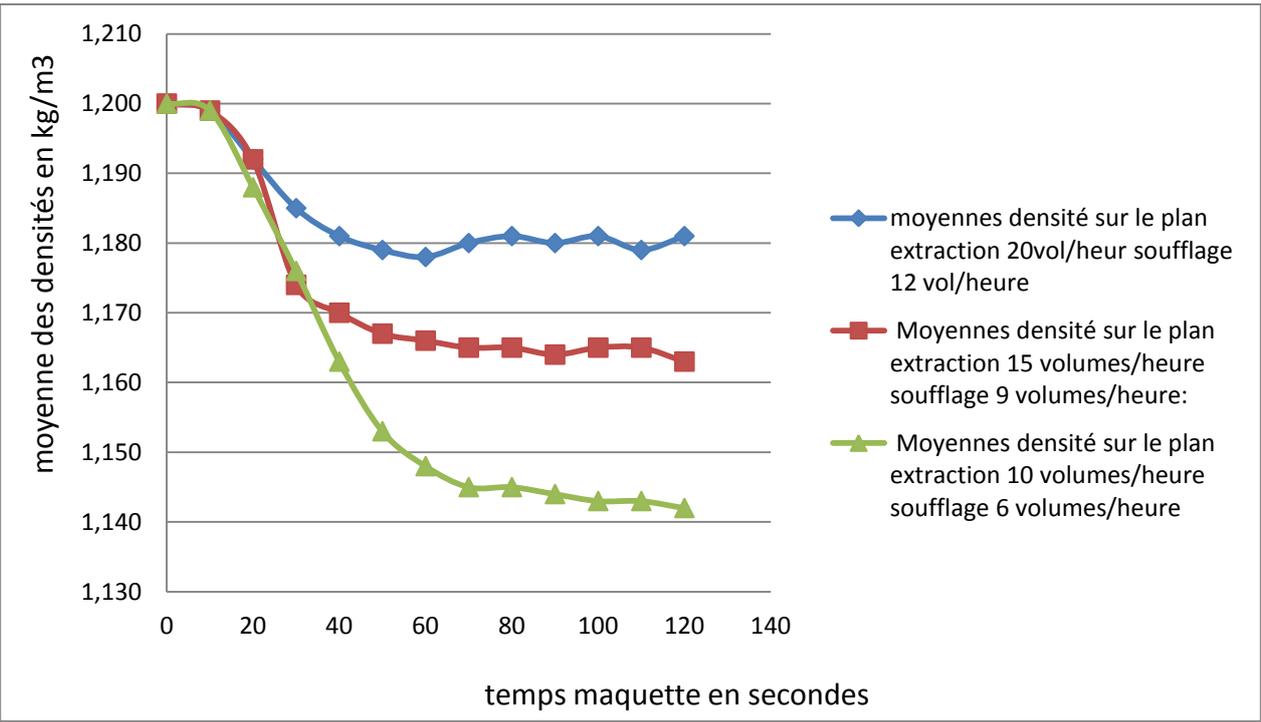


Figure 28 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

On remarque sur ces deux graphes, qui représentent respectivement l'évolution de la moyenne des densités au cours du temps obtenu grâce aux capteurs mis sur le plan adjacent à la porte et sur la longueur, que la courbe obtenue pour un débit d'extraction appliqué au sein de la

centrale de 20 volumes/heure, est bien au dessus des deux autres , ce qui signifie un meilleur désenfumage de la centrale, on optera donc pour cette valeur en extraction pour cette configuration.

4.3.3. Résultats pour la configuration trappes/trémies

Nous allons, maintenant, essayer de déterminer le bon débit d'extraction à appliquer pour le désenfumage de la centrale en configuration trappes/trémies ; comme précédemment nous commençons l'étude par les images de la distribution de la densité sur le plan médian de la centrale à l'instant $t=120\text{sec}$ du début d'injection d'hélium et pour différentes valeurs de débits d'extraction.

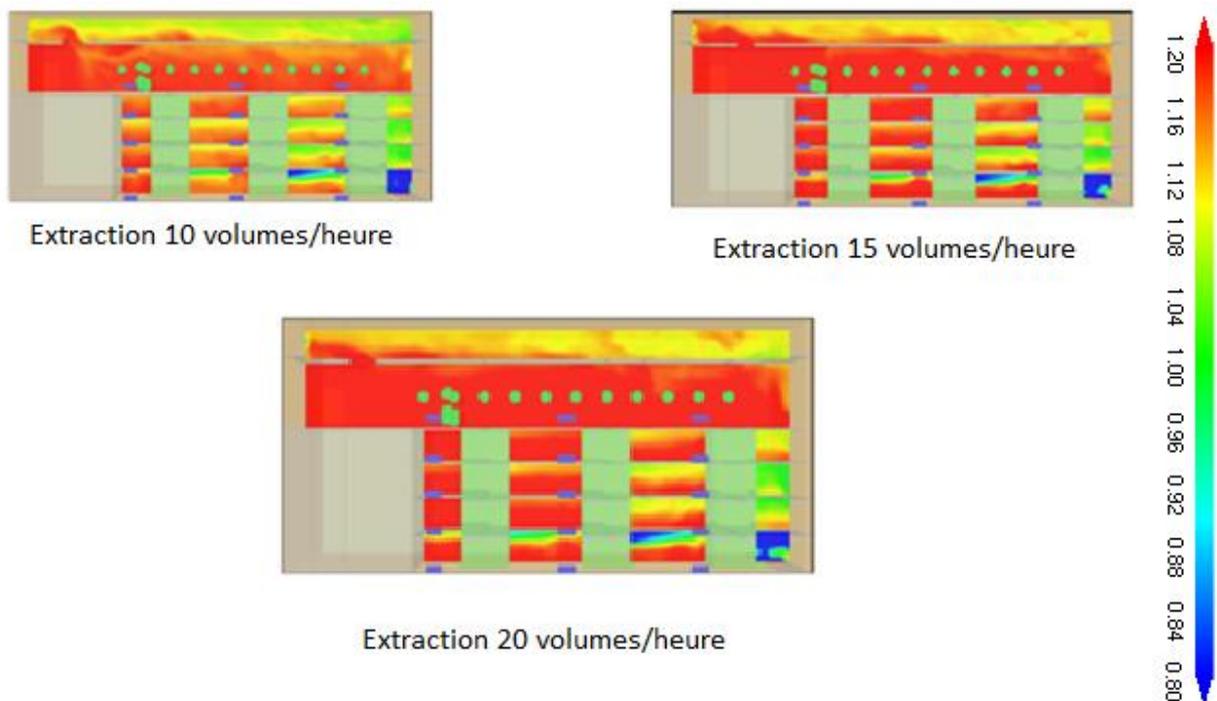


Figure 29: comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit d'extraction pour la configuration trappes/trémies

Dans cette configuration on constate que comme pour la configuration faux plafond avec les trappes centrales les débits d'extractions de 15 et 20 volumes/heure donnent quasiment les mêmes résultats. Voyons ce qu'il en est pour les graphes obtenus grâce aux capteurs de densités.

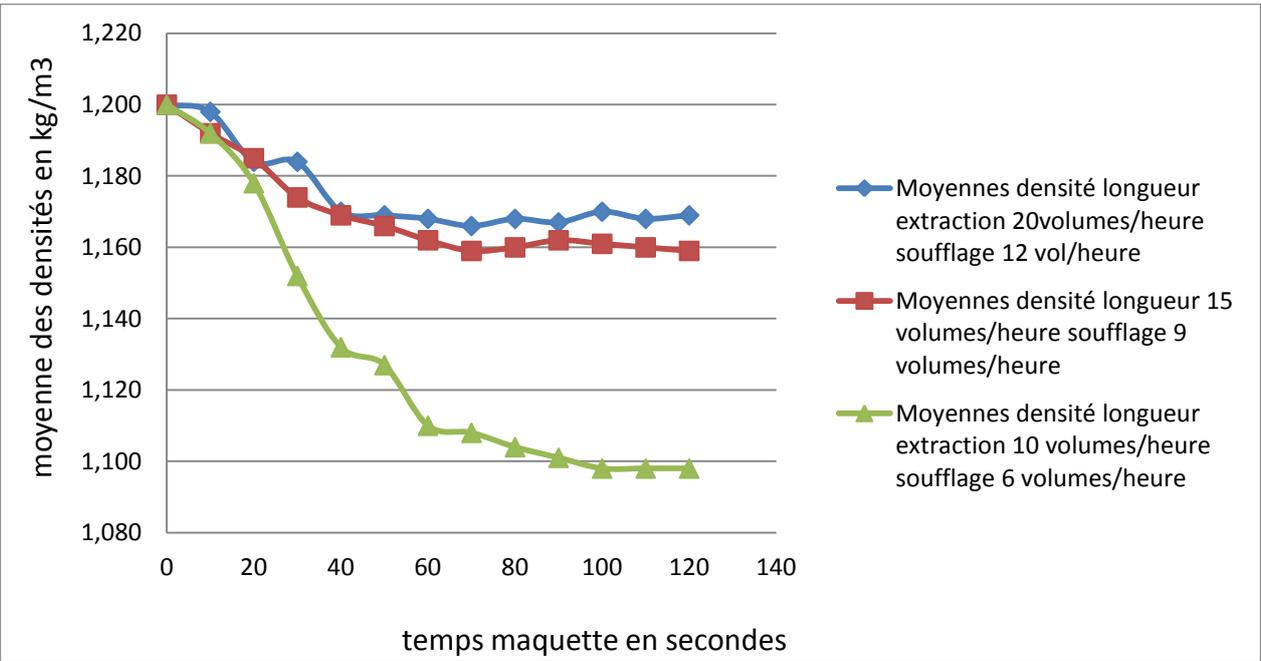


Figure 30 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur en fonction du temps

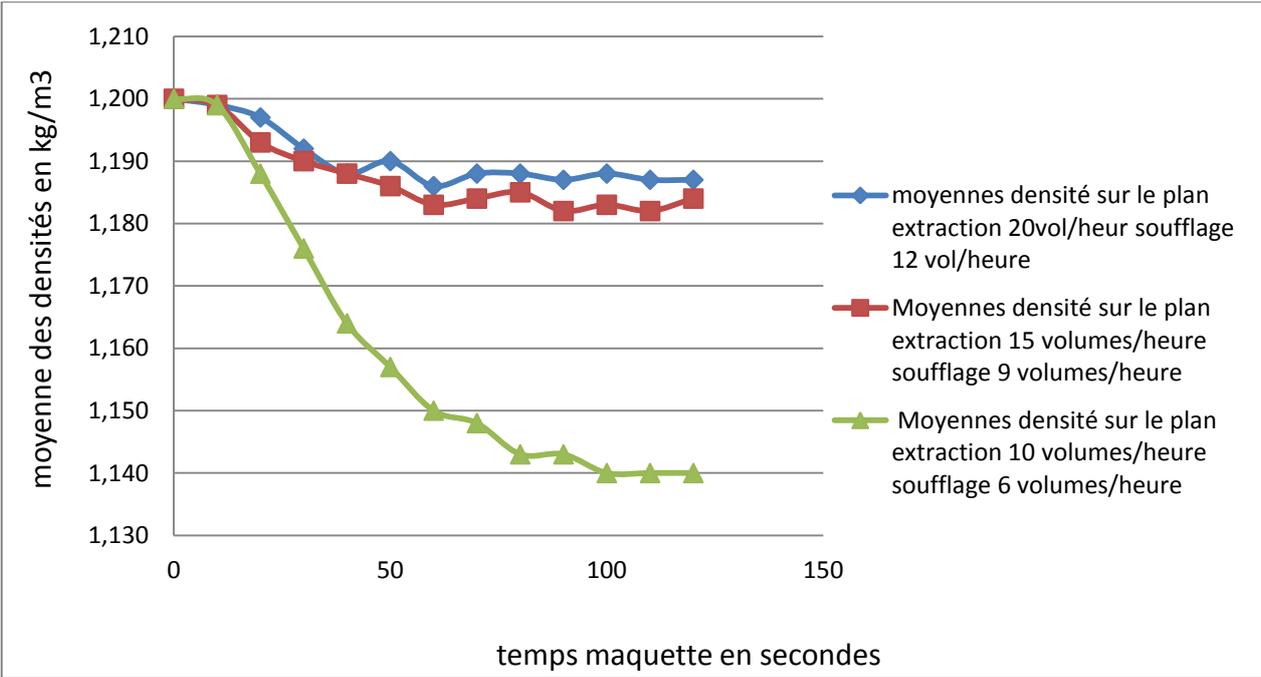


Figure 31 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

Ces deux graphes, qui représentent respectivement l'évolution de la moyenne des densités au cours du temps obtenu grâce aux capteurs mis sur la longueur et le plan adjacent à la porte, illustrent clairement que pour les débits de 15 et 20 volumes/heure, on obtient le même résultat de désenfumage, on va donc opter pour un débit d'extraction de 15 volumes/heure pour cette configuration.

4.4. Influence du débit de soufflages

Plusieurs valeurs de débit de soufflages ont ensuite été testées: 6, 9, 12 volumes heures plus une configuration OPEN réalisée en remplaçant les bouches de soufflage par une ouverture sur le milieu extérieur; le débit est alors assuré par la dépression créée par le phénomène d'entraînement de l'air entourant le panache de fumée. La valeur de soufflage OPEN ne permet de fournir qu'un débit de compensation à ce débit d'entraînement, cette dernière a été testée pour des raisons de simplification des tests expérimentaux et ainsi remplacer le soufflage par des trous sur la maquette.

4.4.1. Résultats pour la Configuration Faux plafond avec trappes centrales:

Nous avons ci-dessous une figure de la distribution de la densité sur la coupe longitudinale de la centrale en configuration faux plafond avec trappes centrales pour différentes valeurs du débit d'extraction et au même instant depuis le début de l'injection d'hélium $t=120$ secondes

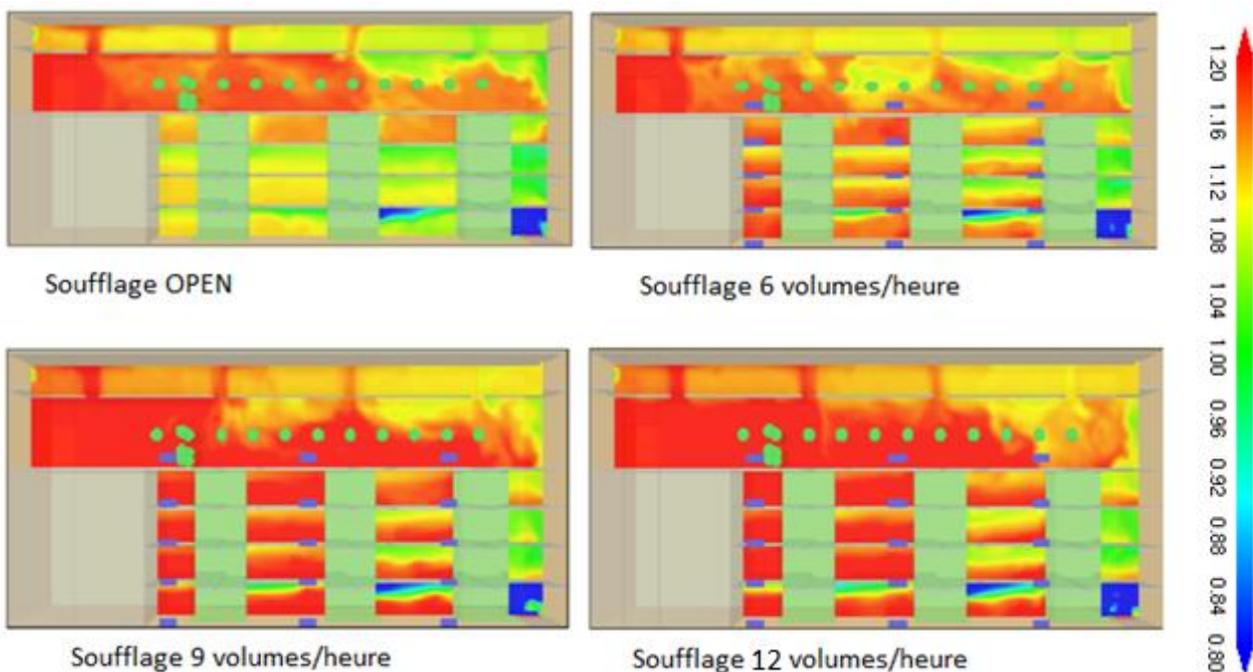


Figure 32 : comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit de soufflage pour la configuration faux plafond

La figure 32 ci-dessus permet de comparer l'efficacité du désenfumage pour un temps de 120 secondes en temps maquette pour différentes valeurs de débit de soufflage. Nous pouvons constater que la configuration présentant les valeurs de soufflage de 12 volumes/heure est la plus efficace aussi bien sur la plate-forme supérieure que dans les étages inférieures, permettant une évacuation sécurisée des personnels de la centrale et une intervention sur le feu dans de bonnes conditions de

visibilité et de salubrité de l'air. Cette configuration parait satisfaire les exigences de désenfumage.

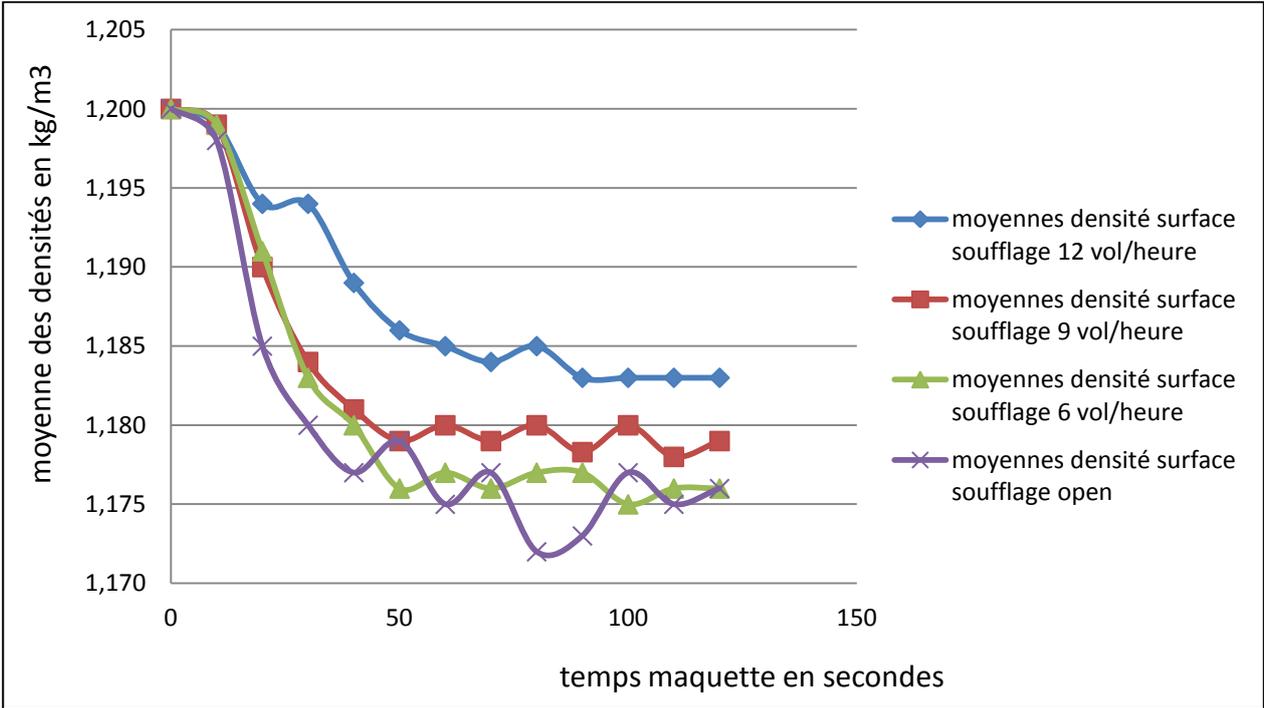


Figure 33 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

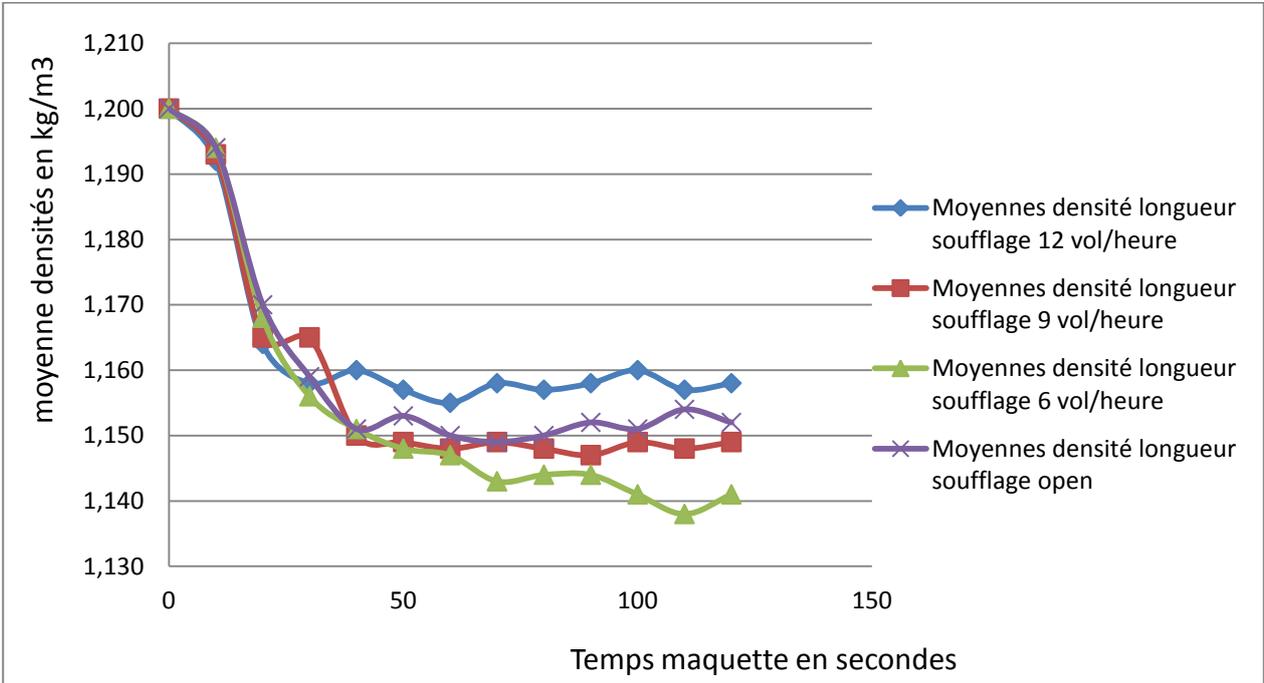


Figure 34 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur en fonction du temps

Le Premier graphe illustre bien l'influence positive du soufflage en ce qui concerne l'avancement du front de fumée ; car comme on peut le constater la courbe de soufflage de

12 volumes/heure et au dessus des autres courbes. En effet un soufflage plus important permet de limiter l'apport d'air venant de la porte homogénéisant la répartition des vitesses au sein de la maquette et limitant ainsi les structures tourbillonnaires qui entraînent les couches de fumée du plafond vers le bas, causant aussi une surpression plus importante au sein de la maquette ce qui va pousser les fumées vers le haut rendant plus facile leurs extraction.

Il sera par conséquent nécessaire d'avoir recours pour cette configuration à un soufflage de 12 volumes/heure lors de l'expérimentation sur la maquette.

4.4.2. Résultats pour la Configuration trappes/trémies:

Nous allons maintenant essayer de déterminer le bon débit de soufflage à appliquer pour la configuration trappes/trémies. Comme précédemment nous commençons l'étude par des images de la centrale prise à 120sec du début d'injection d'hélium et pour différents débits de soufflage

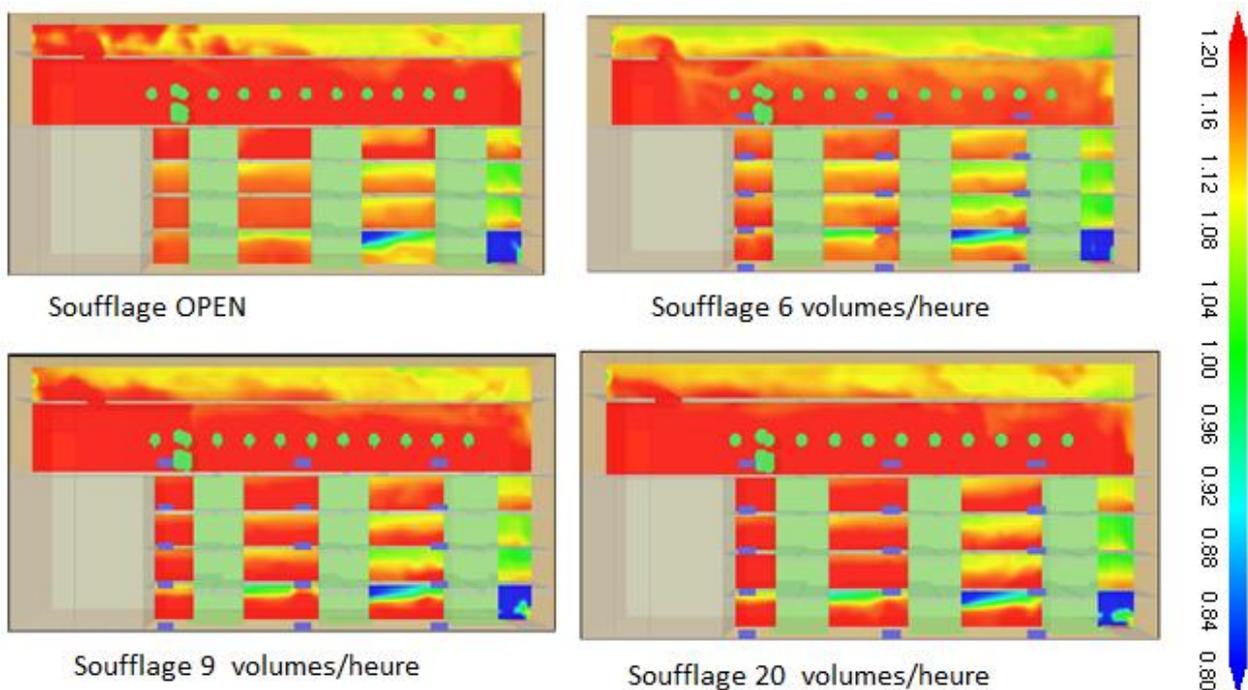


Figure 35 : comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit de soufflage pour la configuration trappes/trémies

Cette figure qui regroupe les résultats des quatre valeurs de débit de soufflage pour la configuration trappes/trémies nous laisse conclure que la valeur du débit de soufflage a peu d'influence sur le désenfumage de la centrale dans cette configuration ; Il apparaît toutefois que le sous sol réagisse une fois de plus positivement à l'insufflation d'air. Cependant pour des raisons pratiques, il pourra être utilisé sur la maquette une valeur de soufflage OPEN puisque cette dernière

est très proche du point de vue des résultats de la valeur 12 volumes/heure.

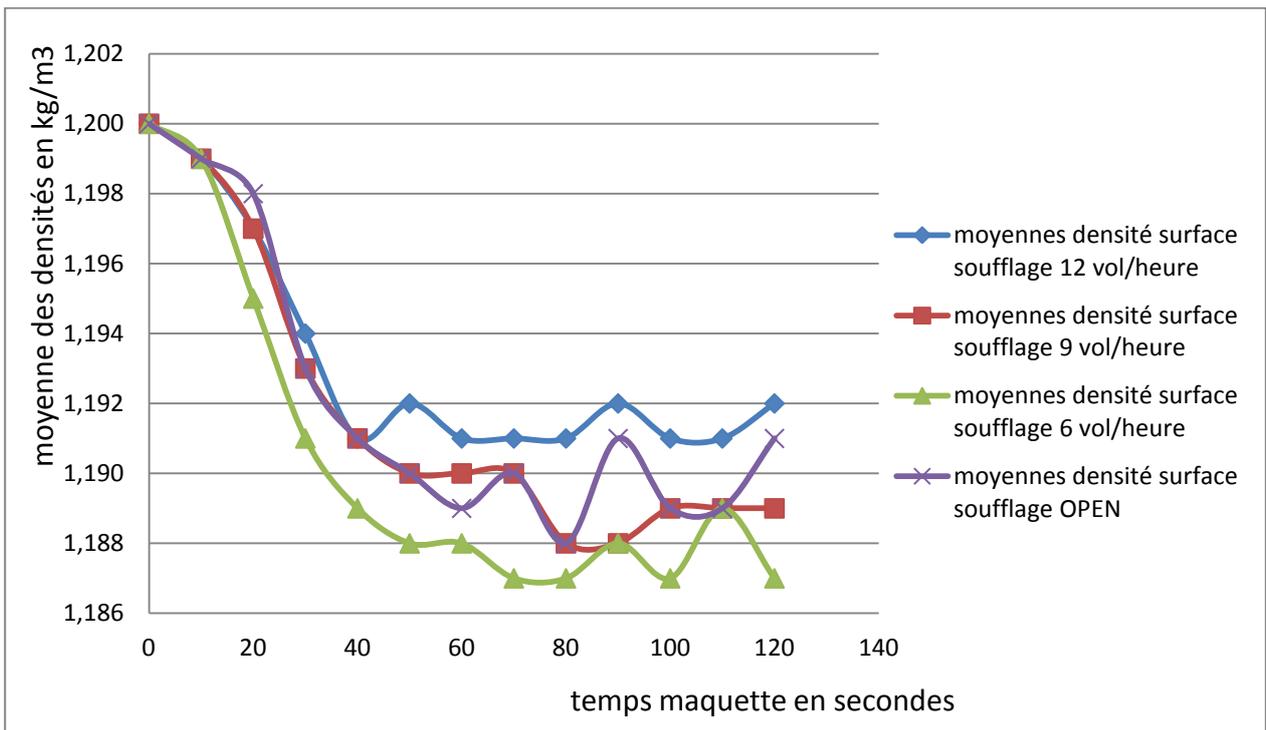


Figure 36 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

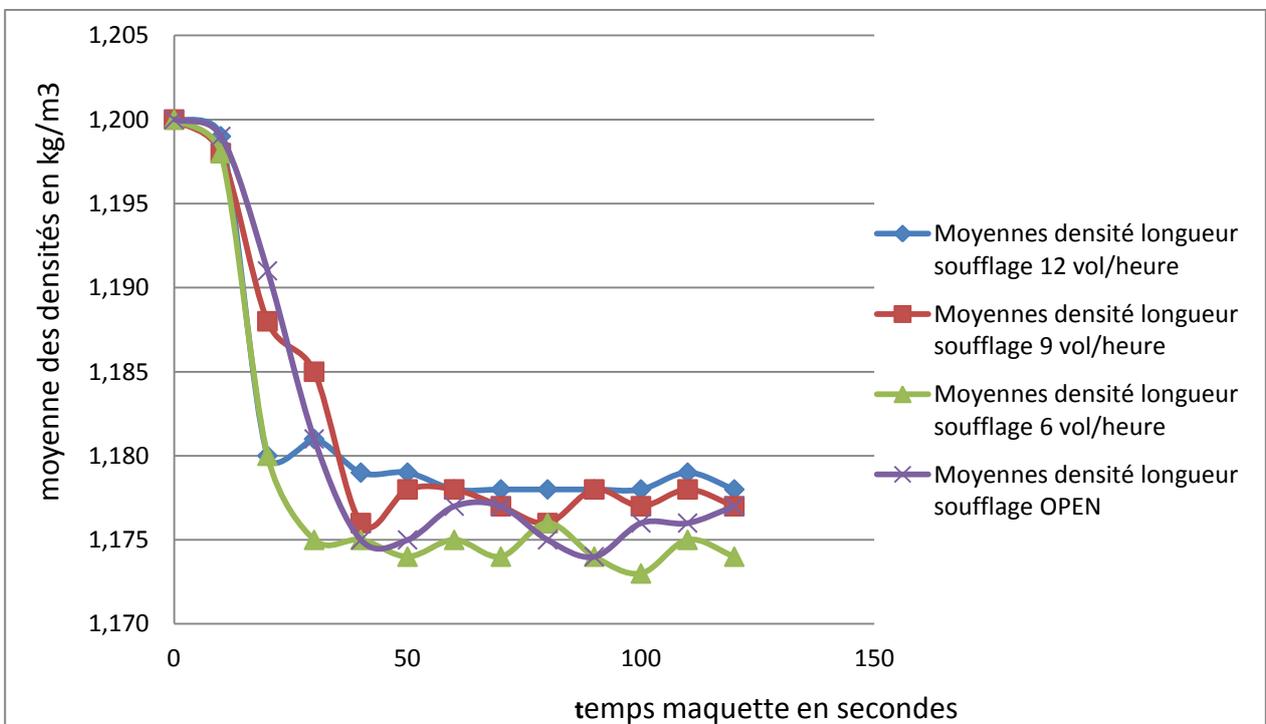


Figure 37 : évolution de la moyenne des densités sur longueur en fonction du temps

Les deux figures 36 et 37 qui représentent respectivement l'évolution de la moyenne des densités au cours du temps obtenu grâce aux capteurs mis sur le plan adjacent à la porte et la

longueur, nous montrent que contrairement à la configuration précédente, celle-ci ne semble que peu affectée par les valeurs de soufflage imposées. Ceci est en accord avec la constatation faite pour la figure précédente, on va donc choisir dans nos expérimentations le soufflage OPEN pour des raisons de simplification.

4.4.3. Résultats pour la configuration avec gaine d'extraction

Nous avons ci-dessous des images de la distribution de la densité des gaz sur la coupe longitudinale de la centrale pour différentes valeurs du débit de soufflage et au même instant depuis le début de l'injection d'hélium $t=120$ secondes.

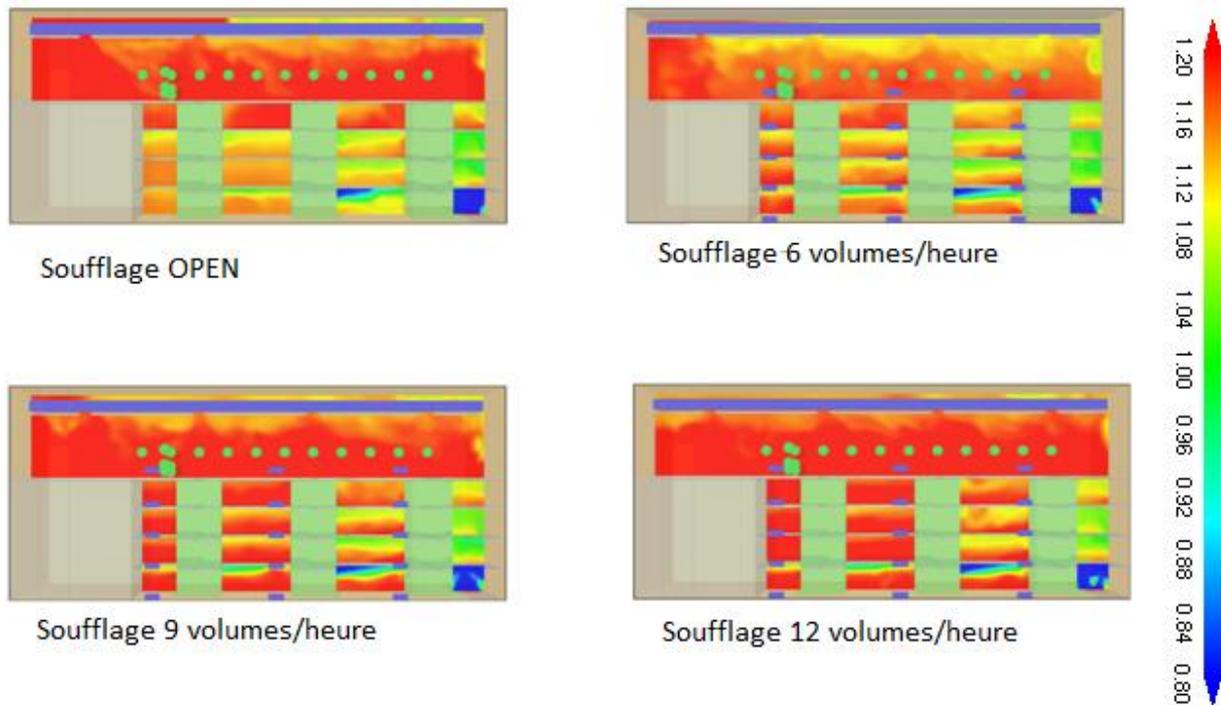


Figure 38 comparaison entre les résultats des différentes valeurs du débit de soufflage pour la configuration gaine d'extraction

En ce qui concerne la configuration avec gaine d'extraction on remarque que le soufflage de 6 volumes/heure est à exclure, car comme on peut le constater le niveau supérieur est presque entièrement enfumé, et pour le reste des valeurs de soufflage elles paraissent satisfaire les exigences de désenfumage, mais nous allons aussi analyser les graphes obtenus grâce aux capteurs de densité pour décider de la valeur du débit de soufflage adéquate.

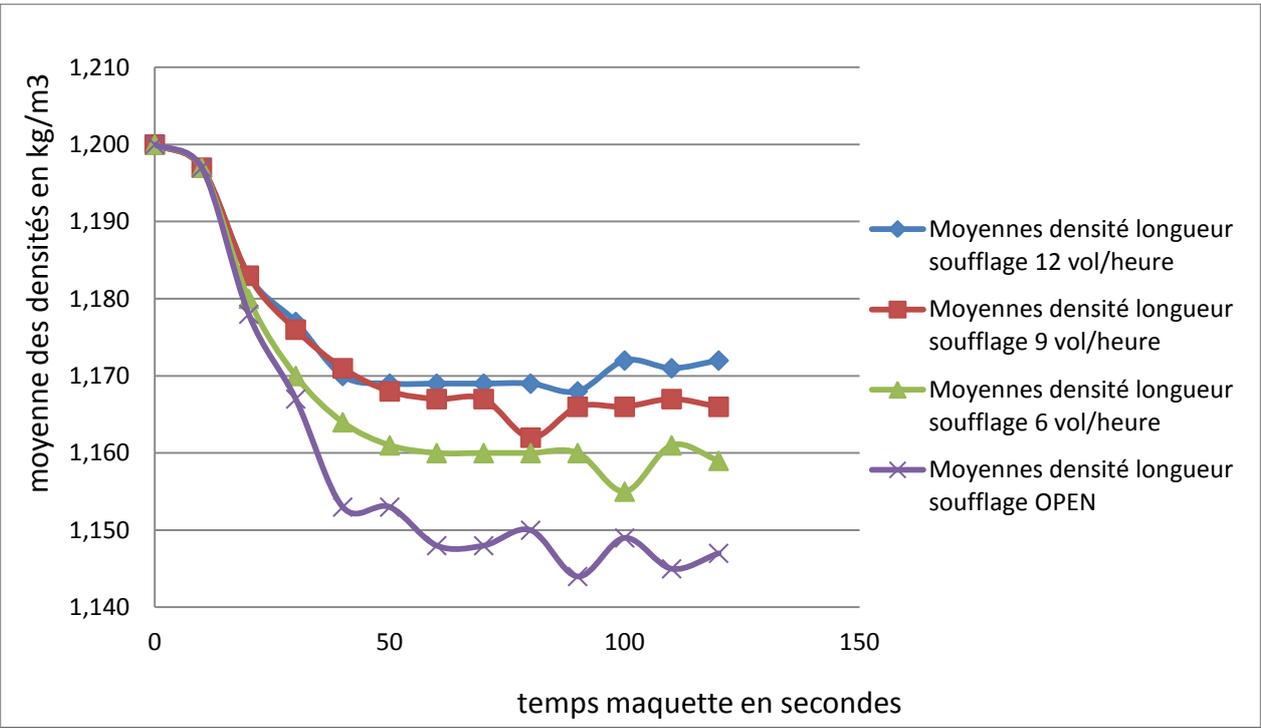


Figure 39 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

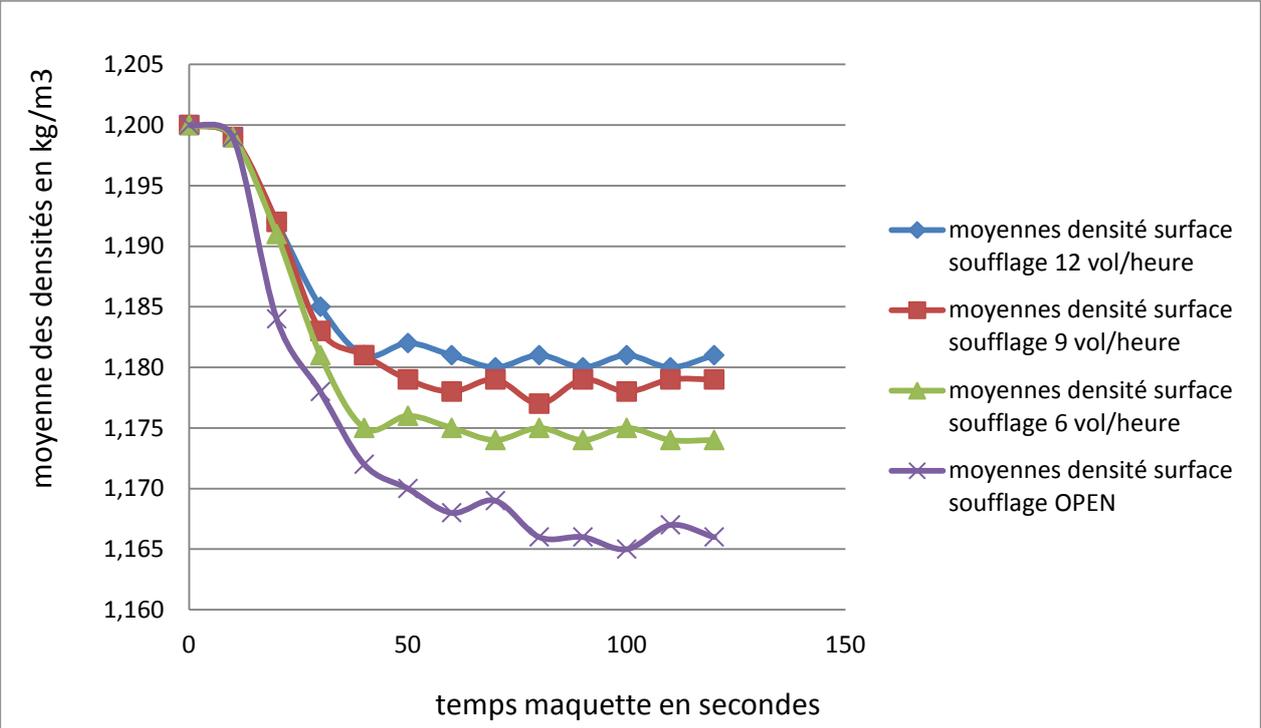


Figure 40 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

Les deux graphes de densité ci-dessus, qui représentent respectivement l'évolution de la moyenne des densités au cours du temps obtenu grâce aux des capteurs mis sur le plan adjacent à la porte et la longueur, et qui nous renseigne sur l'état de salubrité de l'air nous laissent conclure pour

cette configuration avec gaine d'extraction que les deux valeurs de soufflage de 9 et 12 volumes/heure donnent quasiment les mêmes résultats, on va donc pour cette configuration choisir le débit de 9 volumes/heure

4.5. Comparaison de l'efficacité des quatre configurations:

Après avoir déterminé les valeurs adéquates des débits d'extraction et de soufflage pour la maîtrise des fumées d'incendie nous allons comparer l'efficacité de nos configurations entre elles, et ce, sur la base de trois scénarios d'incendie.

Pour les comparaisons nous procéderons comme précédemment c'est-à-dire une image prise au bout de 120 secs de simulation plus les graphes établit à partir des capteurs de densité.

4.5.1. Comparaison pour le scenario de feux de 1 MW

Nous commençons tout d'abord par le scenario de feu de 1 MW qui se déclencherait au quatrième sous-sol par un épandage d'huile qui prendrait feu.

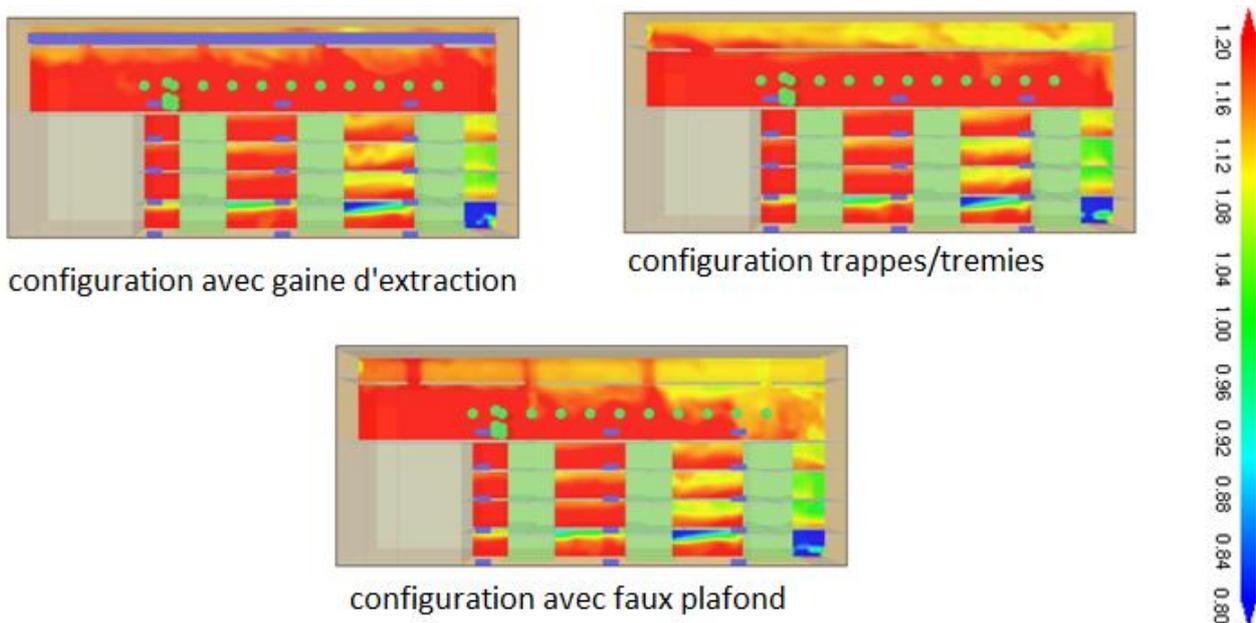


Figure 41 : comparaison entre les trois configurations pour le scenario de feu de 1 MW

Les images ci-dessus représentent la distribution de la densité sur le plan médian de la centrale, et ce, pour différentes configurations de désenfumage et pour le même scenario de feu. Elles ont été prises au bout de 120secs, et en les analysants, nous pouvons constater que les trois configurations donnent de bons résultats ; mais celle qui désenfume le mieux la centrale est clairement la configuration trappe/trémies

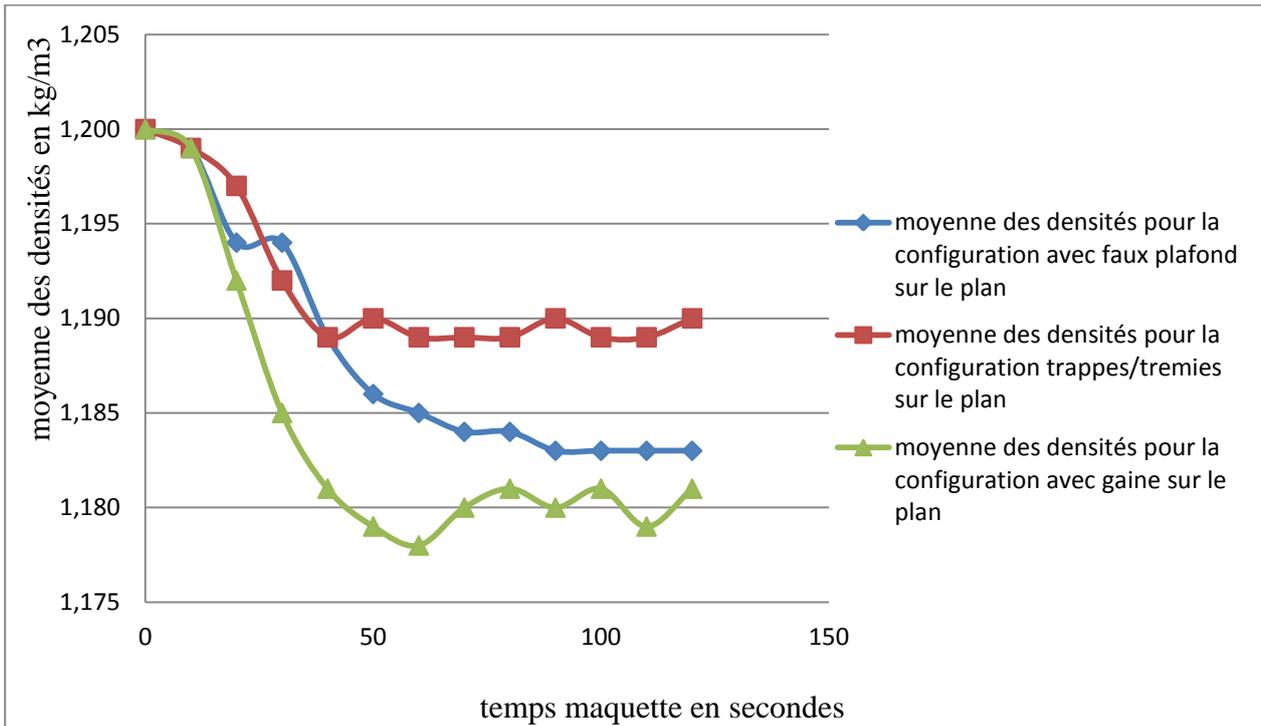


Figure 42 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

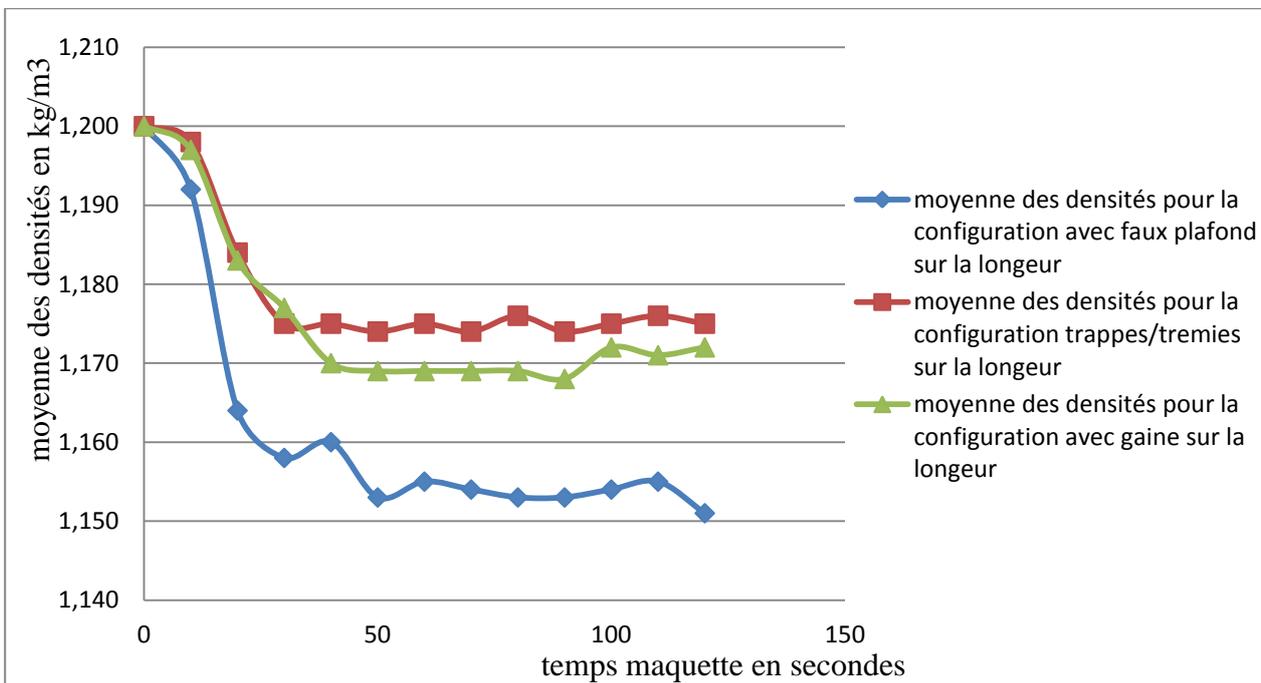


Figure 43 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur a la porte en fonction du temps

Les deux graphes ci-dessus, qui représentent respectivement l'évolution de la moyenne des densités au cours du temps, obtenu grâce aux capteurs mis sur le plan adjacent à la porte et la longueur, indiquent clairement que la configuration trappe/trémie est la meilleure pour la maîtrise des fumées d'incendie dans le cas du scenario de feu de 1MW au quatrième sous-sol, avec une

moyenne de densité sur le plan adjacent à la porte de $1,190 \text{ kg/m}^3$, et de $1,178 \text{ kg/m}^3$ sur la longueur.

4.5.2. Comparaison pour le scenario de feux de 3 MW

Nous allons passer maintenant au scenario de feux de 3MW qui serait due à une armoire électrique qui prendrait feu au premier niveau.

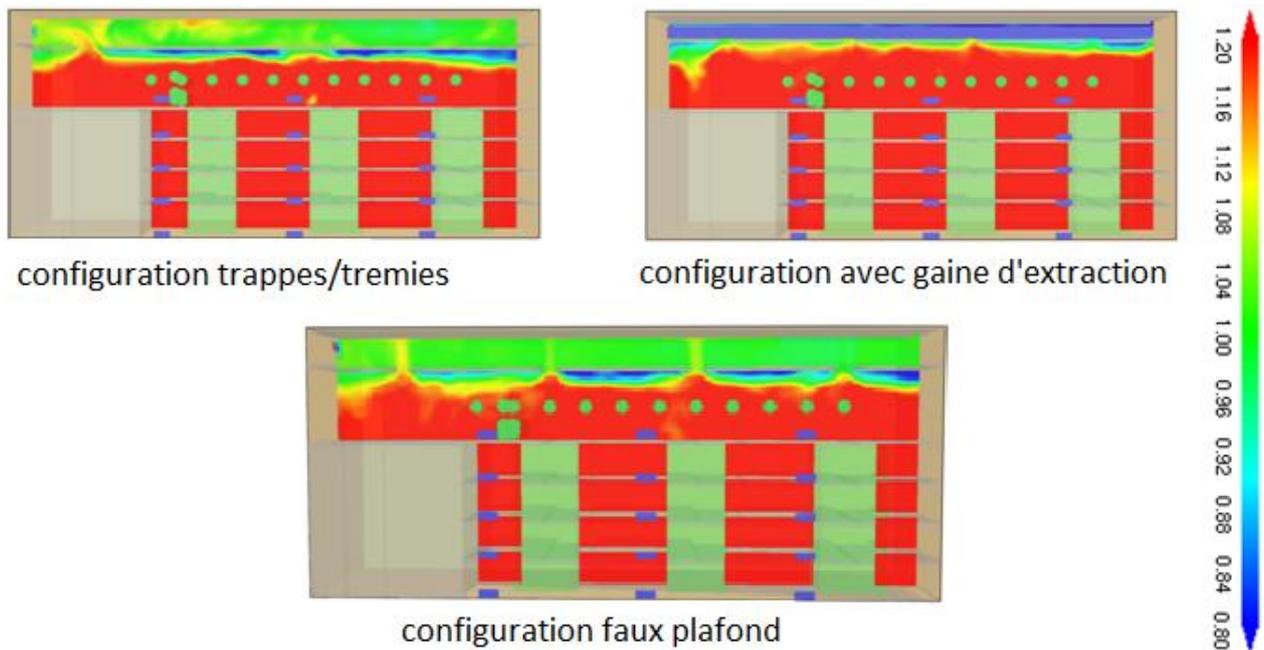


Figure 44 : comparaison entre les trois configurations pour le scenario de feu de 3 MW

Les images ci-dessus représentent la distribution de la densité sur le plan médian de la centrale, et ce, pour différentes configurations de désenfumage et pour le même scenario de feu, on ne pourrait comparer ces configurations entre elles en se basant sur cette image prise au bout de 120 secs car à première vue, elles donnent toutes le même résultat satisfaisant.

En effet on constate, sur toutes les configurations une couche de fumée stratifiée et un premier niveau presque entièrement exempt de fumée, nous allons donc nous baser sur les graphes obtenus grâce aux capteurs de densités mis sur le plan adjacent à la porte et sur la longueur.

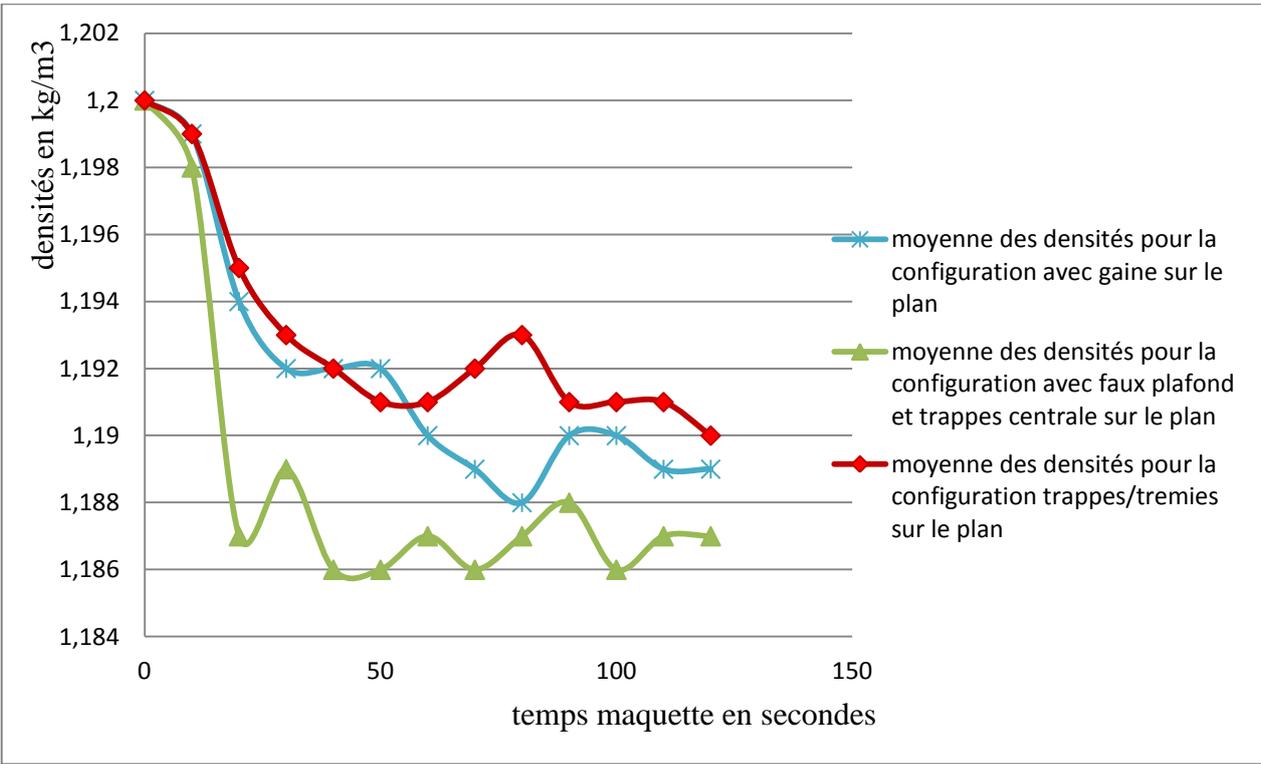


Figure 45 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

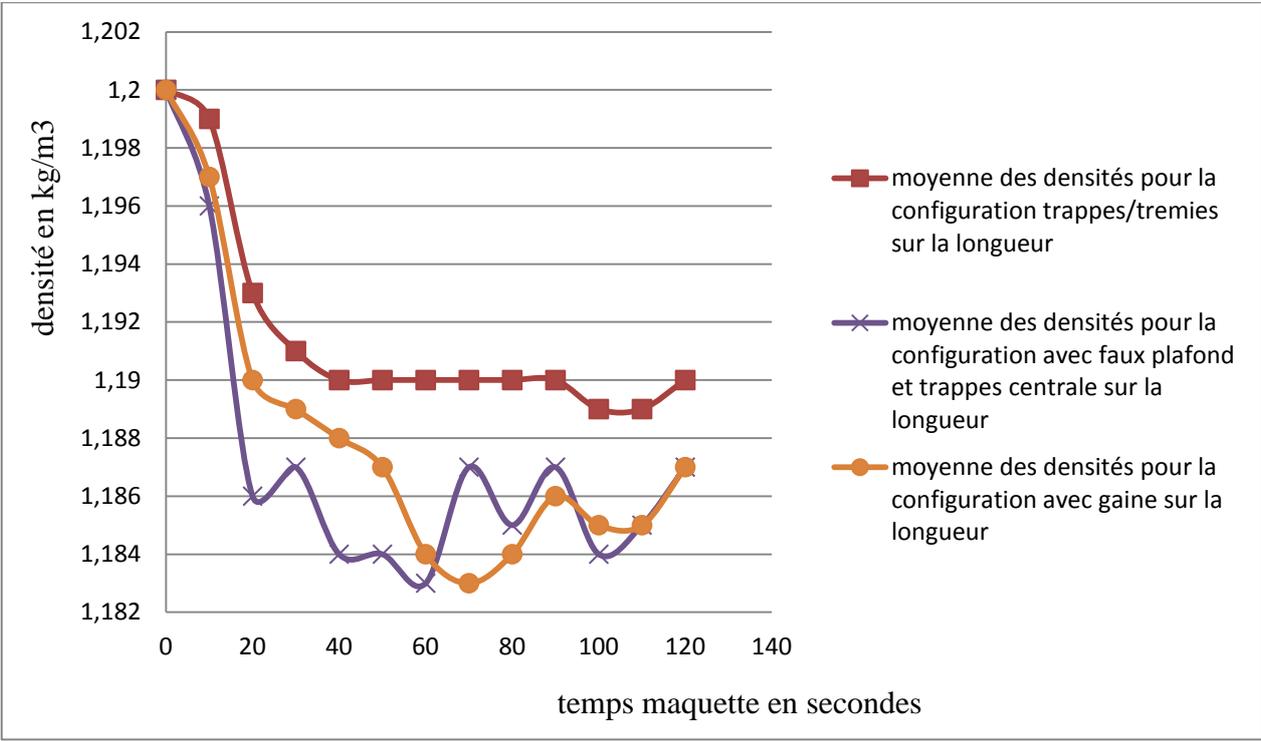


Figure 46 : évolution de la moyenne des densités sur la longueur a la porte en fonction du temps

En regardant les deux graphes ci-dessus qui représentent l'évolution de la moyenne des densités respectivement sur le plan adjacent à la porte et sur la longueur, on remarque que les trois configurations donnent pratiquement les mêmes résultats avec un écart de densité ne dépassant pas

les $0,06 \text{ kg/m}^3$, mais comme pour le scénario précédent la configuration trappes/trémies donne les meilleurs résultats.

4.5.3. Comparaison de l'efficacité des quatre configurations pour le feu de 25 MW

Voyons maintenant ce qui se passe pour le scénario où un poids lourd prendrait feu sur la plate forme de déchargement ; on estime la puissance de ce feu à 25 MW.

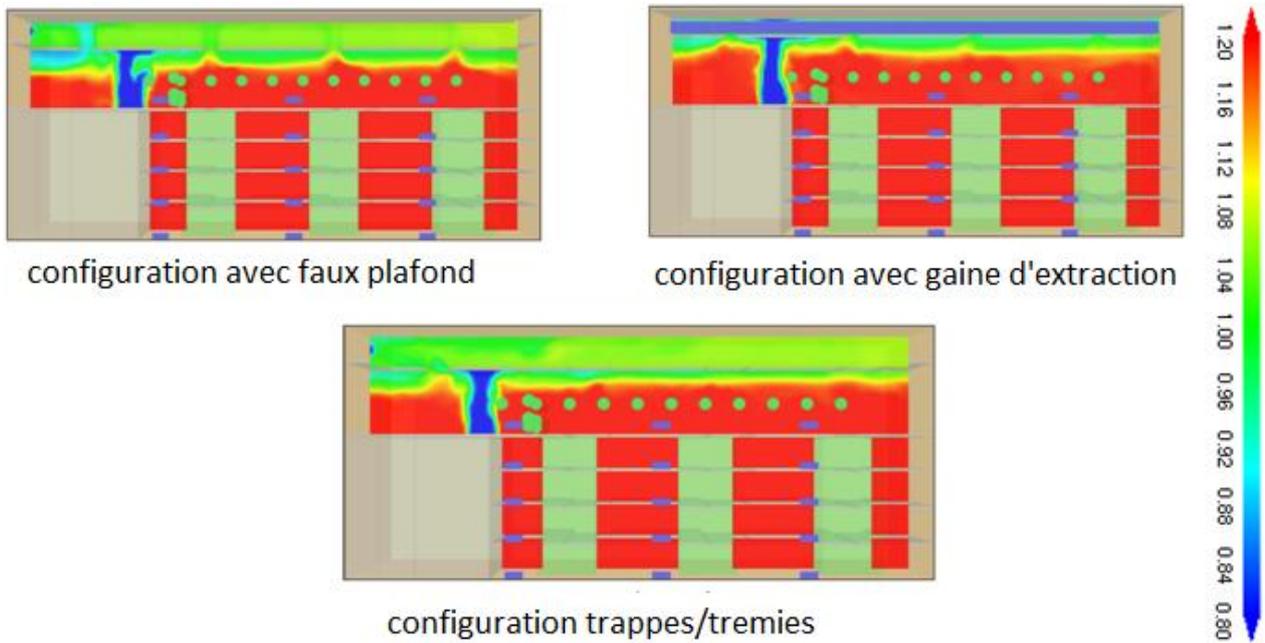


Figure 47 : comparaison entre les trois configurations pour le scénario de feu de 25 MW

Les images ci-dessus représentent la distribution de la densité sur le plan médian de la centrale, et ce pour différentes configurations de désenfumage et pour le même scénario de feu, on ne pourrait comparer ces configurations entre elles en se basant sur cette image prise au bout de 120 secs car à première vue elles donnent toute le même résultat satisfaisant.

En effet, on constate sur toutes les configurations une couche de fumée stratifiée et un premier niveau presque entièrement exempt de fumée, nous allons donc nous baser sur les graphes obtenus grâce aux capteurs de densités mis sur le plan adjacent à la porte et sur la longueur pour mieux les comparer.

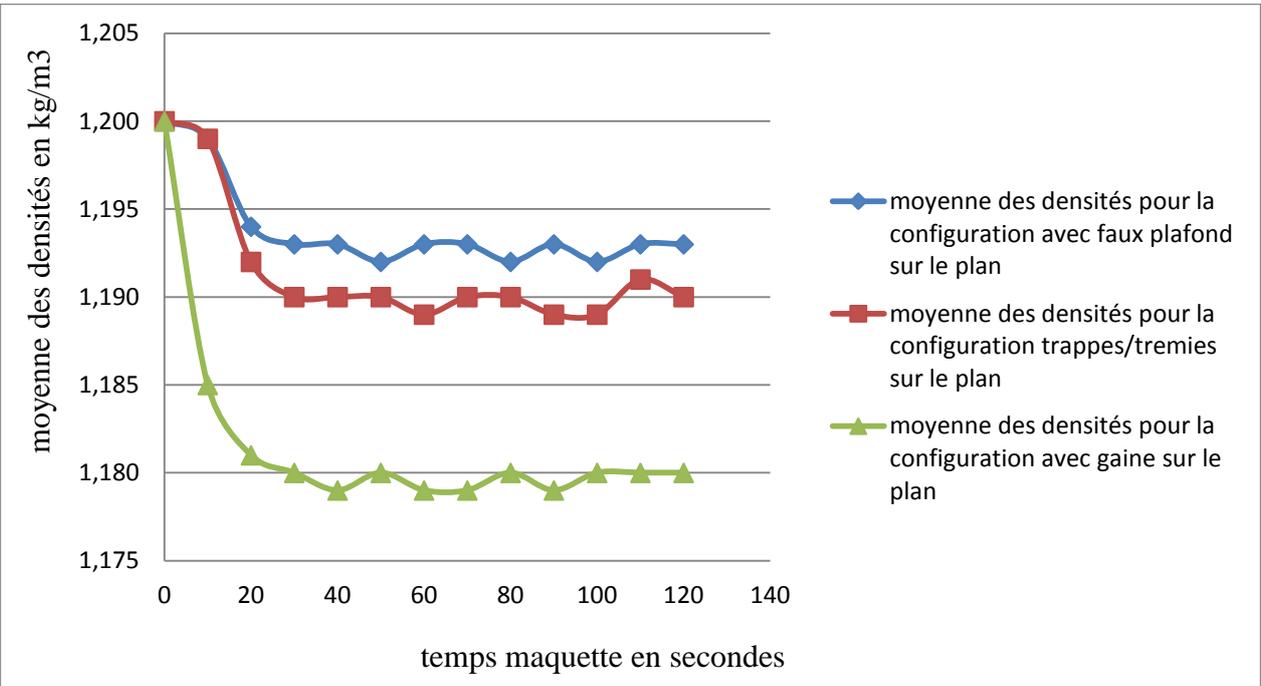


Figure 48: évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

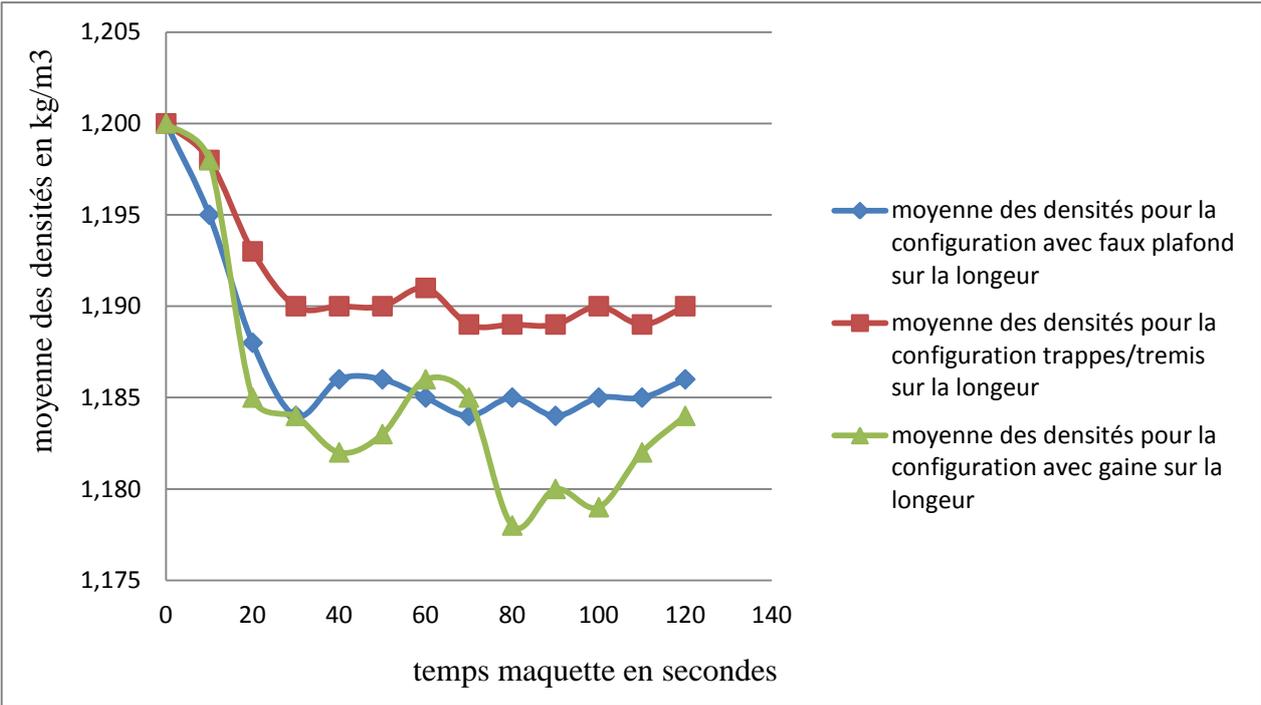


Figure 49 : évolution de la moyenne des densités sur le plan adjacent a la porte en fonction du temps

En analysant ces deux graphes, qui représentent l'évolution de la moyenne des densités respectivement sur le plan adjacent à la porte et sur la longueur, on remarque que sur le premier, la configuration faux plafond avec trappes centrale donne les meilleurs résultats, mais qui sont toutefois très proche de ceux obtenue par la configuration trappes/trémies, et en ce qui concerne le deuxième graphe on constate que la configuration trappes/trémies donne les meilleurs résultats.

CHAPITRE 5: Etude expérimentale

5.1. Les modélisations avec la maquette au 1/50^{ème}

Afin de compléter notre étude numérique sur l'écoulement des fumées au sein d'une centrale hydroélectrique souterraine, nous avons réalisé une maquette au 1/50^{ème} de l'usine hydroélectrique type inspiré du projet du Gavet. Les plans de cette maquette ont été réalisés grâce au logiciel de CDAO CATIA (les plans des pièces sont fournis en annexe). La maquette est constituée d'un assemblage de plaques de plexiglas afin de pouvoir effectuer des visualisations par nappes lasers des écoulements. Elle est modulable afin de pouvoir tester tous les scénarios que nous désirons. Les plancher, le faux plafond ainsi que le toit sont interchangeables.

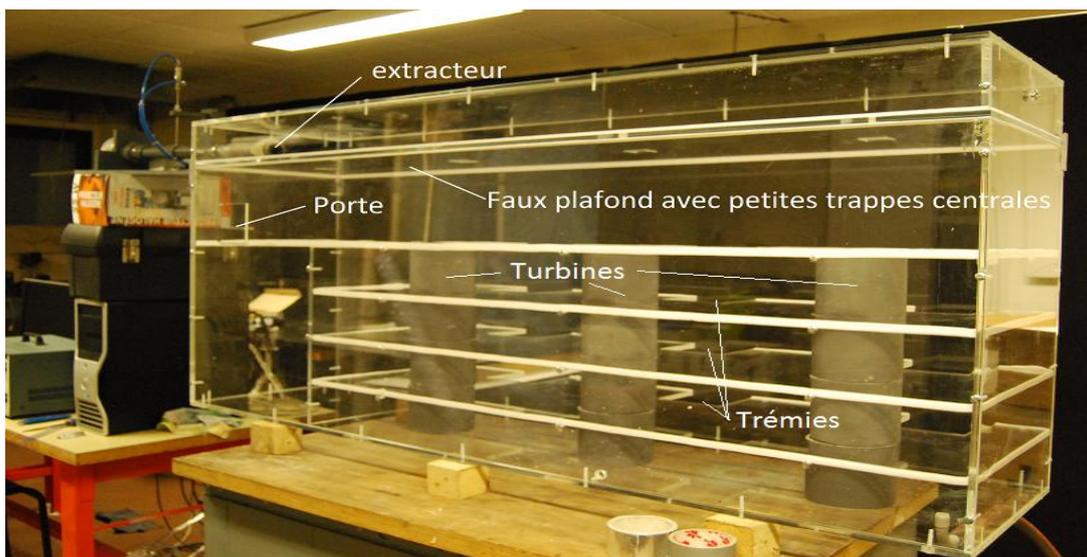


Figure 50 : Maquette en plexiglas de la centrale hydroélectrique en configuration faux plafond avec petites trappes centrales

Les fumées sont modélisées par une injection d'hélium pur correspondant à des températures de fumée en sortie de foyer de 1800°C. Afin de rendre l'hélium opaque au laser, nousensemencerons ce dernier grâce à des particules de chlorures d'ammonium obtenues en faisant passer le gaz tour à tour dans un bain d'ammoniaque et d'acide chlorhydrique.



Figure 51 : dispositif d'ensemencement de l'hélium

Afin de contrôler le débit d'extraction nous utiliserons une sonde à fils chauds qui nous renseignera sur la vitesse des fumées au niveau du tuyau relié à l'extracteur.

L'extracteur est un dispositif comprenant une turbine reliée à un moteur électrique piloté par un potentiomètre. Ce dispositif a été conçu par IRSN dans le cadre d'une étude de désenfumage réalisée à l'institut de mécanique de Marseille (IM2) où se déroule le stage actuel. Le tube de l'extracteur est également équipé d'une sonde Pitot dont nous n'en servons pas du fait que des dépôts de chlorure d'ammonium se forment perturbant le bon fonctionnement de cette dernière.

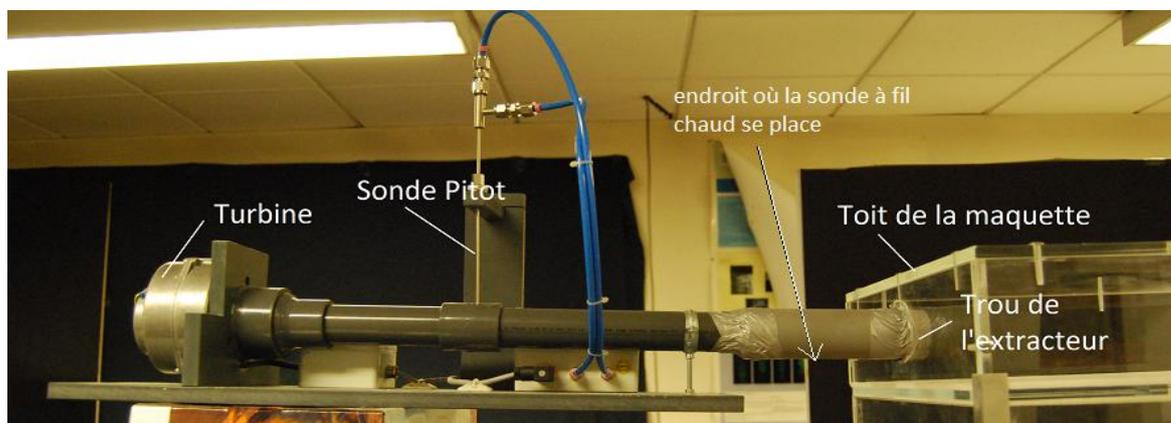


Figure 52 : Dispositif d'extraction des fumées de la maquette

Afin de modéliser le panache d'un incendie de puissance donnée nous devons contrôler le débit d'hélium que nous injectons dans la maquette. Ceci est réalisé par des débitmètres placés avant le dispositif d'ensemencement. Il y a un débitmètre pour l'air comprimé utilisé pour les bouches de soufflages et un pour l'hélium

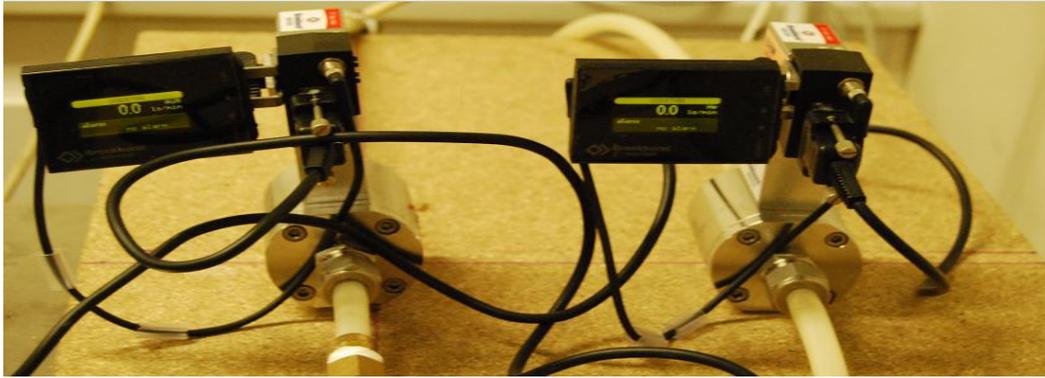


Figure 53 : Débitmètres utilisés pour mesurer les débits d'air et d'hélium injectés dans la maquette

5.2. Les résultats obtenus avec la maquette

Dans la partie expérimentale on a testé les trois configurations de base, avec gaine d'extraction et celle avec le faux plafond sur la base du scénario de feu de 1 MW qui se déclencherait au quatrième sous-sol.

5.2.1. Résultats pour la configuration de base :

On a pris des images de la maquette à 30 secs d'intervalle depuis le début de l'injection d'hélium on obtient alors la figure (54)

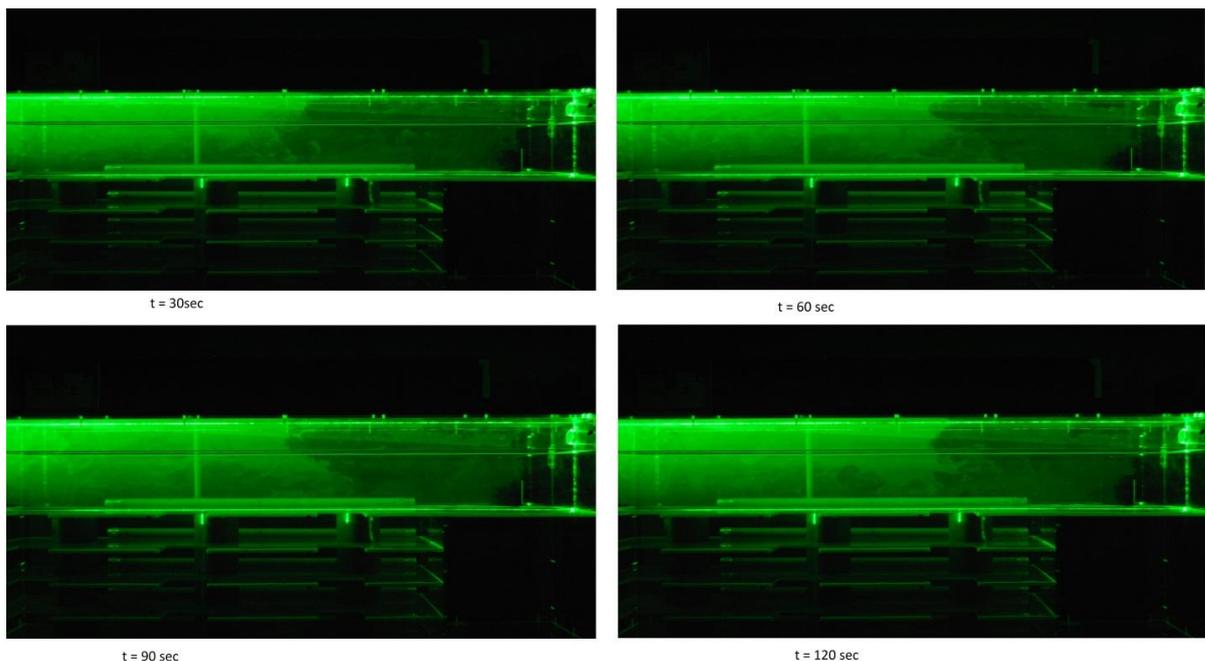


Figure 54 : Résultats obtenu pour la configuration de base

On remarque que dans cette configuration on a toute la plateforme de déchargement et le premier niveau qui sont complètement enfumés, ceci est due au fait que l'extraction soit située à côté de la porte, donc elle va avoir tendance à aller chercher le débit d'air à extraire de la porte ce qui va induire un jet d'air frais à l'entrée et brassé l'air avec les fumées, on aura alors le premier niveau qui sera complètement enfumé, ce qui est en accord avec les résultats numériques.

Voyons maintenant ce qui se passe lorsqu'on place la gaine d'extraction

5.2.2. Résultats pour la configuration avec gaine d'extraction

On a connecté à l'extracteur un tuyau troué à intervalle régulier de 40 cm afin de reproduire la gaine d'extraction, par la suite on a injecté l'hélium et pris des images à 30 secs d'intervalle on obtient la figure (55).

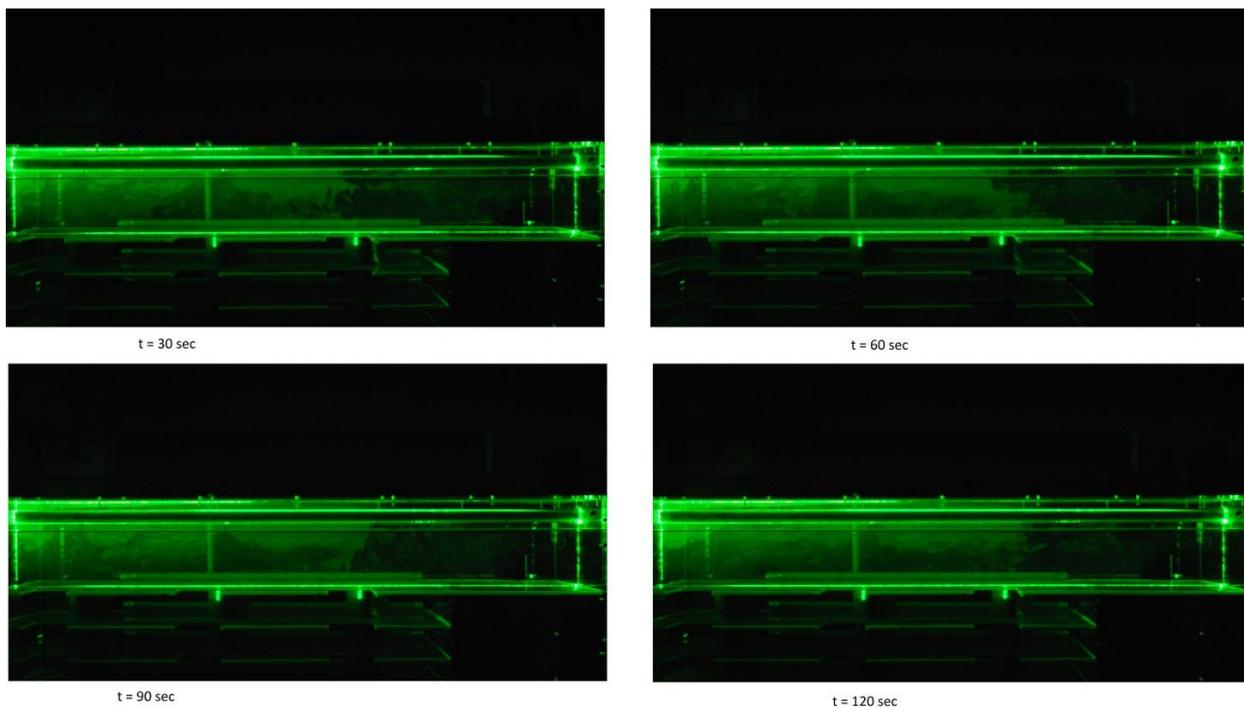


Figure 55 : Résultats obtenus pour la configuration avec gaine d'extraction

On remarque une amélioration par rapport à la configuration précédente le fait de placer une gaine et ainsi distribuer l'extraction sur toute la longueur permet de minimiser le débit d'air rentrant de la porte et plutôt aller chercher la fumée sur toute la longueur de la centrale, mais on n'a pas encore atteint notre objectif avec cette configuration car comme le montre ces images on a encore une partie du premier niveau qui est encore enfumé

5.2.3. Résultats pour la configuration avec faux plafond

Cette fois ci on place une plaque en plexiglas dotée de trappes carrés de 4cm, centrée au milieu de la plaque et à 30cm d'intervalle les unes des autres, on injecte ensuite l'hélium et on prend des images à 30 secs d'intervalle

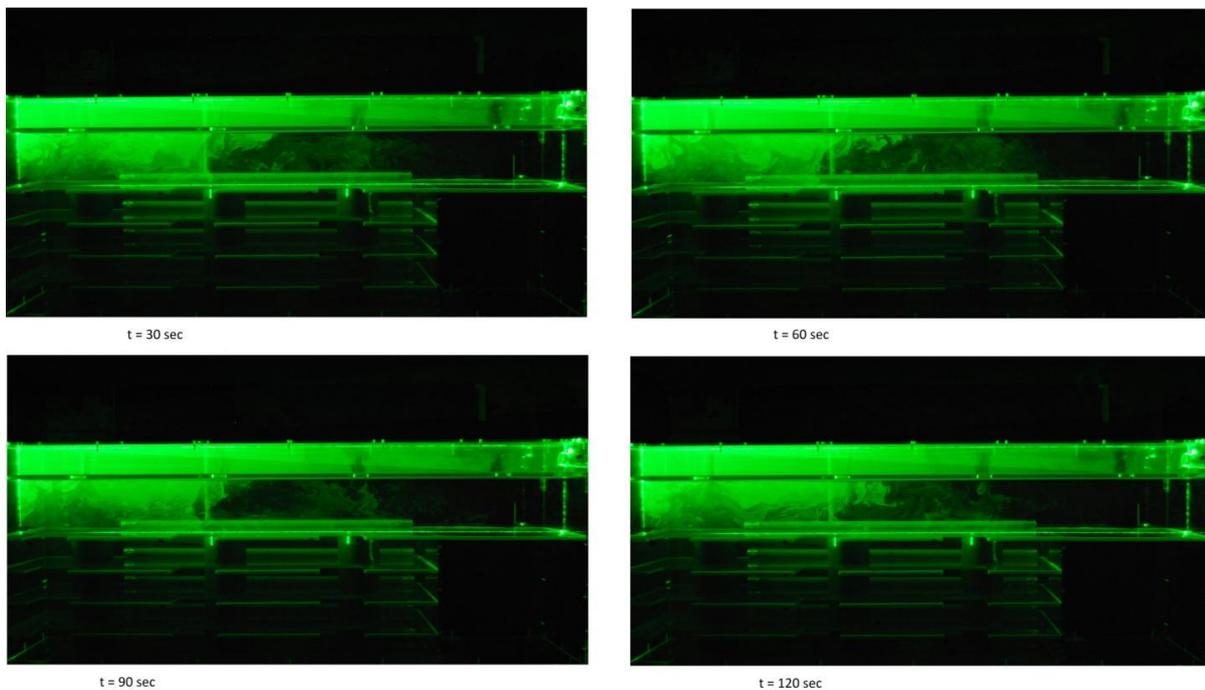


Figure 56 : Résultats obtenu pour la configuration avec faux plafond

On constate une nette amélioration par rapport aux deux autres configurations, le front de fumée recule laissant ainsi une bonne partie du premier niveau exempt de fumée, cette configuration partage la même idée que la précédente, c'est-à-dire distribuer l'extraction sur toute la longueur, l'amélioration réside dans le fait qu'il y ait moins de perte de charge dans le faux plafond que dans la gaine, et les trappes d'extraction sont plus grande donc la vitesse d'extraction sera plus faible pour un même débit au niveau de l'extracteur ; ceci aura comme conséquence de ne pas brasser l'air et la fumée , on peut dire que cette configuration est de loin la plus efficace des trois.

Par la suite on a essayé d'améliorer cette configuration en localisant l'extraction aux zones les plus enfumée. Pour ce faire, on a supprimé les deux premières trappes du faux plafond pour ne laisser que celles du fond, on obtient les résultats suivant en prenant des images à 30 secs d'intervalle depuis le début d'injection de l'hélium

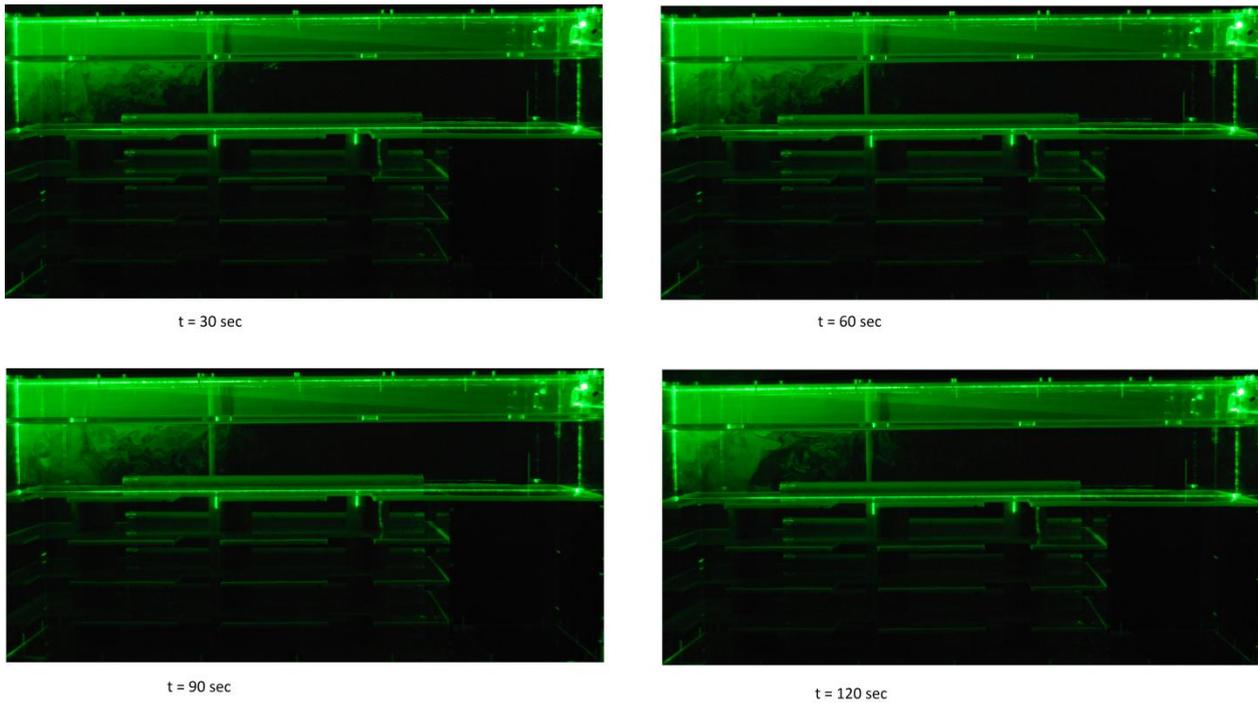


Figure 57 : Résultats pour la configuration avec faux plafond et extraction localisé

En fermant les deux premières trappes on a augmenté le débit d'extraction sur celles du fond c'est-à-dire qu'on a localisé l'extraction au dessus de la trappe par la quelle remonte les fumées et augmentée le débit à ce niveau la, et ainsi empêcher que la fumée se propage dans le premier niveau.

Conclusion générale:

L'étude menée dans le cadre de ce projet de fin d'études 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 permettant d'assurer la sécurité des personnes lors d'un incendie dans une centrale hydroélectrique.

La propagation des fumées d'incendie est une problématique importante car la fumée est un vecteur de transport d'énergie et de la matière (transport des espèces gazeuses, de suie et dans certain cas de radio nucléides) pouvant avoir un impact sur la sûreté des installations d'agression sur les équipements (dysfonctionnement électrique) et de risque pour les personnes (toxicité et opacité des fumées). L'information recherchée est la distribution spatio-temporelle des températures et des concentrations en suies pour les différents scénarii d'incendies rencontrés dans le secteur du désenfumage, l'étude étant à la fois numérique et expérimentale on a pu étudier des écoulements stratégiques pour la compréhension globale des mouvements des fumées. On a pu aussi, lors de cette étude tester l'approche isotherme dite air/hélium qui consiste à simuler les fumées générées lors d'un incendie par injection continue d'hélium dans de l'air au repos. L'objectif de cette technique est de représenter au mieux la dualité entre les forces de flottabilité et d'inertie rencontrées dans un x panache thermique. Ce modèle représente des conditions adiabatiques pour lesquelles les forces de flottabilité sont les forces qui gouvernent les mouvements fluides. Le principal intérêt de cette méthode est de pouvoir étudier les mouvements des fumées dans des configurations géométriques multiples, en laboratoire dans des conditions normales et sans flamme. L'approche isotherme est donc un moyen d'essai sur lequel ils peuvent être facilement reproduits et multipliés.

Plusieurs stratégies de désenfumage pour différents scénarios ont été testées, ces différentes stratégies ont consisté principalement en un soufflage et une extraction soit en utilisant une gaine d'extraction soit un faux plafond avec des trappes, à noter que le scénario où le feu se situe dans le quatrième sous-sol était le plus critique.

Après l'étude numérique nous avons pu déterminer les bons débits d'extraction et de soufflage à appliquer à chaque configuration pour des résultats optimaux, on a pu aussi tester les trois configurations sous différents scénarios et à la suite de ces essais on a pu conclure que les trois

configurations testées sont toutes efficaces face à ces scénarios, mais celle qui donne les meilleurs résultats numériques reste la configuration avec faux plafond trappe/trémies.

On a pu constater lors de nos expérimentations la concordance qu'il y a entre les simulations numériques et les expérimentations maquette, car comme pour les simulations numériques la configuration avec faux plafond trappe /trémies donne les meilleurs résultats, et on a pu aussi tester le fait de localiser l'extraction au dessus du foyer de fumée et constater l'efficacité de cette configuration.

Pour conclure on proposera la configuration avec faux plafond comme configuration de désenfumage pour la centrale, et on recommandera aussi d'automatiser notre système de désenfumage , c'est-à-dire , passer des débits d'extraction et de soufflage adéquat pour la ventilation aux débits de désenfumage déterminer précédemment, et des trappes télécommandées qui se fermeraient et s'ouvriraient en fonction de la localisation du foyer d'incendie dans le but d' assurer un désenfumage optimale de la centrale

Références bibliographiques

- [1] C.LUCCHESI, Etude du mouvement d'un fluide de faible masse volumique entre deux compartiments reliés par une ouverture de type porte, Thèse de doctorat, université de la méditerrané Aix Marseille 2, 2009.
- [2] B.Karlsson, J.G. Quintiere, Enclosure Fire Dynamics, CRC Press LLC, 2000.
- [3] C. Martel, Ventilation et sécurité incendie d'une zone expérimentale, CERN-ST-2000-055.
- [4] B. Debray, N. Gobeau, F. Waymel, rapport d'étude, Incendie en milieu confiné, INERIS, 2007.
- [5] J.Roy, Le mouvement de fumée, M. Sc. Chimie, Janvier 2007.
- [6] F. Chen, S.-W. Chien, H.-M. Jang, W.-J. Chang Stack effects on smoke propagation in subway stations, Continuum Mech. Thermodyn. Journal. (2003) 15: 425–440.
- [7] Pl. Lamballais, article, Pourquoi ça fume, site: Flashover.fr, 18 octobre 2008.
- [8] B.Karlsson, J.G. Quintiere, "Enclosure Fire Dynamics", CRC Press LLC, 2000
- [9] P.Carlotti, "Mécanique des fluides pour la ventilation des tunnels routiers", Centre d'études des tunnels, 2005.
- [10] B. Debray, N. Gobeau, F. Waymel, Rapport d'étude "Incendie en milieu confiné", INERIS, 2007.
- [11] K. McGrattan, Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, National Institute of Standards and Technology, Février 2009.
- [12] A. CHATELAIN, Simulation des grandes échelles d'écoulements turbulents avec transfert de chaleur, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Octobre 2007
- [13] K.Mc. Grattan, Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide, National Institute of Standards and Technology, Février 2009.

Annexe

Code FDS utilisé au cours des simulations numériques

Note: Ce code est opérationnel pour la configuration trappes/trémies. Pour changer de configuration il suffit de remplacer les ' en face des opérateurs par des &

```
&HEAD CHID='Configuration trappes/tremies', TITLE='désenfumage' / entête
apparaissant lors du calcul / de
la simulation
```

'Les Conditions aux limites et initiales

```
&MESH IJK=159,40,69, XB=0.01,1.6,0.0,0.4,0.01,0.70/ définition du maillage et
du domaine de / définition
```

```
&INIT XB=0.01,1.6,0.0,0.4,0.01,0.7, DENSITY=1.2,TEMPERATURE=20/ initialisation
de la température et / de la
densité
```

```
&VENT MB=YMIN, SURF_ID='OPEN' / Condition aux limites OPEN ce qui signifie que
tout se passe comme / si les murs étaient à l'équilibre
avec l'atmosphère extérieure dans / les condition normales de
températures et de pression
```

```
&TIME T_END=120 / définit le temps au bout duquel la simulation s'arrête
```

```
'volume garage
&OBST XB=0,0.4,0,0.4,0,0.4 , COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 / volume plein
se situant sous la / porte
```

```
'turbine1
&OBST XB=0.52,0.68,0.08,0.24,0,0.4, COLOR = 'GREEN' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

```
'turbine2
&OBST XB=0.92,1.08,0.08,0.24,0,0.4, COLOR = 'GREEN' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

```
'turbine3
&OBST XB=1.32,1.49,0.08,0.24,0,0.4, COLOR = 'GREEN' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

'plancher des sous sols

```
'niv1
&OBST XB=0.4,1.6,0.0,0.4,0.1,0.11, COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

```
'niv2
&OBST XB=0.4,1.6,0,0.4,0.2,0.21, COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

```
'niv3
&OBST XB=0.4,1.6,0,0.4,0.3,0.31, COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

```
'niv4
&OBST XB=0.0,1.6,0,0.4,0.4,0.41, COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

```
'plancher 4eme sous sol
&OBST XB=0.4,1.6,0,0.4,0,0.01, COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

```
'Le toit
&OBST XB=0.0,1.592,0.0,0.4,0.69,0.7, COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

'Les murs

```
'sud
&OBST XB=0,1.6,-0.01,0.01,0,0.7, COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /
```

```

'nord
'OBST XB=0,1.6,0.39,0.4,0,0.7,  COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /

'est
'OBST XB=1.59,1.6,0.01,0.39,0,0.7,  COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /

'ouest
'OBST XB=0,0.01,0.01,0.39,0,0.7,  COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /

'la porte
&HOLE XB=0.1,0.2,-0.02,0.02,0.41,0.51,  COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 /

-----
'LES CONFIGURATION FAUX PLAFOND

&OBST XB=0.01,1.6,0.01,0.39,0.6,0.61,  COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5 / faux
plafond

-----'les trapes centrales du faux plafond-----

'trape1
'HOLE XB=0.16,0.24,0.15,0.23,0.59,0.62/

'trape2
'HOLE XB=0.6,0.72,0.28,0.4,0.59,0.62/

'trape3
'HOLE XB=1,1.12,0.28,0.4,0.59,0.62/

'trape4
'HOLE XB=1.4,1.52,0.28,0.4,0.59,0.62/

-----'les trapes saignées du faux plafond-----

'trape1
'HOLE XB=0,1.6,0.17,0.21,0.59,0.62/

'trape2
'HOLE XB=0,1.6,0.05,0.09,0.59,0.62/

'trape3
'HOLE XB=0,1.6,0.30,0.34,0.59,0.62/

-----'les trapes/trémies du faux plafond-----

'trape1
&HOLE XB=0.16,0.24,0.15,0.23,0.59,0.62/

'trape2
&HOLE XB=0.6,0.72,0.28,0.4,0.59,0.62/

'trape3
&HOLE XB=1,1.12,0.28,0.4,0.59,0.62/

'trape4
&HOLE XB=1.4,1.52,0.28,0.4,0.59,0.62/

-----'les écrans de cantonnements du faux plafond-----

'OBST XB=0.4,0.401, 0,0.4, 0.55,0.6, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /
'OBST XB=0.8,0.801, 0,0.4, 0.55,0.6, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /
'OBST XB=1.2,1.201, 0,0.4, 0.55,0.6, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /

```

 'LA CONFIGURATION GAINÉ D'EXTRACTION

'OBST XB= 0.01,1.59 , 0.18,0.18 , 0.64,0.68, COLOR='BLUE' /
 'OBST XB= 0.01,1.59 , 0.22,0.22 , 0.64,0.68, COLOR='BLUE' /
 'OBST XB= 0.01,1.59 , 0.18,0.22 , 0.63,0.64, COLOR = 'GRAY' ,TRANSPARENCY=0.5/
 'OBST XB= 0.01,1.59 , 0.18,0.22 , 0.68,0.68, COLOR='BLUE' /

'trape1
 'HOLE XB=0.18,0.22,0.19,0.21,0.63,0.64/

'trape2
 'HOLE XB=0.58,0.62,0.19,0.21,0.63,0.64/

'trape3
 'HOLE XB=0.98,1.02,0.19,0.21,0.63,0.64/

'trape4
 'HOLE XB=1.38,1.42,0.19,0.21,0.63,0.64/

 'les écrans de cantonnements des niveaux inférieurs

'OBST XB=0.72,0.721, 0,0.4,0.05,0.1, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /
 'OBST XB=1.12,1.121, 0,0.4, 0.05,0.1, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /

'OBST XB=0.72,0.721, 0,0.4,0.15,0.20, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /
 'OBST XB=1.12,1.121, 0,0.4, 0.15,0.20, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /

'OBST XB=0.72,0.721, 0,0.4,0.25,0.30, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /
 'OBST XB=1.12,1.121, 0,0.4, 0.25,0.30, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /

'OBST XB=0.72,0.721, 0,0.4,0.35,0.40, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /
 'OBST XB=1.12,1.121, 0,0.4, 0.35,0.40, COLOR = 'BLUE' ,TRANSPARENCY=0.5 /

 'les tremies

'niv1/1
 &HOLE XB=0.6,0.72,0.28,0.4,0.1,0.11 /

'niv1/2
 &HOLE XB=1,1.12,0.28,0.4,0.1,0.11 /

'niv1/3
 &HOLE XB=1.4,1.52,0.28,0.4,0.1,0.11 /

'niv2/1
 &HOLE XB=0.6,0.72,0.28,0.4,0.2,0.21 /

'niv2/2
 &HOLE XB=1,1.12,0.28,0.4,0.2,0.21 /

'niv2/3
 &HOLE XB=1.4,1.52,0.28,0.4,0.2,0.21 /

'niv3/1
 &HOLE XB=0.6,0.72,0.28,0.4,0.3,0.31 /

'niv3/2
 &HOLE XB=1,1.12,0.28,0.4,0.3,0.31 /

'niv3/3
 &HOLE XB=1.4,1.52,0.28,0.4,0.3,0.31 /

'niv4/1
&HOLE XB=0.6,0.72,0.28,0.4,0.4,0.41 /

'niv4/2
&HOLE XB=1,1.12,0.28,0.4,0.4,0.41 /

'niv4/3
&HOLE XB=1.4,1.52,0.28,0.4,0.4,0.41 /

'Les bouches d'air de soufflage

&SURF ID='air' , VOLUME_FLUX=-0.0006/ la valeur de soufflage est données en m³/s

niv0/1
&VENT XB=0.44,0.49,0.01,0.01,0.01,0.03, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv0/2
&VENT XB=0.84,0.89,0.01,0.01,0.01,0.03, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv0/3
&VENT XB=1.24,1.29,0.01,0.01,0.01,0.03, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv1/1
&VENT XB=0.44,0.49,0.01,0.01,0.11,0.13, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv1/2
&VENT XB=0.84,0.89,0.01,0.01,0.11,0.13, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv1/3
&VENT XB=1.24,1.29,0.01,0.01,0.11,0.13, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv2/1
&VENT XB=0.44,0.49,0.01,0.01,0.21,0.23, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv2/2
&VENT XB=0.84,0.89,0.01,0.01,0.21,0.23, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv2/3
&VENT XB=1.24,1.29,0.01,0.01,0.21,0.23, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv3/1
&VENT XB=0.44,0.49,0.01,0.01,0.31,0.33, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv3/2
&VENT XB=0.84,0.89,0.01,0.01,0.31,0.33, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv3/3
&OBST XB=1.24,1.29,0.01,0.01,0.31,0.33, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv4/1
&VENT XB=0.44,0.49,0.01,0.01,0.42,0.44, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv4/2
&VENT XB=0.84,0.89,0.01,0.01,0.42,0.44, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

niv4/3
&VENT XB=1.24,1.29,0.01,0.01,0.42,0.44, SURF_ID='air',COLOR='BLUE' /

'L'extracteur de fumées

&SURF ID='BLOW', POROUS=.TRUE., VOLUME_FLUX=-0.015 /
&OBST XB= 0.01,0.01 , 0.18,0.22 , 0.64,0.68, COLOR='RED', SURF_ID='BLOW' /

'Le feux

&SPEC ID='HELIUM' /
&SURF ID='HELIUM',MASS_FRACTION(1)=1.0,VOLUME_FLUX=-0.000192,TMP_FRONT=20.0/
&VENT XB=1.50,1.58, 0.16,0.24, 0.01,0.01, SURF_ID='HELIUM', COLOR='RED' /

'Les capteur de densités

&DUMP DT_DEVC=10/

&DEVC XYZ=0.5,0.05,0.43, QUANTITY='DENSITY',ID='Densité position 110'/ densité
au niveau de la /
première trémie mur sud bas

&DEVC XYZ=0.5,0.20,0.43, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 120'/ densité
au niveau de la / première
trémie milieu bas

&DEVC XYZ=0.5,0.38,0.43, QUANTITY='DENSITY',ID='Densité position 130'/ densité
au niveau de la /
première trémie mur nord bas

&DEVC XYZ=0.5,0.05,0.45, QUANTITY='DENSITY',ID='Densité position 111'/ densité
au niveau de la /
première trémie mur sud bas

&DEVC XYZ=0.5,0.20,0.45, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 121'/ densité
au niveau de la / première
trémie milieu bas

&DEVC XYZ=0.5,0.38,0.45, QUANTITY='DENSITY',ID='Densité position 131'/ densité
au niveau de la /
première trémie mur nord bas

&DEVC XYZ=0.5,0.05,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 112'/ densité
au niveau de la

/ première trémie mur
sud haut

&DEVC XYZ=0.5,0.20,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 122'/ densité
au niveau de la /
première trémie milieu haut

&DEVC XYZ=0.5,0.38,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 132'/ densité
au niveau de la /
première trémie mur nord
/ haut

&DEVC XYZ=0.4,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 1'/ densité au
niveau de la /
première trémie milieu haut

&DEVC XYZ=0.6,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 3'/ densité au
niveau de la /
première trémie milieu haut

&DEVC XYZ=0.7,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 4'/ densité au
niveau de la /
première trémie milieu haut

&DEVC XYZ=0.8,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 5'/ densité au
niveau de la /
première trémie milieu haut

&DEVC XYZ=0.9,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 6'/ densité au
niveau de la /
première trémie milieu haut

&DEVC XYZ=1.0,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 7'/ densité au
niveau de la /
première trémie milieu haut

&DEVC XYZ=1.1,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 8'/ densité au

```
niveau de la /
première trémie milieu haut

&DEVC XYZ=1.2,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 9' / densité au
niveau de la /
première trémie milieu haut

&DEVC XYZ=1.3,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 10' / densité
au niveau de la / première trémie
milieu haut

&DEVC XYZ=1.4,0.2,0.5, QUANTITY='DENSITY', ID='Densité position 11' / densité
au niveau de la /
première trémie milieu haut
```

'Les plans de visualisation

```
&SLCF PBX=0.200, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0.200, QUANTITY='DENSITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.330, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0.330, QUANTITY='DENSITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.150, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0.150, QUANTITY='DENSITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.5, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0.5, QUANTITY='DENSITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.86, QUANTITY='DENSITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=1.26, QUANTITY='DENSITY', VECTOR=.TRUE. /

&TAIL /
```