



Ministère
de l'Équipement,
du Logement,
des Transports
et du Tourisme

Direction
des Routes

**ETUDE SUR MAQUETTES AERAIQUES
DES SYSTEMES DE TRAPPES DE DESENFUMAGE
EN TUNNEL ROUTIER**

RAPPORT FINAL



CENTRE D'ETUDES DES TUNNELS

**ETUDE SUR MAQUETTES AERAULIQUES
DES SYSTEMES DE TRAPPES DE DESENFUMAGE
EN TUNNEL ROUTIER**

RAPPORT FINAL

**P. Chassé - D. Lacroix
Mars 1994**

RESUME

En cas d'incendie dans un tunnel routier équipé d'une ventilation de type transversal ou semi-transversal, l'extraction des fumées est aujourd'hui réalisée systématiquement au moyen de trappes télécommandées. Celles-ci se substituent aux petites bouches réparties qu'on utilisait antérieurement, et permettent de concentrer l'aspiration au plus près de l'incendie. Il est apparu nécessaire de vérifier expérimentalement l'efficacité de ce système et de disposer d'éléments permettant d'optimiser la position, la forme, la section, l'espacement, le débit des trappes.

Une étude avait précédemment été menée sur un modèle hydraulique au 1/68^e dans lequel les fumées étaient simulées par de l'eau salée injectée dans de l'eau pure. Une réflexion a été menée sur les similitudes et a conduit à rejeter cette modélisation au profit d'une maquette aérodynamique permettant de conserver exactement le rapport des densités et le nombre de Froude, tout en maintenant un nombre de Reynolds suffisamment élevé. Deux maquettes au 1/15^e ont été réalisées, l'une dans le cadre de l'étude du projet d'autoroute A14 pour le compte de l'Etablissement Public pour l'Aménagement de la région de la Défense (EPAD), et l'autre à caractère plus général dans le cadre du programme de recherches du Centre d'Etudes des Tunnels (CETU). Elles représentent des largeurs réelles de tunnel de 9 et 13 m sur une longueur de 250 m. Les fumées y sont simulées par un mélange d'hélium et d'azote de même densité que l'air chaud produit par l'incendie.

15 essais préliminaires sans extraction sur chaque maquette ont permis de caractériser la stratification de panaches représentatifs d'incendies de véhicule léger, de poids lourd et de matières dangereuses dans différentes conditions de courant d'air en tunnel. L'influence de poutres en plafond ou de véhicules en tunnel a été étudiée. 130 essais avec extraction ont été réalisés sur différents panaches stratifiés afin de tester de nombreuses configurations de trappes, de débits et de conditions en tunnel.

Le rapport présente l'ensemble de la démarche et interprète les résultats des mesures. Il fait ressortir que les paramètres les plus importants pour l'efficacité du désenfumage sont le débit total d'aspiration et le choix entre une implantation des trappes en plafond ou en haut de piédroit. Il propose des recommandations portant sur ces points essentiels ainsi que sur l'espacement longitudinal des aspirations, le nombre et la position des trappes dans un même profil en travers, leur section et leur forme. L'influence d'un soufflage d'air frais simultané en bas ou en haut de piédroit est également étudiée et conduit à proscrire la seconde solution.

SOMMAIRE

Introduction	1
1 - Déroulement général des essais et principes de similitude retenus	3
1.1 - Historique et déroulement général des essais	3
1.2 - Généralités sur les lois de similitude	5
1.3 - Choix de la similitude	6
1.4 - Echelles retenues pour les maquettes EPAD et CETU	7
2 - Description du dispositif expérimental	8
2.1 - Dimensions des maquettes EPAD et CETU	9
2.2 - Configurations de trappes testées	11
2.3 - Système d'injection des fumées	14
2.4 - Instrumentation du dispositif expérimental	15
3 - Principes de l'interprétation des essais et précision du réglage et des mesures	16
3.1 - Interprétation et correction des résultats bruts	16
3.2 - Incertitudes sur les résultats	20
4 - Essais de stratification des panaches de fumée	23
5 - Analyse des résultats expérimentaux	31
5.1 - Influence de la température des panaches	33
5.2 - Influence de la vitesse d'aspiration	36
5.3 - Influence de la forme des trappes	40
5.4 - Influence de la configuration des trappes	42
5.5 - Influence du débit total d'aspiration	47
5.6 - Influence du nombre de points d'aspiration	54
5.7 - Comparaison avec les données bibliographiques sur le poinçonnement	58
5.8 - Influence du soufflage d'air frais	67
5.9 - Influence de la présence de véhicules en tunnel	72
5.10 - Comparaison avec une aspiration répartie	74
5.11 - Comparaison entre les maquettes EPAD et CETU - Influence de la largeur	77
5.12 - Comportement d'autres panaches stratifiés	82
6 - Commentaires sur la représentativité des essais	84

7 - Recommandations proposées pour les projets suite aux essais	87
7.1 - Débit total d'extraction	87
7.2 - Position transversale des trappes	88
7.3 - Répartition longitudinale de l'aspiration	89
7.4 - Vitesse d'aspiration	90
7.5 - Forme des trappes	90
7.6 - Soufflage d'air frais dans la zone enfumée	90
8 - Perspectives de développement	92
8.1 - Etude de la stabilité des écoulements stratifiés	92
8.2 - Validation de certains résultats particuliers obtenus sur maquette	93
8.3 - Comparaison des résultats avec une situation réaliste	93
Bibliographie	94

Le présent rapport final est complété par un recueil de 13 annexes à usage interne au CETU et non diffusées.

INTRODUCTION

Les incendies en tunnel routier, sans être plus fréquents qu'à l'air libre, représentent cependant un danger potentiel plus grave en raison du confinement de l'espace et des possibilités réduites d'évacuation des usagers et d'accès des secours.

Parmi les moyens mis en oeuvre pour lutter contre un incendie en tunnel routier, les systèmes de désenfumage représentent des enjeux économiques et stratégiques importants.

Leurs principaux objectifs sont les suivants :

- assurer la protection des usagers et des personnels d'intervention vis à vis des risques d'intoxication par les fumées et d'exposition à de trop fortes températures,
- maintenir de bonnes conditions de visibilité nécessaires à l'évacuation des usagers et à l'intervention des secours,
- garantir la pérennité des ouvrages en limitant les dégâts dûs à une chaleur excessive.

Il existe différents types de systèmes de désenfumage, naturel, longitudinal, transversal ou mixte, mais leur description et leurs conditions d'emploi sortent du cadre de la présente étude (référence 11 par exemple).

La présente étude s'intéresse aux systèmes de désenfumage de type transversal qui reposent sur deux principes :

- maintenir la stratification naturelle des fumées de façon à conserver une couche d'air relativement limpide au-dessus de la chaussée et à extraire le plus efficacement possible les fumées au moyen d'une aspiration en plafond,
- dès que le tunnel est un peu long, confiner les fumées dans un secteur limité autour de l'incendie, en mettant en surpression relative les zones situées de part et d'autre.

Ces systèmes utilisaient en général les mêmes dispositifs, à savoir ventilateurs, gaines de ventilation et bouches d'aspiration ou de soufflage, qui servent à la ventilation du tunnel en situation normale.

Depuis quelques années, il est cependant apparu préférable d'apporter quelques améliorations à ces systèmes traditionnels, en particulier en remplaçant les petites bouches d'extraction, de section de l'ordre de 0,1 m² espacées tous les 2 à 15 m, par des trappes télécommandées de plus grande section de l'ordre de un à quelques m² et espacées tous les 50 à 100 m. Les objectifs visés par ces systèmes que nous avons qualifiés de trappes de désenfumage sont simples et relèvent du bon sens :

- intercepter les fumées au plus près de l'incendie en concentrant l'extraction,
- éviter d'aspirer dans des zones qui ne sont pas touchées grâce à la télécommande des ouvertures.

Si le principe des systèmes de trappes de désenfumage ne pose guère de difficultés, leur dimensionnement est plus problématique et la bibliographie n'est pas riche en éléments de réponse à ce sujet.

Deux études sur maquettes ont ainsi été sous-traitées au laboratoire de Framatome - Centre Technique et réalisées l'une pour le compte de l'Etablissement Public d'Aménagement de la Défense (EPAD) et l'autre pour celui du Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) : références 1 et 2. Elles visaient à répondre à cet objectif de dimensionnement en apportant des éléments quantitatifs sur :

- l'optimisation de la géométrie : position, forme, section, espacement,
- l'optimisation du débit unitaire et du débit total d'aspiration,
- l'appréciation de l'efficacité de ces systèmes,
- l'influence du courant d'air longitudinal sur l'efficacité,
- l'influence d'un soufflage d'air frais par le bas ou par le haut simultanément à l'extraction,
- la comparaison avec des bouches réparties.

L'étude réalisée pour le compte de l'EPAD, dans le cadre spécifique du projet de tunnel de l'A14 à la Défense, visait en outre à répondre à des questions moins générales. Il s'agissait en particulier d'apporter des réponses sur :

- l'utilité ou non d'installer des carneaux de ventilation sous le plafond,
- l'optimisation de ces carneaux,
- l'efficacité de l'installation prévue.

Le présent rapport rend compte des résultats de ces deux études. La première a été financée par l'EPAD, y compris l'intervention du CETU, dans le cadre du projet déjà cité. La seconde rentrait dans le cadre des programmes de recherche du CETU, financés par la Direction des Routes.

1 - DEROULEMENT GENERAL DES ESSAIS ET PRINCIPES DE SIMILITUDE RETENUS

1.1 - Historique et déroulement général des essais

Les études à échelle réduite qui ont été lancées sur les systèmes de trappes de désenfumage sont le résultat d'une longue réflexion que le CETU a menée sur l'utilisation de maquettes pour étudier des situations d'incendie en tunnel.

Dans un premier temps, l'intention était de simuler sur maquettes la totalité du développement d'un incendie dans un tunnel, depuis sa source où les fumées produites sont à des températures élevées qui peuvent dépasser 1000°C, jusqu'à leur évacuation soit par l'une des têtes du tunnel (cas du système longitudinal), soit par des gaines d'extraction (cas du système transversal) où leur température chute jusqu'à des valeurs de quelques dizaines de degrés compte-tenu des pertes thermiques aux parois et du mélange plus ou moins important avec l'air froid. Une maquette de ce type a d'ailleurs été réalisée pour étudier le désenfumage du tunnel de la Grand Mare à Rouen. Il s'agissait d'une maquette en eau où les fumées étaient représentées par de l'eau salée, donc plus lourde que l'eau pure. La maquette était retournée (le haut en bas) dans le cadre d'une "similitude inverse".

Si les maquettes en eau sont classiquement utilisées pour les études de pollution dans l'environnement, leur application à des études d'incendie est très rare et n'est guère adaptée car elles supposent de faibles variations de densité, ce qui n'est pas le cas dans les études d'incendie.

Lors d'une première consultation de laboratoires spécialisés, portant sur une étude de validation des méthodes à échelle réduite pour l'analyse de situations d'incendie en tunnel, les analogies en eau n'étaient pas écartées mais le dossier de consultation tentait de démontrer les avantages des analogies en air. A l'issue de cette consultation, les propositions d'étude reçues ainsi que la poursuite des réflexions ont conduit à la conclusion qu'il était vain de chercher à simuler la totalité du développement d'un incendie en tunnel avec des maquettes à petite échelle et surtout isothermes, que ce soit en analogie en eau ou en air. En effet l'absence de pertes thermiques sur ces maquettes empêche le respect des similitudes en tout point du tunnel et risque de conduire à des mouvements des fumées fort éloignés de la réalité.

Il a donc été renoncé à simuler la totalité d'un incendie en tunnel pour se limiter à l'étude de dispositifs particuliers, en l'occurrence, les systèmes de trappes de désenfumage. La non-prise en compte des pertes thermiques sur la maquette est dans ce cas moins gênante car la longueur étudiée est plus courte (limitée à 250 m) et les objectifs ne sont plus d'étudier le comportement des fumées dans leur ensemble, mais d'optimiser des dispositifs particuliers (les caractéristiques des panaches de fumée sont des hypothèses faites et non plus des résultats déduits).

La deuxième consultation lancée pour l'étude à échelle réduite des systèmes de trappes de désenfumage a abouti à retenir la proposition de Framatome - Centre Technique consistant en une maquette en air dont nous décrivons ci-après les caractéristiques.

Alors que le marché d'étude était en cours de mise au point entre le CETU et Framatome, il est apparu que des questions analogues se posaient pour le projet d'autoroute A14 entre la Grande Arche et l'autoroute A86. Un second contrat a alors été négocié entre l'Etablissement Public d'Aménagement de la Défense, responsable de ce projet, et Framatome. Le CETU a assuré la définition, le suivi et l'interprétation des essais réalisés sur les deux maquettes qui seront désignées dans la suite par "maquette CETU" et "maquette EPAD". Le présent rapport rend compte de l'ensemble.

En raison des contraintes de calendrier du projet de l'autoroute A14, c'est la maquette EPAD qui a été réalisée et testée la première. Les résultats ont été pris en compte immédiatement dans la conception du projet.

Chacune des deux études a commencé par 15 essais de stratification des panaches de fumée en l'absence d'extraction, afin de définir quels panaches seraient utilisés pour la suite des mesures. Il convenait en effet de se placer en situation de bonne stratification : l'efficacité de trappes aspirant un mélange plus ou moins homogène d'air et de fumées dépend essentiellement des débits en jeu et ne justifiait pas une étude sur maquette.

Une fois retenus les panaches à tester, les premiers essais réalisés avec aspiration sur chaque maquette ont eu pour but de donner une première idée de l'influence d'un certain nombre de paramètres afin de mieux définir les essais suivants. La suite de l'expérimentation a alors été consacrée à l'étude plus systématique de l'influence des principaux paramètres.

C'est ainsi que la première série d'essais, réalisée sur la maquette EPAD "avec poutrelles", a d'abord comporté des tests sur l'influence de la température, qui ont permis de n'en retenir qu'une seule pour la suite des essais, puis des tests sur la configuration des trappes. Finalement une seule configuration a été choisie pour le reste des essais sur cette maquette "avec poutrelles".

Dans le même esprit, les premiers essais avec aspiration sur la maquette CETU ont concerné l'influence de la vitesse d'aspiration et de la température avant de lancer l'étude paramétrique systématique.

Au total il a été réalisé environ 45 essais avec aspiration sur la maquette EPAD, et 80 sur la maquette CETU. Grâce à une collaboration efficace entre l'équipe Framatome et l'équipe CETU, les tests ont pu être pilotés "à l'avancement" en fonction des résultats des essais précédents. Ceci a permis d'améliorer très sensiblement l'efficacité des campagnes de mesure car l'influence des différents paramètres n'étaient pas du tout connue au préalable.

Une telle démarche n'a été possible que grâce à la souplesse et la bonne volonté de l'équipe de Framatome menée par Thierry Muller, et grâce à la disponibilité de l'équipe du CETU qui a interprété toutes les mesures au fur et à mesure. Que tous en soient remerciés.

1.2 - Généralités sur les lois de similitude

La similitude a pour objet l'étude d'un phénomène physique sur un modèle qui est une reproduction à une échelle convenable d'une installation réelle. Au terme d'échelle, il est donné un sens très large, qui dépasse la seule similitude géométrique. Une étude en similitude doit en effet permettre de transposer les résultats obtenus sur le modèle aux conditions de fonctionnement de l'installation réelle. Il est donc nécessaire de déterminer les rapports des dimensions, des vitesses et plus généralement de toutes les grandeurs caractéristiques du milieu fluide étudié entre le modèle et la réalité.

Les échelles sont liées par la conservation de nombres adimensionnels résultant des équations décrivant le problème étudié. Dans le cas qui nous intéresse, où nous représentons les fumées chaudes produites par un incendie dans la réalité, par un fluide de densité différente de celle du milieu ambiant sur le modèle, les principales équations qui régissent le problème respectivement dans la réalité et sur le modèle sont décrites ci-dessous.

Equations de conservation (forme générale) :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \Phi) + \text{div} (\rho \mathbf{u} \Phi) = \text{div} (\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) + S_{\Phi}$$

--> terme source de Φ

--> flux de diffusion de Φ

--> flux de convection de Φ

--> taux de variation de Φ

$\rho \Phi$ tunnel	$\rho \Phi$ modèle	Nombres adimensionnels à conserver
ρ (masse)	ρ (masse)	aucun
ρu (quantité de mouvement)	ρu (quantité de mouvement)	Re , Fr
ρe (énergie)	ρX (fraction massique)	Pr (tunnel) = Sc (maquette)

Equation d'état

Tunnel	Modèle	Nombres adimensionnels à conserver
$\rho T = \text{cte}$ (loi des gaz parfaits)	$\rho [1 + X (\rho_o/\rho_f - 1)] = \text{cte}$ (masse volumique du mélange)	aucun

A ces équations et au respect des nombres adimensionnels à conserver, il convient d'ajouter une contrainte supplémentaire qui porte sur le respect des conditions aux limites adimensionnelles, pour garantir la transposition des résultats à la réalité.

Cette contrainte impose de respecter le même écart relatif de densité à l'injection $\Delta\rho/\rho_0$ entre le modèle et la réalité.

De même elle conduit à supposer que l'écoulement est adiabatique dans la réalité, c'est-à-dire sans pertes thermiques aux parois, compte-tenu de la façon de modéliser les fumées chaudes par un fluide de densité différente mais de même température que le fluide ambiant sur la maquette.

1.3 - Choix de la similitude

Les principes de similitude décrits précédemment conduisent à respecter les nombres adimensionnels suivants :

▪ **Nombre de Reynolds :**

$$Re = V.D/\nu = \text{forces d'inertie} / \text{forces de viscosité}$$

(où V et D sont respectivement des dimensions caractéristiques des vitesses et des longueurs et où ν est la viscosité dynamique du fluide).

En pratique, le nombre de Reynolds n'est pas strictement conservé, mais il faut s'assurer qu'il reste supérieur à des valeurs de 5 000 à 10 000, pour rester dans un régime d'écoulement turbulent sur la maquette. Dans la réalité, le nombre de Reynolds est beaucoup plus élevé (de l'ordre de 10^5 à 10^6).

▪ **Nombre de Froude :**

$$Fr = V^2/gD = \text{forces d'inertie} / \text{forces de gravité}$$

(où g est l'accélérateur de la pesanteur).

Il doit être strictement conservé afin que les effets de gravité soient correctement modélisés. Il permet de définir l'échelle des vitesses dès lors que celle de la géométrie est imposée.

▪ **Nombres de Prandtl et de Schmidt :**

Ces nombres caractérisent le rapport entre la diffusion thermique (respectivement la diffusion du fluide simulant les fumées chaudes) et la diffusion de quantité de mouvement. Dans le cas d'écoulements laminaires, il s'agirait des diffusions moléculaires et leur identité pourrait être difficile à obtenir, mais les écoulements étant turbulents, il s'agit ici des diffusions turbulentes et les nombres de Prandtl et de Schmidt sont généralement voisins de 1.

Le choix d'une maquette en air avec un mélange d'hélium et d'azote pour simuler les fumées chaudes présente l'avantage de permettre de satisfaire aux exigences ci-dessus.

Dans le cas d'une maquette en eau avec des fumées chaudes représentées par de l'eau salée, il est impossible de respecter l'échelle des masses dans le cas de fortes variations de densité. En effet, l'ordre de grandeur de celles-ci est de 1 à 0,37, alors que de l'eau salée ne permet d'obtenir au mieux qu'un rapport de 1 à 1,2. Les équations de conservation décrites ci-avant ne peuvent rester les mêmes entre une maquette en eau et la réalité que si on suppose que les variations de masse volumique sont négligeables dans tous les termes, sauf celui de gravité dans l'équation de quantité de mouvement (hypothèse de Boussinesq). Afin que ce terme soit le même entre modèle et réalité, on est alors amené à conserver non plus le nombre de Froude, mais celui de Richardson :

$$Ri = (\Delta\rho/\rho) \cdot (1/Fr)$$

Une telle similitude est acceptable pour de faibles écarts de masse volumique. Elle n'est pas valide pour les écoulements concernés par la présente étude.

1.4 - Echelles retenues pour les maquettes EPAD et CETU

Dans les études sur maquettes, l'échelle géométrique est généralement choisie en premier en fonction de diverses contraintes, en particulier de la place disponible dans le laboratoire et du coût de réalisation de la maquette. L'échelle géométrique étant fixée, les règles de similitude retenues permettent ensuite de déduire les autres échelles.

Si on note \bar{D} l'échelle géométrique, l'échelle des vitesses \bar{V} se déduit du respect du nombre de Froude, et l'échelle des débits \bar{Q} des deux précédentes, soit :

$$\bar{V} = \bar{D}^{1/2}$$

$$\bar{Q} = \bar{V} \cdot \bar{D}^2 = \bar{D}^{5/2}$$

Pour contrôler le critère sur le nombre de Reynolds, le tableau ci-dessous indique la vitesse minimale en échelle réelle V_{\min} correspondant à un Reynolds de 5 000 pour chacune des maquettes EPAD et CETU.

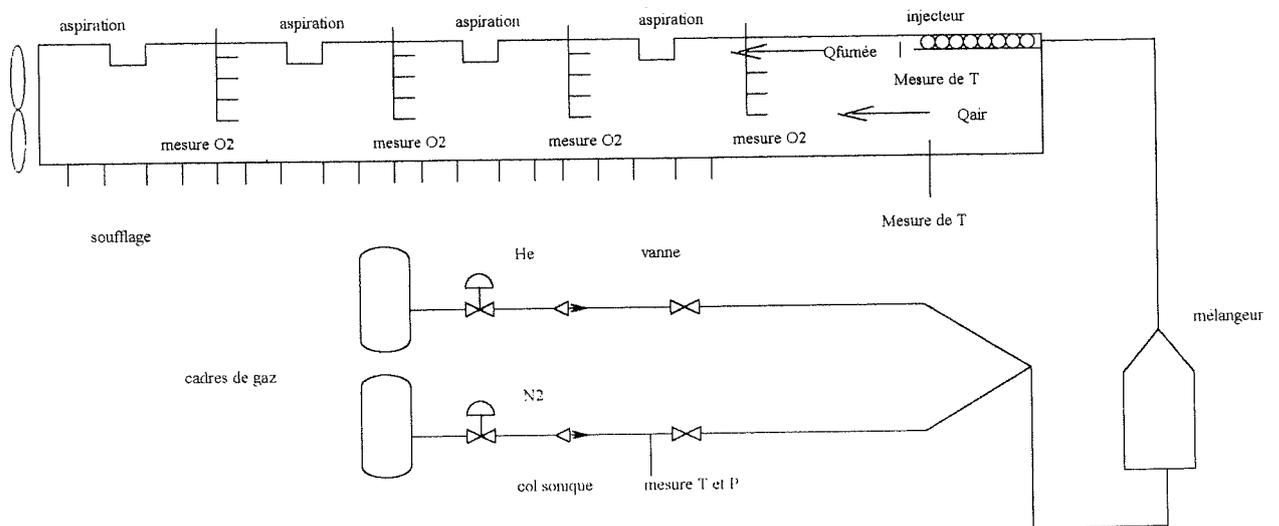
Maquettes EPAD et CETU : échelles retenues

Echelle géométrique \bar{D}	1/15
Echelle de vitesse \bar{V}	1/3,87
Echelle de débit \bar{Q}	1/871
Reynolds > 5 000 :	
V_{\min} EPAD	0,60 m/s
V_{\min} CETU	0,68 m/s

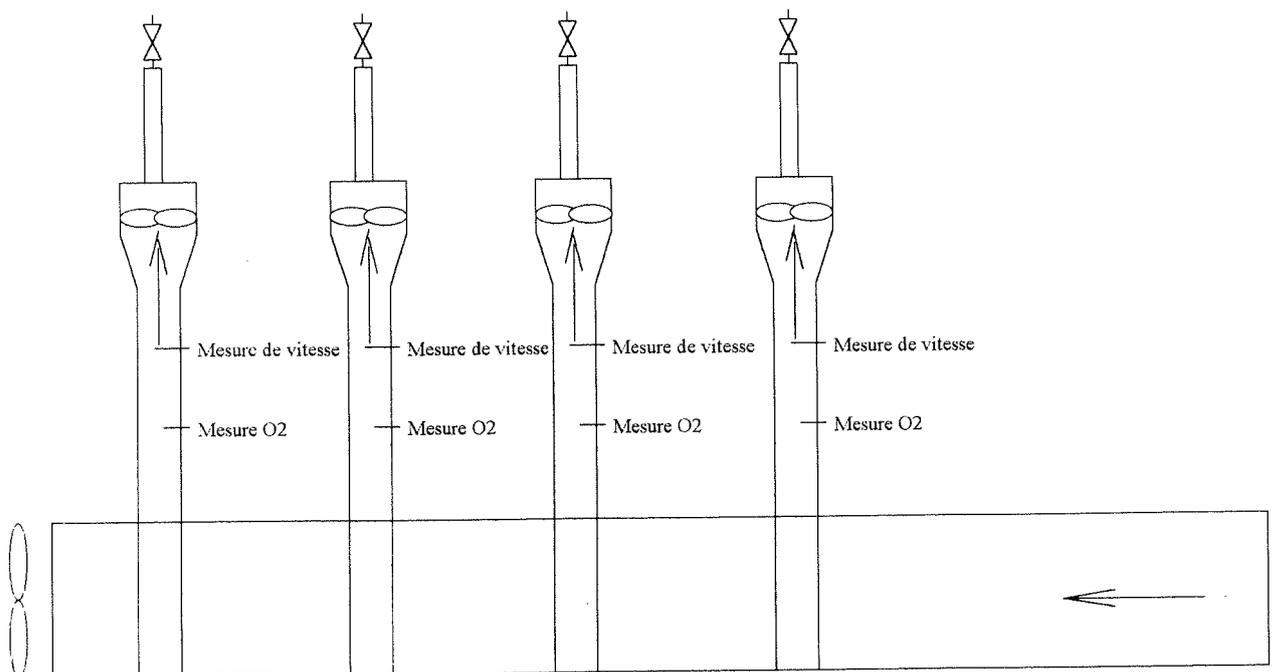
Enfin, nous rappelons que les masses volumiques sont strictement respectées entre la réalité et les maquettes EPAD et CETU (échelle $\bar{\rho} = 1$).

2 - DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les maquettes EPAD et CETU ont été conçues pour tester l'efficacité d'un système de trappes de désenfumage. Ce chapitre décrit successivement les principales caractéristiques de ces maquettes, à savoir leurs dimensions, les configurations de trappes testées, le système d'injection des fumées, et l'instrumentation permettant le contrôle des différents débits. Le schéma d'ensemble du dispositif expérimental est donné ci-dessous.



Vue de face du dispositif expérimental



Vue de dessus du dispositif expérimental

2.1 - Dimensions des maquettes EPAD et CETU

Chacune des maquettes EPAD et CETU représente une portion de tunnel de 250 m de longueur réelle, ce qui à l'échelle réduite du 1/15^e donne une longueur de 16,7 m.

Sur chacune de ces maquettes, quatre sections, espacées de 50 m en échelle réelle, sont équipées d'éléments modulables permettant de simuler différentes configurations de trappes. Le débit d'aspiration de chaque section est contrôlé par un ventilateur indépendant.

Les différences entre les maquettes EPAD et CETU portent sur les points suivants (chiffres donnés en échelle réelle) :

- la section transversale du tunnel : celle de l'EPAD est de 13 m x 5,4 m correspondant à un tunnel à 3 voies, et celle du CETU de 9 m x 5 m correspondant à un tunnel à 2 voies ;
- l'emplacement des bouches de soufflage d'air frais : sur la maquette EPAD bouches de 0,2 m x 0,5 m de chaque côté, en partie basse, espacées tous les 6,5 m ; et sur la maquette CETU bouches de 0,15 m x 0,60 m disposées en quinconce en haut du piédroit de chaque côté du tunnel, et espacées tous les 15 m ;
- dans les essais EPAD dits avec poutrelles, présence de carreaux apparents en plafond de 0,5 m de hauteur et 2 m de largeur, situés au droit des sections équipées de trappes de désenfumage ;
- sur la maquette CETU, présence de petites bouches d'air vicié, disposées en partie centrale ou latéralement (dans ce cas ce sont les mêmes que les bouches d'air frais), et permettant de tester une aspiration répartie des fumées.

Les photographies ci-après donnent un aperçu de chacune des maquettes.

Le tableau ci-dessous récapitule les principales caractéristiques de chacune des maquettes EPAD et CETU, avec les dimensions réelles et réduites. Dans la suite du rapport toutes les grandeurs seront exprimées en échelle réelle, plus facile à interpréter pour les personnes concernées par les tunnels routiers.



Maquette EPAD - Vue de l'extrémité



Maquette CETU

	Maquette EPAD		Maquette CETU	
	<i>Echelle réelle</i>	<i>Echelle maquette</i>	<i>Echelle réelle</i>	<i>Echelle maquette</i>
Longueur du tunnel	250 m	16,7 m	250 m	16,7 m
Largeur du tunnel	13 m	867 mm	9 m	600 mm
Hauteur du tunnel	5,4 m	360 mm	5 m	333 mm
Espacement des sections avec trappes	4 x 50 m	4 x 3,33 m	4 x 50 m	4 x 3,33 m
Nombre de bouches de soufflage	76	76	15	15
Nombre de bouches d'air vicié	0	0	15	15
Débit maximum/section de trappes	37 m ³ /s	43 l/s	75 m ³ /s	86 l/s
Débit maximum d'air frais	240 m ³ /s.km	69 l/s	200 m ³ /s.km	57 l/s
Débit maximum d'air vicié	-	-	50 m ³ /s	57 l/s
Débit maximum d'hélium	78 m ³ /s	90 l/s	160 m ³ /s	184 l/s
Débit maximum d'azote	87 m ³ /s	100 l/s	192 m ³ /s	220 l/s

Tableau récapitulatif des caractéristiques des maquettes EPAD et CETU

2.2 - Configurations de trappes testées

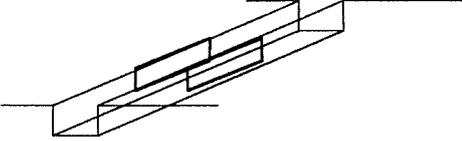
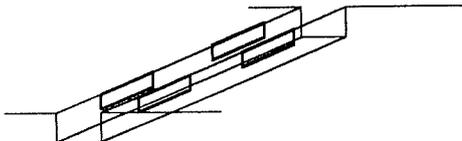
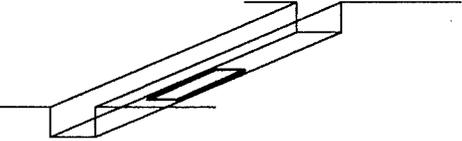
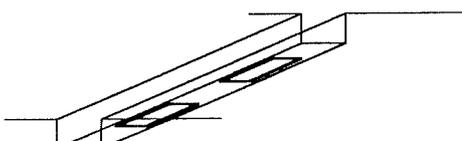
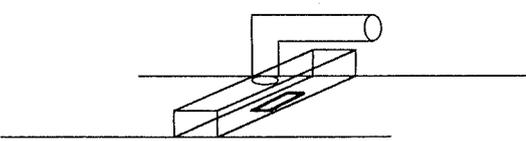
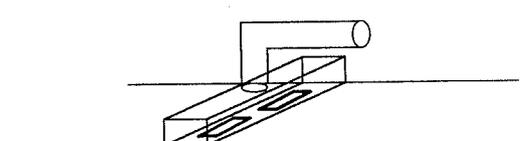
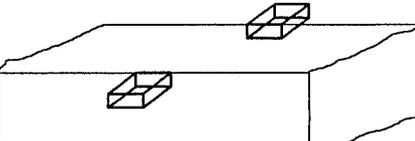
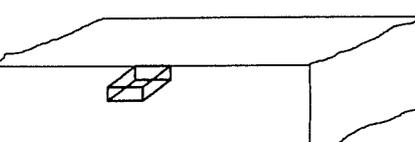
Dans l'ensemble des essais, différentes configurations de trappes ont été testées. Elles seront distinguées dans le suite du rapport de manière abrégée.

Les tableaux suivants récapitulent les différentes configurations testées avec leur notation abrégée et présentent un schéma pour chaque maquette.

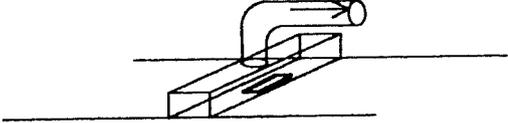
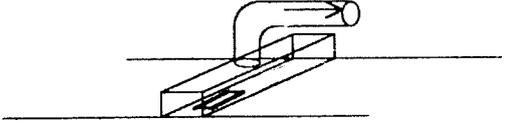
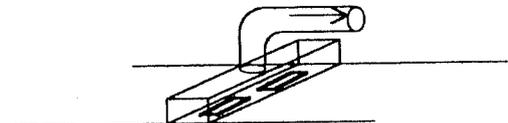
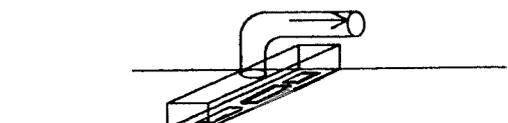
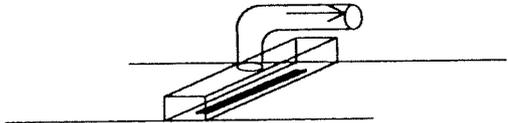
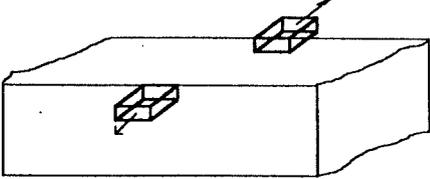
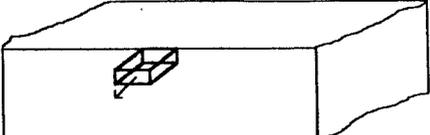
Les configurations de trappes testées sont les suivantes :

- Maquette EPAD avec poutrelles (encore appelées carneaux) apparentes au plafond : 4 configurations, dont 2 verticales sur les faces avant et arrière du carneau V 1/2 et V 1/3 2/3, et 2 horizontales sur la face inférieure du carneau H 1/2 et H 1/3 2/3 ;
- Maquette EPAD avec plafond lisse : 4 configurations, dont 2 au plafond P 1/2 et P 1/3, et 2 latérales Lsym et Ldissym ;
- Maquette CETU : 7 configurations, dont 5 au plafond P 1/2, P 1/3, P 1/3 2/3, P 1/4 1/2 3/4 et fente continue, et 2 latérales Lsym et Ldissym.

Les chiffres 1/2, 1/3, 2/3, 1/4 et 3/4 correspondent à l'emplacement d'une ouverture et indiquent sa position dans la section transversale. Par exemple, 1/2 signifie qu'il y a une ouverture en milieu de section.

Notation	Signification	Représentation schématique
V 1/2	Vertical 1/2	
V 1/3 2/3	Vertical 1/3 2/3	
H 1/2	Horizontal 1/2	
H 1/3 2/3	Horizontal 1/3 2/3	
P 1/2	Plafond 1/2	
P 1/3 2/3	Plafond 1/3 2/3	
Lsym	Latéral symétrique	
Ldissym	Latéral dissymétrique	

Configurations de trappes testées sur la maquette EPAD

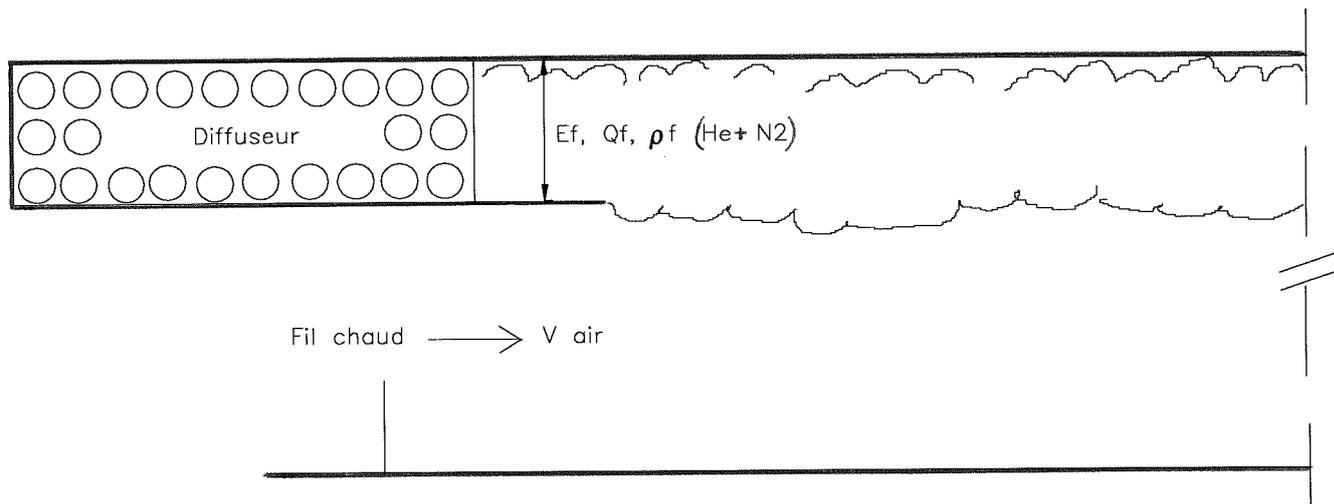
Notation	Signification	Représentation schématique
P 1/2	Plafond 1/2	
P 1/3	Plafond 1/3	
P 1/3 2/3	Plafond 1/3 2/3	
P 1/4 1/2 3/4	Plafond 1/4 1/2 3/4	
Fente continue	Fente continue	
Lsym	Latéral symétrique	
Ldissym	Latéral dissymétrique	

Configurations de trappes testées sur la maquette CETU

2.3 - Système d'injection des fumées

Les fumées chaudes d'un incendie réel à la température T_f sont simulées sur la maquette par un mélange d'hélium et d'azote dont les proportions respectives sont calculées pour avoir la même masse volumique ρ_f que de l'air chaud à la température T_f .

Le système permet de contrôler à la fois la masse volumique du mélange ρ_f , le débit volumique de fumée Q_f et l'épaisseur de fumée E_f .



Coupe longitudinale à l'entrée de la maquette

Le courant d'air en partie basse est contrôlé par une mesure de vitesse à l'aide d'un fil chaud, ce qui permet de le régler à la valeur requise suivant les caractéristiques des panaches de fumée retenues.

Le profil des vitesses à l'injection des fumées est rendu le plus uniforme possible grâce à un diffuseur constitué de billes de ping-pong et dimensionné à cet effet.

La procédure de réglage de l'injection des fumées est identique pour tous les essais.

A chaque essai, la température de fumée T_f , le débit volumique de fumée Q_f et l'épaisseur de fumée E_f sont donnés.

La masse volumique du mélange se déduit de la température imposée T_f , soit :

$$\rho_m = \rho_f = \rho_0 \cdot T_0/T_f$$

avec ρ_0 masse volumique de l'air à la température ambiante T_0 .

Les concentrations volumiques d'hélium X et d'azote $(1 - X)$ se déduisent alors de la masse volumique requise pour le mélange ρ_m , soit :

$$X \cdot \rho_{He} + (1 - X) \cdot \rho_{N2} = \rho_m$$

d'où

$$X = (\rho_m - \rho_{N2}) / (\rho_{He} - \rho_{N2})$$

où ρ_{He} et ρ_{N_2} désignent les masses volumiques respectives de l'hélium et de l'azote à la température ambiante T_0 .

Les débits volumiques respectifs d'hélium et d'azote sont alors déterminés à partir du débit de fumée imposé Q_f et compte tenu de l'échelle des débits $\bar{D}^{5/2}$ sur la maquette.

$$\begin{aligned} \text{Soit : } Q_V(\text{He}) &= X \cdot Q_f \cdot \bar{D}^{5/2} \\ Q_V(\text{N}_2) &= (1 - X) \cdot Q_f \cdot \bar{D}^{5/2} \end{aligned}$$

ou encore en débits massiques :

$$\begin{aligned} Q_M(\text{He}) &= \rho_{\text{He}} \cdot X \cdot Q_f \cdot \bar{D}^{5/2} \\ Q_M(\text{N}_2) &= \rho_{\text{N}_2} \cdot (1 - X) \cdot Q_f \cdot \bar{D}^{5/2} \end{aligned}$$

Les débits massiques d'hélium et d'azote sont réglés à partir de deux cols soniques situés en aval de détendeurs et des mesures de la pression P et de la température T sont effectuées en amont de chaque col sonique.

En effet, le débit massique transitant par un col sonique ne dépend que de ses dimensions, des caractéristiques thermodynamiques du gaz et des températures et pression en amont. Chaque col sonique a fait l'objet d'un étalonnage à l'aide d'un débitmètre de type vortex par Framatome en début d'expérience.

2.4 - Instrumentation du dispositif expérimental

Le paragraphe précédent a décrit en détail le système d'injection et de réglage du mélange d'hélium et d'azote simulant les fumées sur la maquette.

A cela s'ajoute un certain nombre de points de mesures permettant de régler et de contrôler les paramètres suivants :

- le vitesse de l'air en partie basse du tunnel au droit de l'injection des fumées,
- le débit de chaque section d'aspiration,
- le débit global de soufflage d'air frais ou d'aspiration répartie,
- les concentrations d'oxygène entre deux sections d'aspiration sur 4 hauteurs (0,5 m, 2,0 m, 3,5 m et 4,5 m) pour les mesures de stratification,
- les concentrations d'oxygène des gaz aspirés pour chaque section d'aspiration.

Les mesures de vitesses et de débits ont été réalisées à l'aide de fils chauds, ce qui a posé quelques problèmes en début d'expérience pour le contrôle des débits aspirés en présence du mélange d'hélium et d'azote, car ces capteurs donnent des valeurs qui dépendent des proportions de chaque gaz. Une solution a été trouvée pour pallier cette difficulté : elle consiste dans son principe à mesurer le débit avant l'injection du mélange d'hélium et d'azote et à faire en sorte que la vitesse de rotation du ventilateur d'extraction reste ensuite constante, ce qui garantit le maintien du même débit volumique.

3 - PRINCIPES DE L'INTERPRETATION DES ESSAIS - PRECISION DES REGLAGES ET DES MESURES

Lors des essais avec aspiration, trois mesures sont faites pour chaque section d'aspiration i :

- la concentration en oxygène $[O_2]_i$ du mélange aspiré,
- le débit d'aspiration Q_{ci} de la section à l'instant de la mesure de la concentration en oxygène,
- le débit d'injection $Q_{inj,i}$ des fumées dans la maquette au même instant.

La suite du présent chapitre indique l'interprétation et les corrections qui sont faites sur ces valeurs, et les incertitudes obtenues sur les résultats.

3.1 - Interprétation et correction des résultats bruts

L'analyse des résultats repose essentiellement sur l'estimation de deux familles de grandeurs :

- les rendements locaux ou globaux qui représentent le rapport du volume de fumée aspiré sur le volume total de gaz aspiré,
- les efficacités locales ou globales qui représentent le rapport du volume de fumée aspiré sur le volume total de fumée injecté.

Ces grandeurs seront par la suite exprimées en %. Pour éviter toute ambiguïté entre différences relatives (exprimées en %) et différences absolues entre des pourcentages, nous n'utiliseront le plus souvent que des différences absolues et nous les exprimerons en "points". Ainsi par exemple, entre une efficacité de 75 % et une efficacité de 80 %, nous dirons qu'il y a une différence de 5 points en faveur de la seconde (la différence relative serait de $5/75 = 6,75$ %).

Deux valeurs "brutes" peuvent être déduites directement des mesures sur la maquette :

- le rendement local R_i de la section d'aspiration i est la concentration en fumée dans le conduit d'aspiration :

$$R_i = (21 - [O_2]_i) / 21$$

- l'efficacité locale brute E_{bi} représente l'efficacité de la section d'aspiration i compte tenu des débits d'aspiration et d'injection existant au moment de la mesure de R_i :

$$E_{bi} = R_i \times Q_{ci} / Q_{inj,i}$$

Une difficulté importante de l'interprétation provient du fait que les débits Q_{ci} et $Q_{inj,i}$ bien que mesurés avec précision, ne correspondent pas exactement aux valeurs correspondantes $Q^{\circ c}$ et $Q^{\circ inj}$ spécifiées pour l'essai : les difficultés de réglage entraînent une dispersion qui atteint au maximum 5 % des débits spécifiés.

Il faut donc trouver un moyen permettant de passer des valeurs brutes R_i et E_{bi} ci-dessus à des valeurs locales puis globales comparables d'un essai à l'autre. En d'autres termes, il faut effectuer des corrections pour se ramener aux valeurs nominales spécifiées $Q^{\circ c}$ et $Q^{\circ inj}$.

Pour cela, trois méthodes peuvent être utilisées et nous essayerons de juger de leur opportunité respective :

- 1 - Supposer que l'efficacité de l'aspiration n'est pas affectée par les écarts sur Q_c et Q_{inj} et poser $E_{mes} = \sum E_{bi}$ où E_{bi} est donc l'efficacité brute mesurée au niveau de chaque section d'aspiration.
- 2 - Supposer que le rendement de l'aspiration n'est pas affecté par les écarts sur Q_c et Q_{inj} et poser $E_{th} = \sum R_i \cdot Q^{\circ c}/Q^{\circ inj}$ où R_i est donc le rendement brut de chaque section d'aspiration.
- 3 - Corriger les rendements mesurés, soit globalement, soit section par section, en utilisant pour chaque cas d'autres essais où tous les paramètres sont les mêmes sauf un seul (Q_c ou Q_{inj}), de façon à estimer la correction à apporter :

$$\Delta R = \partial R / \partial Q \cdot \Delta Q$$

Ensuite l'estimation de l'efficacité globale peut se faire en utilisant le rendement corrigé et les débits spécifiés $Q^{\circ c}$ et $Q^{\circ inj}$ comme précédemment.

Cette dernière méthode paraît plus rigoureuse, en particulier parce qu'il apparaît que les rendements varient sensiblement en fonction de Q_c et Q_{inj} . Cependant, elle est relativement fastidieuse à appliquer et n'est pas réalisable pour tous les essais (la contrainte d'un seul paramètre variable étant très restrictive).

Pour juger de l'opportunité de cette troisième méthode, nous l'avons appliquée aux essais CETU portant sur les débits d'aspiration avec les configurations P 1/3 et L dissymétrique, puis nous avons comparé les efficacités ainsi corrigées avec les efficacités mesurées E_{mes} et théoriques E_{th} déterminées suivant les méthodes 1 et 2.

On constate que les écarts absolus entre les différentes efficacités restent inférieurs à 5 points et que très souvent l'efficacité corrigée se trouve encadrée par les deux valeurs E_{mes} et E_{th} .

La sensibilité du calcul de l'efficacité est en fait atténuée parce que les rendements sont des fonctions décroissantes de Q_c et des fonctions croissantes de Q_{inj} . En effet, la correction sur l'efficacité est la suivante :

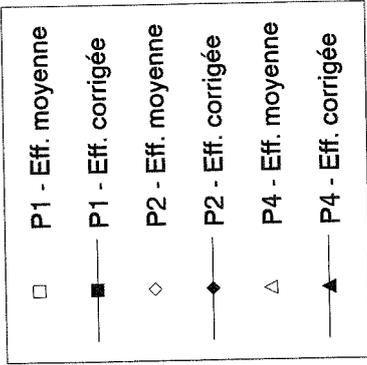
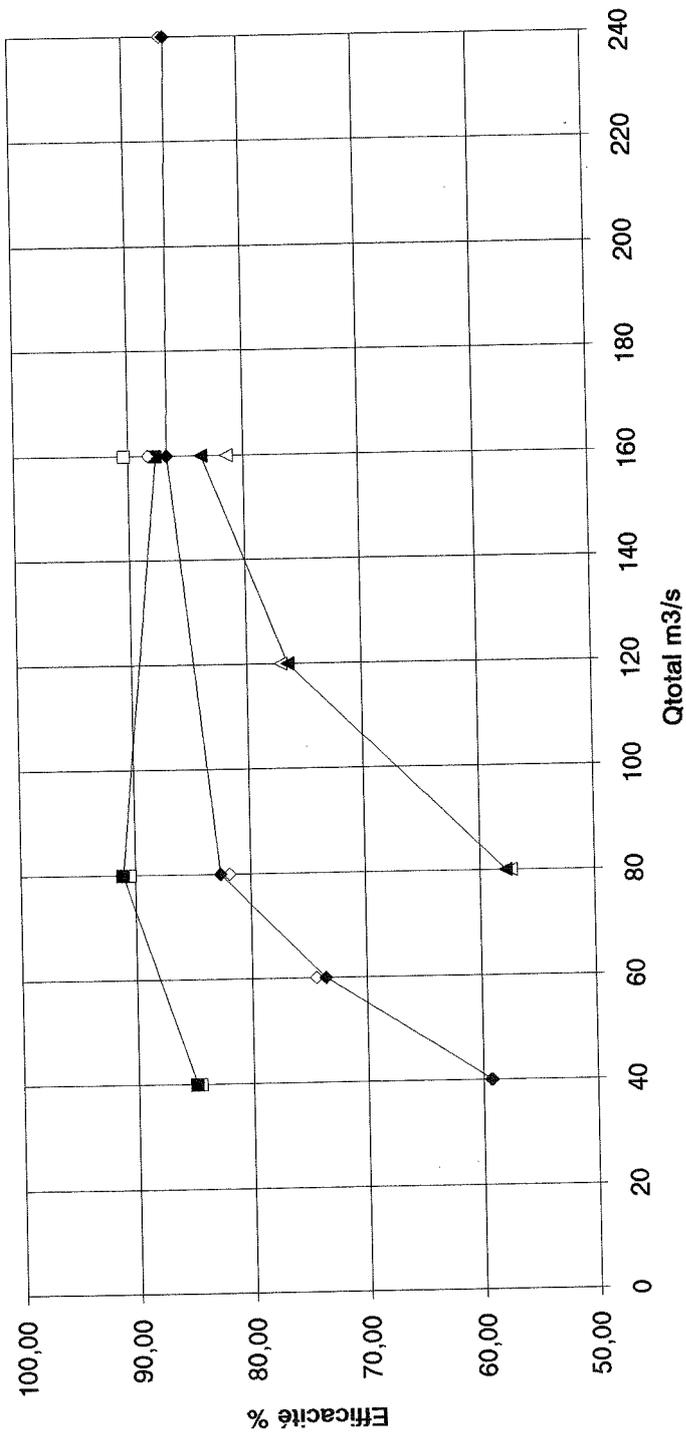
$$E_{corrigée} = (R + \Delta R) \cdot (Q_c + \Delta Q_c) / (Q_{inj} + \Delta Q_{inj})$$

La décroissance de ΔR avec ΔQ_c est compensée par le coefficient multiplicateur $(Q_c + \Delta Q_c)$, et sa croissance avec ΔQ_{inj} est de même compensée par le coefficient diviseur $(Q_{inj} + \Delta Q_{inj})$. Par conséquent, même si la variation du rendement est parfois grande, celle de l'efficacité ne l'est pas autant.

En conclusion, la suite du rapport utilisera la moyenne de l'efficacité mesurée E_{mes} et de l'efficacité théorique E_{th} , notée E_{moy} ou E dans les tableaux, qui est beaucoup plus facile à calculer que $E_{corrigée}$, cette dernière n'étant d'ailleurs pas toujours calculable. La figure 1 montre à titre d'illustration ce que donne l'utilisation de $E_{corrigée}$ et de E_{moy} dans le cas de l'étude de l'influence du débit total d'aspiration sur l'efficacité du système en configuration P 1/3 : les faibles écarts constatés justifient l'utilisation exclusive de E_{moy} .

Figure 1

Maquette CETU
Aspiration 4 x 50 m
P1/3 - Va = 10 m/s - 250°C
Test sur la correction des rendements
Efficacité totale = f(Débit total aspiré)



3.2 - Incertitudes sur les résultats

L'imprécision sur les mesures rejaille sur la représentativité des rendements et efficacités décrits au paragraphe précédent. Nous allons essayer d'estimer les incertitudes correspondantes.

Le rapport de Framatome sur la maquette CETU (référence 2) indique les valeurs suivantes pour l'incertitude sur les mesures :

- répétabilité à 0,2 point près pour la mesure de la concentration d'oxygène dans les conduits d'aspiration (Framatome retient cette valeur pour l'incertitude absolue sur $[O_2]$) ;
- incertitude relative inférieure à 2 % pour le débit Q_{ci} des sections d'aspiration (Framatome retient une incertitude relative de 1 %) ;
- incertitude relative inférieure à 1 % pour le débit Q_{inj} des fumées injectées (Framatome considère que cette incertitude est négligeable).

A partir de ces valeurs, on peut estimer l'incertitude qui en résulte sur l'efficacité globale telle qu'on l'a définie ci-avant. Dans un premier temps, on évalue l'incertitude sur les valeurs dites "mesurées" et "théoriques".

1 - Efficacités supposées indépendantes de ΔQ_c et ΔQ_{inj} :

Il faut calculer l'incertitude absolue sur chaque efficacité locale brute E_{bi} et les sommer pour obtenir l'incertitude absolue sur E_{mes} . Celle-ci est le plus souvent comprise entre 1 et 3 points avec quelques cas atteignant 5 à 6 points.

2 - Rendements supposés indépendants de ΔQ_c et ΔQ_{inj}

Le rendement global est la somme des rendements locaux. Ceux-ci ayant une incertitude absolue d'environ 1 point, le rendement global présente une incertitude de 1 à 4 points suivant le nombre de sections d'aspiration en fonctionnement.

L'efficacité théorique E_{th} est obtenue en multipliant ce rendement global par le rapport $Q^{\circ c}/Q^{\circ inj}$: l'incertitude absolue est donc multipliée dans le même rapport. Elle varie ainsi de 1 à 2 points avec quelques valeurs atteignant 4 ou 5 points.

A ces incertitudes sur E_{mes} et E_{th} s'ajoute l'erreur qui est faite en estimant l'efficacité corrigée par la moyenne de ces deux valeurs. Or il a été indiqué que l'estimation corrigée est très souvent comprise entre E_{mes} et E_{th} . Dans les autres cas, elle est très proche de l'une ou l'autre valeur. On peut alors considérer que l'intervalle d'incertitude de l'efficacité réelle est borné :

- en valeur inférieure par $\min (E_{mes} - \Delta E_{mes} , E_{th} - \Delta E_{th})$
- en valeur supérieure par $\max (E_{mes} + \Delta E_{mes} , E_{th} + \Delta E_{th})$.

L'écart entre la valeur que nous retenons pour l'efficacité et la plus éloignée des deux bornes ci-dessus représente l'incertitude absolue sur l'efficacité. Il est compris entre 2 et 4 points le plus souvent. Il atteint 5 à 6 points pour 10 % des essais, voire même dans un cas 9 points.

Ce sont donc finalement ces valeurs qui traduisent la précision des résultats commentés dans le présent rapport.

A titre d'illustration, la figure 1bis présente les mêmes résultats que la figure 1 en faisant apparaître l'intervalle d'incertitude de chaque essai.

Les incertitudes de mesure retenues par Framatome semblent plutôt minimales, un calcul d'incertitude a également été réalisé avec les hypothèses suivantes :

- incertitude absolue sur la concentration en oxygène : 0,3 point,
- incertitude relative sur Q_{ci} : 1,5 %,
- incertitude relative sur Q_{inj} : 0,5 %.

Les incertitudes absolues sur l'efficacité globale sont alors majorées de l'ordre de 40 % : elles sont généralement comprises entre 3 et 6 points, et atteignent jusqu'à 8 points pour 10 % des essais, voire 12 points dans un cas.

Tout considéré, un ordre de grandeur de ± 5 points peut donc être considéré comme généralement représentatif de l'incertitude sur les résultats exprimés en terme d'efficacité globale.

Maquette CETU
Aspiration 4 x 50 m
P1/3 - Va = 10 m/s - 250°C
Incertitudes sur les efficacités
Efficacité totale = f(Débit total aspiré)

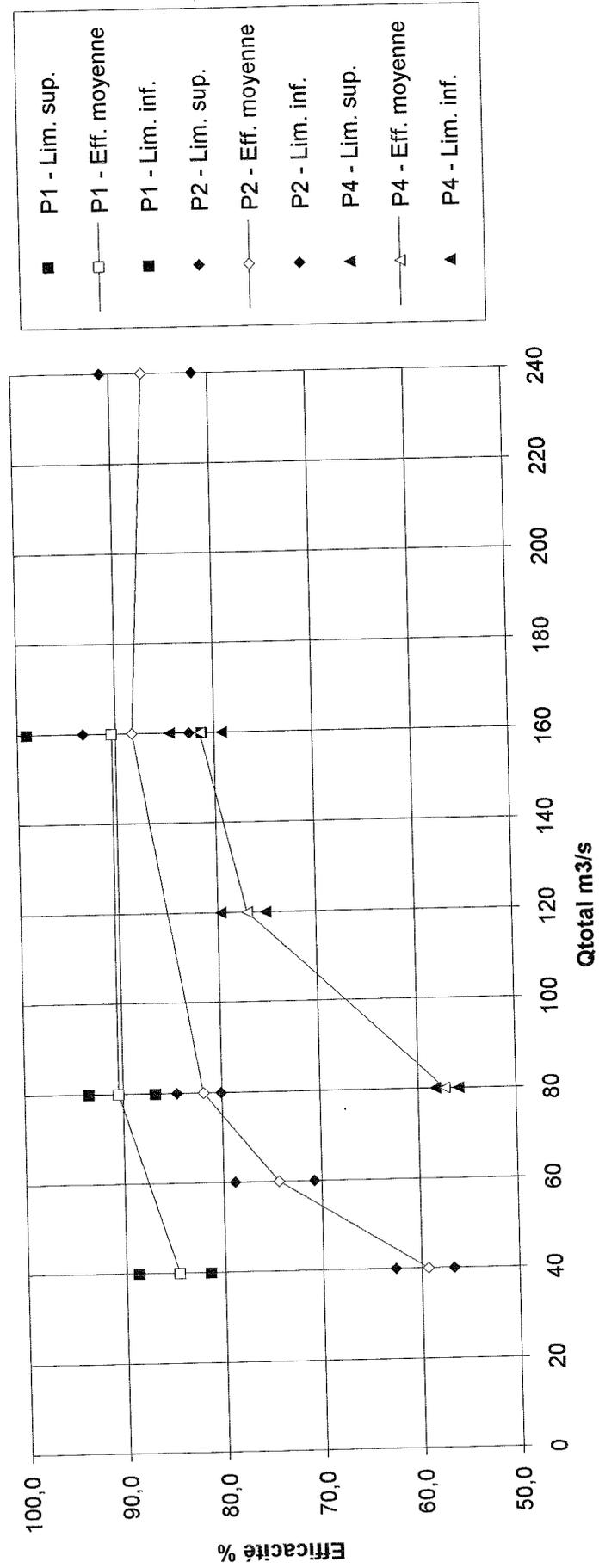


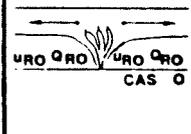
Figure 1bis

4 - ESSAIS DE STRATIFICATION DES PANACHES DE FUMEE

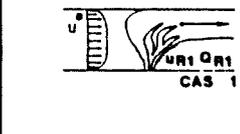
Avant de réaliser des essais pour tester les performances des systèmes de désenfumage, il était nécessaire de sélectionner au préalable les panaches de fumées conduisant à une bonne stratification parmi tous les panaches possibles. En effet, il est inutile de réaliser des essais sur des systèmes de désenfumage avec des panaches de fumées déstratifiés, car dans ce cas l'efficacité du système est directement proportionnelle aux débits d'aspiration installés.

Les panaches de fumée possibles ont été définis sur la base du tableau fourni dans le rapport du Comité des Tunnels de l'Association Internationale Permanente des Congrès de Routes (A.I.P.C.R.) présenté au congrès de Bruxelles en 1987. Celui-ci est rappelé ci-dessous.

cause de l'incendie	I (MW)	équivalent flaque d'essence (m ²)	cas 0 fumée sur les deux côtés			cas 1 fumée sur un seul côté			T (°C) à la distance x (m) du foyer pour le cas 1. Pour le cas 0, la température diminue plus rapidement.				
			u* [m/s]	u _{RO} [m/s]	Q _{RO} [m ³ /s] (at x = 100 m)	u* [m/s]	u _{R1} [m/s]	Q _{R1} [m ³ /s] (at x = 100 m)	10 m	100 m	200 m	400 m	
voiture de tourisme	~ 5	2											
bus/camion	~ 20	8	<0,5	1	10	> 1-2	1.5	20	400	150	80	40	
flaque d'essence	~ 100	30 - 100	<0,5	2	30	> 2-3	3	60	700	250	120	60	
			<0,5	3-5	50-100	> 5-8	5-8	100-200	1 000	400	200	100	



CAS 0



CAS 1

Ce tableau a permis d'arrêter les caractéristiques principales des panaches de fumées supposés être représentatifs d'incendies de véhicules légers, de poids lourds sans matières dangereuses ou de poids lourds avec matières dangereuses.

Les panaches retenus pour l'étude sont caractérisés par :

- le débit de fumée Q_f ,
- la température des fumées T_f ,
- la vitesse d'avancement des fumées V_f ,
- la vitesse du courant d'air frais en dessous des fumées V_{tun} .

L'épaisseur E_f de la couche de fumée se déduit de Q_f et V_f compte tenu de la largeur du tunnel. Toutes ces valeurs sont celles qui sont imposées à l'entrée de la maquette.

Quatre cas principaux ont été retenus, car ils servent généralement au dimensionnement des installations de désenfumage. Deux correspondent à un incendie de PL ne transportant pas de matières dangereuses (panaches P1 et P2) et deux correspondent à un incendie de matières dangereuses (panaches P3 et P4). Pour chacun de ces deux types d'incendie, il a été choisi un cas où la vitesse de l'air en tunnel V_{tun} est faible et où les fumées sont supposées se répartir par moitié dans les deux directions : on ne s'intéresse alors qu'à une de ces deux moitiés de panache (P1 et P3). Les deux autres cas correspondent au courant d'air minimal V_{tun} qui repousse la totalité des fumées d'un seul côté (P2 et P4). On a ainsi retenu les caractéristiques suivantes :

Panache	Type d'incendie	Q_f (m^3/s)	V_{tun} (m/s)	V_f (m/s)
P1	PL sans MD - Fumées dans les deux sens	30	0,5	2
P2	PL sans MD - Fumées dans un sens	60	2	3
P3	PL avec MD - Fumées dans les deux sens	60	0,5	4
P4	PL avec MD - Fumées dans un sens	120	5	6

Par ailleurs, trois autres cas ont fait l'objet de quelques essais afin de vérifier le fonctionnement du désenfumage sur d'autres types de panache :

- incendie de poids lourd avec une vitesse élevée V_{tun} de l'air en tunnel (P5),
- incendie de véhicule léger avec vitesse V_{tun} faible permettant aux fumées de se partager dans les deux directions (P7) et avec vitesse V_{tun} poussant toutes les fumées dans la même direction (P6).

Panache	Type d'incendie	Q_f (m^3/s)	V_{tun} (m/s)	V_f (m/s)
P5	PL sans MD - V_{tun} élevée	60	4	4
P6	VL - Fumées dans un seul sens	20	1,5	2
P7	VL - Fumées dans les deux sens	10	0,5	1,5

Le débit total de 120 m^3/s retenu pour les matières dangereuses a été choisi arbitrairement dans la fourchette de 100 à 200 m^3/s préconisée par l'AIPCR : d'autres valeurs peuvent être retenues pour des projets (souvent 100 m^3/s).

Les panaches-types précédents n'ont nullement l'ambition de servir systématiquement de base de dimensionnement. Leur but est de fournir une série de cas réalistes permettant d'encadrer la majorité des situations qu'on rencontre en pratique dans les projets puisqu'ils correspondent à des débits de fumées variant de 10 à 120 m^3/s pour différentes vitesses de courant d'air en tunnel.

Pour chacun de ces panaches, on a recherché quelles étaient les températures T_f pour lesquelles la stratification se maintient sur toute la section d'essai, et ceci en fonction des

différentes configurations de tunnel. Les photographies de la page suivante montrent l'aspect des panaches stratifiés.

L'évaluation de la qualité de la stratification est réalisée à partir de mesures de concentrations d'oxygène faites dans 3 sections du tunnel et à 4 hauteurs différentes 0,5 m, 2,0 m, 3,5 m et 4,5 m.

Le tableau ci-après donne les caractéristiques des panaches de fumées testés et les résultats obtenus sur l'état de la stratification.

Dans l'analyse de ces résultats, on peut distinguer 3 cas correspondant à des situations plus ou moins favorables quant à la production de turbulence, à savoir :

- les essais réalisés sur la maquette EPAD avec 4 carreaux apparents au plafond espacés de 50 m,
- les essais réalisés sur la maquette CETU avec plafond lisse et sans véhicules,
- les essais réalisés sur la maquette CETU avec plafond lisse et véhicules en tunnel.

Pour la maquette EPAD avec carreaux, on constate une déstratification aux environs de 120°C pour le panache P1 et en dessous de 120°C pour le panache P2.

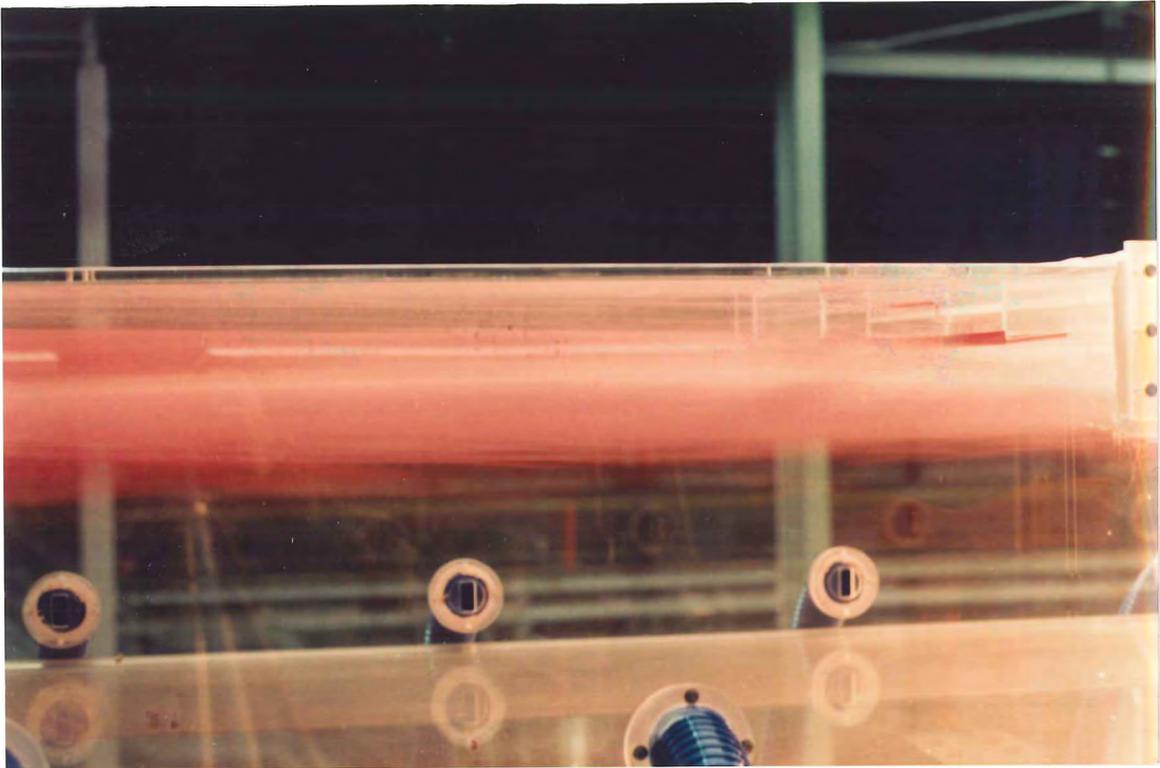
Pour la maquette CETU et ces mêmes panaches P1 et P2, des températures plus basses ont été testées du fait que le plafond lisse devait engendrer moins de turbulence, ce qui a permis de détecter une déstratification pour des températures de l'ordre de 60°C en l'absence de véhicules en tunnel.

La présence de véhicules en tunnel favorise bien entendu la déstratification, mais moins que les poutrelles, puisque l'écoulement reste stratifié pour les panaches P1 et P2 à 120°C. Les véhicules ont été disposés de façon à créer une obstruction progressive à l'écoulement par rapport au sens du courant d'air. On a ainsi introduit des volumes représentatifs de véhicules légers (L = 4,70 m ; l = 1,70 m ; h = 1,40 m) autour de la première section d'aspiration, on leur a adjoint des petits poids lourds (L = 7,00 m ; l = 2,30 m ; h = 3,00 m) à la deuxième section d'aspiration, puis des gros poids lourds (L = 17,00 m ; l = 2,50 m ; h = 4,00 m) aux deux sections suivantes. Leur effet croissant peut être constaté dans les résultats du tableau.

Sur un essai réalisé avec le panache P1, on constate également que les poutrelles semblent plus néfastes que les véhicules vis à vis de la stratification, puisqu'on observe une déstratification à 120°C pour celles-ci tandis que l'écoulement reste stratifié avec des véhicules et plafond lisse à cette même température.

Les tests réalisés avec des panaches différents de P1 et P2 peuvent donner une idée de l'influence d'autres paramètres que $\Delta T = T_f - T_o$ et $\Delta V = V_f - V_{tun}$ sur la stratification, comme par exemple V_{tun} ; toutefois on ne dispose pas suffisamment d'essais pour étayer cette analyse. Ce n'était pas non plus l'objectif de l'expérimentation.

Les résultats de stratification obtenus sont présentés en figure 2 dans un plan (ΔT , ΔV). Certains points y ont été légèrement déplacés afin d'éviter qu'ils ne se superposent.



Exemple de panache stratifié sur la maquette EPAD



Exemple de panache stratifié sur la maquette CETU

RESULTATS DES ESSAIS DE STRATIFICATION

OBJET DES ESSAIS	PANA- CHE	MAQU ETTE	NATURE PLAFOND	VEHI- CULES	Qf m3/s	Qtot m3/s	Vtun m/s	Vf m/s	Vf - Vtun	Tf °C	Ef m	Stratif.
PL deux sens Vtunnel minimale	P1	EPAD	poutrelles	non	30	55	0,5	2	1,5	700	1,15	1
		EPAD	poutrelles	non	30	55	0,5	2	1,5	250	1,15	1
		EPAD	poutrelles	non	30	55	0,5	2	1,5	120	1,15	0,5
		EPAD	poutrelles	non	30	55	0,5	2	1,5	60	1,15	0
		CETU	lisse	non	30	45	0,5	2	1,5	80	1,67	1
		CETU	lisse	non	30	45	0,5	2	1,5	40	1,67	0
		CETU	lisse	oui	30	45	0,5	2	1,5	120	1,67	1/1/1
PL un seul sens Vtunnel critique	P2	EPAD	poutrelles	non	60	150	2	3	1	700	1,54	1
		EPAD	poutrelles	non	60	150	2	3	1	250	1,54	1
		EPAD	poutrelles	non	60	150	2	3	1	120	1,54	1
		EPAD	poutrelles	non	60	150	2	3	1	60	1,54	0
		CETU	lisse	non	60	110	2	3	1	80	2,22	1
		CETU	lisse	non	60	110	2	3	1	40	2,22	0
		CETU	lisse	oui	60	110	2	3	1	120	2,22	1/1/1
		CETU	lisse	oui	60	110	2	3	1	80	2,22	1/1/0,5
MD deux sens Vtunnel minimale	P3	CETU	lisse	non	60	75	0,5	4	3,5	250	1,67	1
		CETU	lisse	non	60	75	0,5	4	3,5	120	1,67	0,5
MD un seul sens Vtunnel critique	P4	CETU	lisse	non	120	245	5	6	1	250	2,22	1
		CETU	lisse	non	120	245	5	6	1	120	2,22	1
		CETU	lisse	oui	120	245	5	6	1	250	2,22	1/1/1
		CETU	lisse	oui	120	245	5	6	1	120	2,22	1/0,5/0
PL un seul sens Vtunnel élevée	P5	CETU	lisse	non	60	180	4	4	0	250	1,67	1
		CETU	lisse	non	60	180	4	4	0	80	1,67	1
VL un seul sens Vtunnel critique	P6	EPAD	poutrelles	non	20	103	1,5	2	0,5	400	0,77	1
		EPAD	poutrelles	non	20	103	1,5	2	0,5	150	0,77	1
		EPAD	poutrelles	non	20	103	1,5	2	0,5	80	0,77	1
VL deux sens Vtunnel minimale	P7	EPAD	poutrelles	non	10	39	0,5	1,5	1	400	0,51	1
		EPAD	poutrelles	non	10	39	0,5	1,5	1	150	0,51	1
		EPAD	poutrelles	non	10	39	0,5	1,5	1	80	0,51	1

Légende : VEHICULES = présence ou non de véhicules dans la maquette
 STRATIF. = 1 si bonne stratif.; = 0,5 si déstratif. partielle; = 0 si déstratif. complète
 (S'il y a des véhicules, appréciations pour chacune des trois sections de mesure)

Remarques : PL 2 sens avec Vtun maximale est voisin de VL un seul sens avec Vtun minimale
 MD un seul sens avec Vtun élevée n'est pas réalisable sur la maquette
 MD 2 sens avec Vtun maximale est très voisin de PL un sens avec Vtun élevée

STRATIF1.XLS

Essais de stratification
 Analyse des résultats en fonction
 des écarts de température et de vitesse

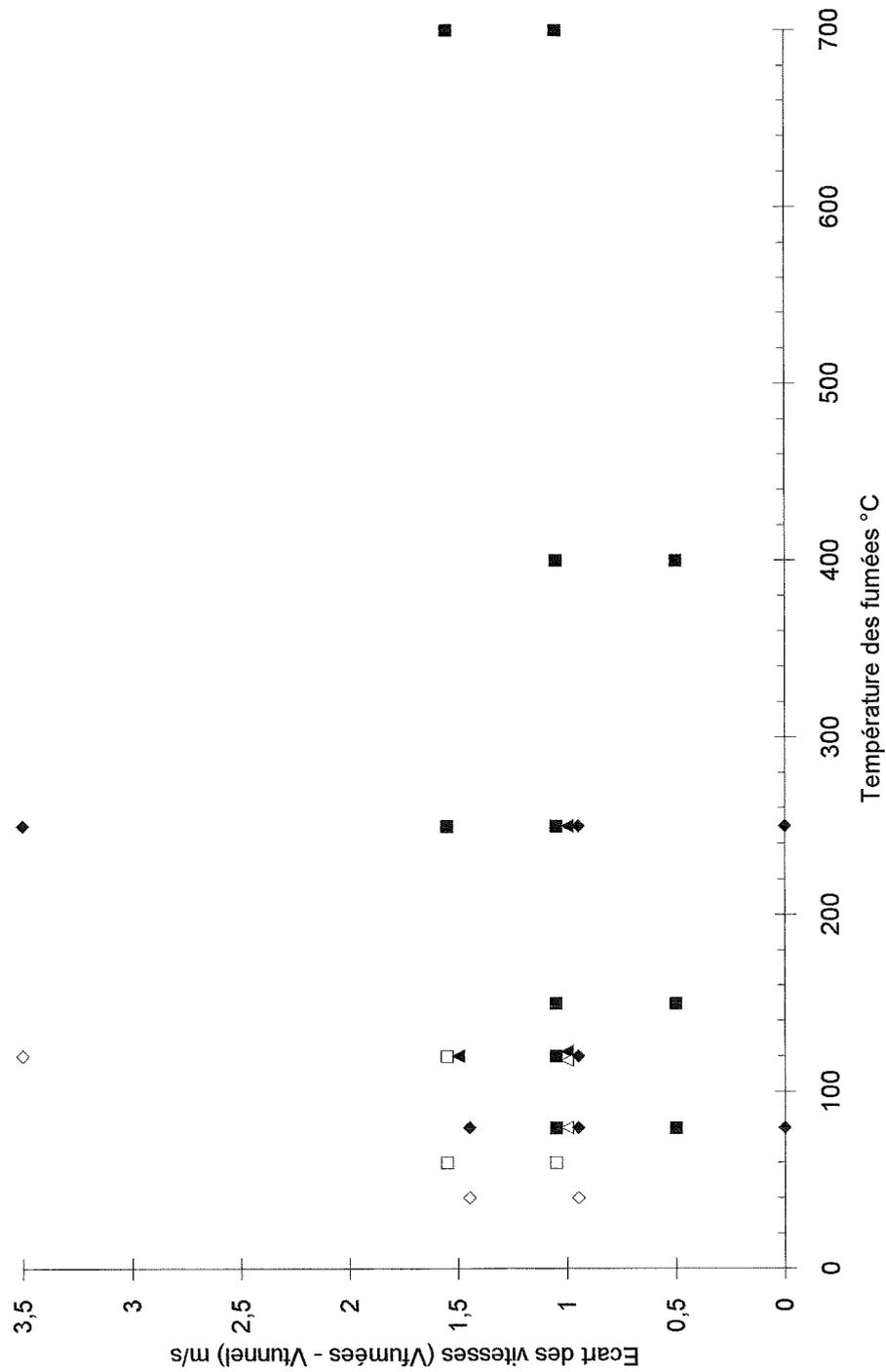


Figure 2

Pour compléter l'analyse descriptive faite sur les essais de stratification, il est possible de tenter également une autre approche basée sur l'analyse dimensionnelle, et en particulier sur les nombres de Richardson et de Reynolds.

Le nombre de Richardson est un paramètre adimensionnel caractéristique des écoulements stratifiés et est souvent utilisé dans les études portant sur les incendies en tunnel, notamment pour déterminer le risque de remontée des fumées à contre-courant en ventilation longitudinale. C'est aussi et avant tout une mesure de la stabilité d'un écoulement stratifié, due au physicien anglais Lewis Fry Richardson. Il est défini de la manière suivante :

$$Ri = g (\partial\rho/\partial z)/\rho(\partial U/\partial z)^2 = \text{Forces de flottabilité/Forces d'inertie}$$

où g est l'accélération de la pesanteur, ρ la masse volumique du fluide, variable avec la verticale (z), et U la vitesse d'écoulement dans le plan horizontal.

D'après la référence 4, si le nombre de Richardson est supérieur à 0,25, alors le mélange turbulent du fluide n'a pas lieu car les forces d'inertie sont insuffisantes pour contre-balancer les forces stabilisatrices de flottabilité. L'écoulement est alors stable. Si au contraire $Ri < 0,25$, les forces d'inertie sont suffisantes pour induire un mélange turbulent.

Dans les expériences ici décrites, on ne connaît pas les gradients verticaux de densité et de vitesse, c'est pourquoi on posera la définition suivante du nombre de Richardson :

$$Ri = g [(\rho_o - \rho)/E_f]/\rho (\Delta V/E_f)^2 = (\Delta T/T_o).g.E_f/\Delta V^2$$

où ΔT est la température des fumées au-dessus de 20°C, T_o la température de référence de 293 Kelvin, g l'accélération de la pesanteur, E_f l'épaisseur des fumées et $\Delta V = (V_f - V_{\text{tun}})$ l'écart de vitesse entre les fumées et l'air en partie basse du tunnel.

Le nombre de Reynolds retenu, caractéristique de l'écoulement d'ensemble, est bâti sur la vitesse de débit moyenne et sur le diamètre hydraulique du tunnel :

$$Re = U_{\text{moy}}. Dh/\nu$$

La figure 3 présente un graphique assez similaire à celui de la figure 2, avec en abscisse le Richardson et en ordonnée le Reynolds tels que définis ci-dessus. On observe sur ce graphique des cas déstratifiés pour des valeurs $Ri > 0,25$, mais la définition du Richardson n'est pas rigoureusement identique à celle de la référence 4. Sur cette figure, la limite indiquée en trait fin, fonction du Richardson et du Reynolds, sépare plus ou moins bien les cas stratifiés et déstratifiés.

Essais de stratification
Analyse des résultats en fonction
du Richardson et du Reynolds

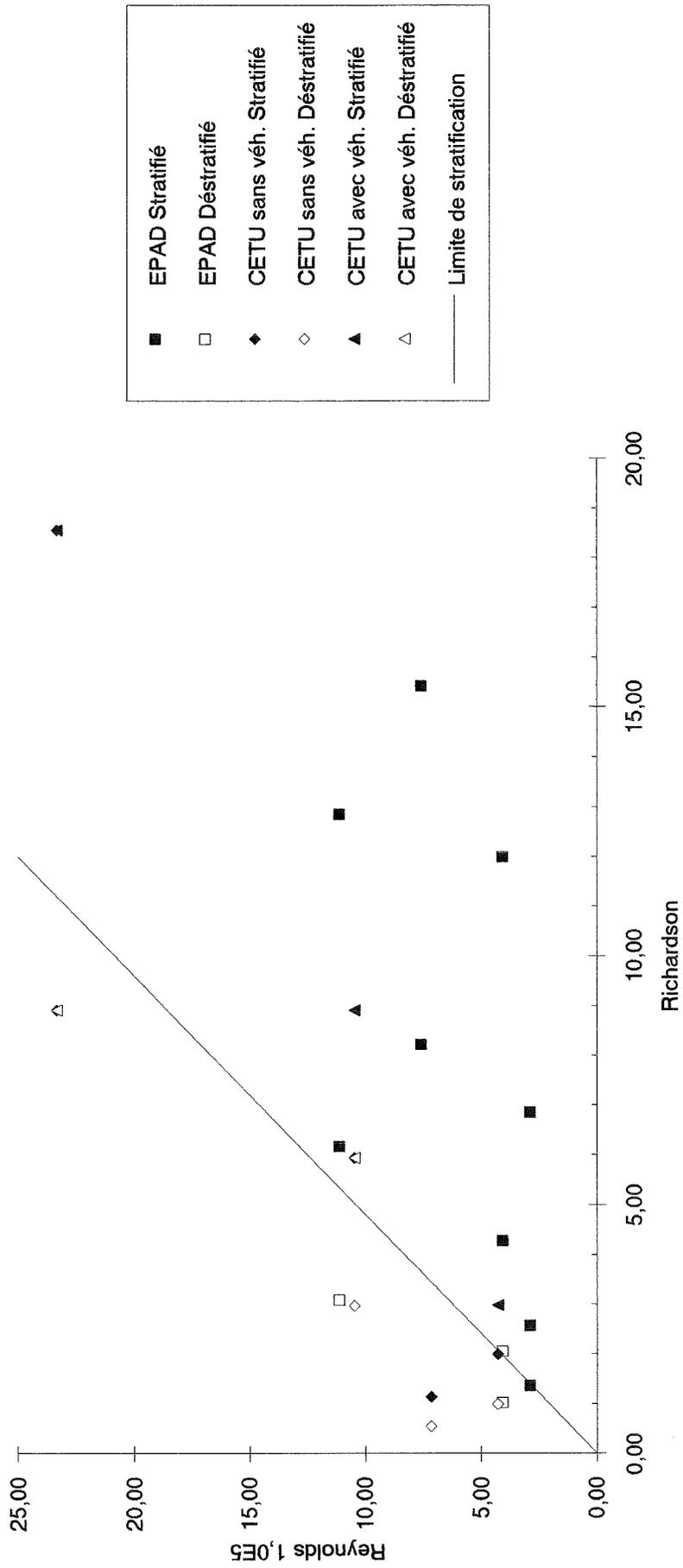


Figure 3

5 - ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'étude sur maquettes en gaz au 1/15^è du dispositif de trappes de désenfumage s'est déroulée en deux étapes puisque successivement deux maquettes ont été étudiées :

- l'une pour le compte de l'EPAD correspondant à une section type à 3 voies de la future autoroute A.14 à la Défense, soit une section de 13 m de largeur et de 5,4 m de hauteur,
- l'autre pour le compte du CETU correspondant à une section type de tunnel à 2 voies, de largeur volontairement réduite pour accentuer la différence avec celle de l'EPAD, soit une section de 9 m de largeur et de 5 m de hauteur.

Pour la maquette EPAD, l'objectif principal était de définir la configuration optimale des trappes de désenfumage, à savoir nombre, disposition dans la section transversale, section et forme, assurant l'efficacité maximale du dispositif.

Pour la maquette CETU, l'objectif était plus large et visait à répondre à l'essentiel des questions qui se posent sur ce type de dispositif de désenfumage, à savoir tout d'abord :

- l'optimisation de la géométrie : position, forme, section, espacement ;
- l'optimisation du débit d'aspiration ;
- l'appréciation de l'efficacité du système.

D'autres paramètres susceptibles d'influer sur l'efficacité de ces systèmes de désenfumage ont également été testés :

- l'influence du courant d'air longitudinal,
- l'influence d'un soufflage d'air frais en haut ou en bas simultané à l'aspiration,
- l'influence de la présence de véhicules en tunnel.

Enfin le système de trappes de désenfumage a été testé comparativement à un système de petites bouches réparties.

Avant d'analyser dans le détail les résultats de ces essais, Il faut préciser la terminologie pour faciliter la lecture de ce qui va suivre.

La notion de carneau d'aspiration, propre à la maquette EPAD, correspond à un conduit disposé en plafond, raccordé à des gaines latérales de ventilation, et servant à aspirer les fumées plus ou moins près du centre de la section du tunnel.

Par abus de langage, on a parfois assimilé la notion de carneau d'aspiration à celle de section d'aspiration, en particulier pour le débit total d'aspiration dans une section transversale du tunnel que nous noterons Q_{carneau} ou Q_c .

Le débit total d'aspiration Q_{total} sur la longueur de tunnel étudiée, soit 250 m à échelle réelle, correspond à $N_c \times Q_{\text{carneau}}$, où N_c est le nombre total de sections d'aspiration en fonctionnement, variant de 1 à 4.

Comme décrit au chapitre 3, les paramètres retenus pour analyser les performances des systèmes étudiés sont :

- le rendement local ou global,
- l'efficacité locale ou globale,
- l'efficacité relative de chaque section d'aspiration.

Le rendement local ou global est défini comme étant le rapport du volume de fumées aspirées sur le volume total d'aspiration.

L'efficacité locale ou globale est définie comme étant le rapport du volume de fumées aspirées sur le volume total de fumées injectées.

L'efficacité relative de chaque section d'aspiration est définie comme étant le rapport du volume de fumées aspirées par la section sur le volume total de fumées restant dans le tunnel juste avant cette section. Pour la première section d'aspiration en fonctionnement, l'efficacité locale et l'efficacité relative sont confondues, en revanche pour les sections qui suivent, elles sont évidemment différentes.

Le présent chapitre analyse successivement l'influence de chaque paramètre.

5.1 - Influence de la température des panaches

Les essais portant sur l'influence de la température des panaches ont été réalisés :

- pour la maquette EPAD sur les configurations V 1/3 2/3 et H 1/3 2/3 avec poutrelles apparentes tous les 50 m au plafond ;
- pour la maquette CETU sur la configuration P 1/2 avec deux vitesses d'aspiration V_a .

Les résultats obtenus sont reportés sur les figures 4 et 5.

Dans le cas de la maquette EPAD, on constate une quasi-indépendance de l'efficacité totale avec la température pour les deux configurations testées, celle-ci étant un peu moins nette pour le panache P1 où une légère décroissance de l'efficacité est observée lorsque la température augmente.

Dans le cas de la maquette CETU, il y a aussi une quasi-indépendance de l'efficacité totale avec la température dans la plage de 250 °C à 700 °C ; mais une décroissance de l'efficacité lorsque la température augmente, apparaît dans la plage 80 °C à 250 °C pour les panaches P1 et P2.

Cette tendance à la décroissance de l'efficacité avec la température est a priori plutôt surprenante car on s'attendrait, en cas de dépendance de l'efficacité avec la température, à une tendance plutôt inverse (cf § 5.7 quant aux données bibliographiques à ce sujet).

Toujours dans le cas de la maquette CETU, on notera l'allure particulière de la courbe P1 - $2 \times 20 \text{ m}^3/\text{s}$ - $V_a = 32 \text{ m/s}$, celle-ci montrant une nette décroissance de 80 °C à 250 °C puis une nette croissance de 250 °C à 700 °C. Ce résultat est difficile à expliquer.

On peut d'ailleurs indiquer tout de suite que sur la maquette CETU, la configuration P 1/2 a souvent révélé un comportement atypique non expliqué comme on le verra plus loin. C'est ce qui a conduit à retenir la configuration P 1/3 au lieu de P 1/2 pour la suite des essais avec cette maquette.

En conclusion, et au moins pour une plage assez étendue de températures variant de 250 °C à 700 °C, l'influence de la température sur l'efficacité globale du système de désenfumage n'est pas très importante. Ce résultat a permis de limiter le nombre d'essais faisant varier la température. Celle-ci a en général été fixée à 250 °C pour tester d'autres paramètres. Cette valeur assure la stratification dans tous les cas de figure et correspond plutôt au minimum de l'efficacité.

Maquette EPAD avec poutrelles
Va = 5.5 m/s - 4 x 11 m³/s
Influence de la température
Efficacité totale = f(Température)

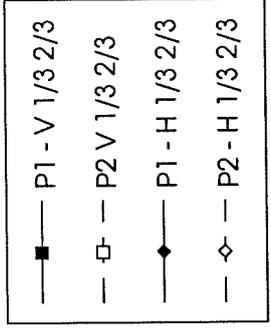
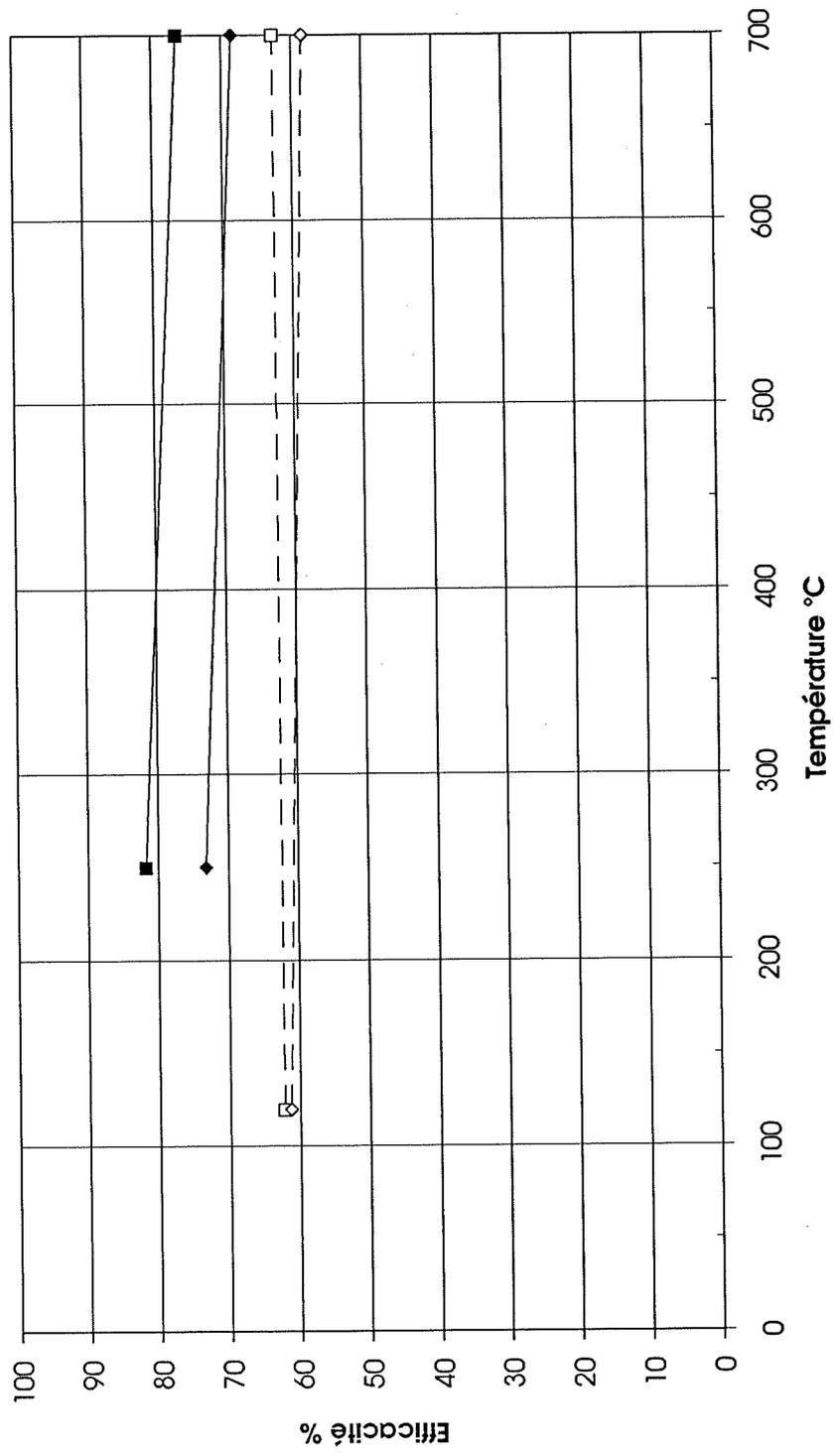


Figure 4

Maquette CETU
 Configuration P1/2
 Influence de la température
 Efficacité totale = f(Température)

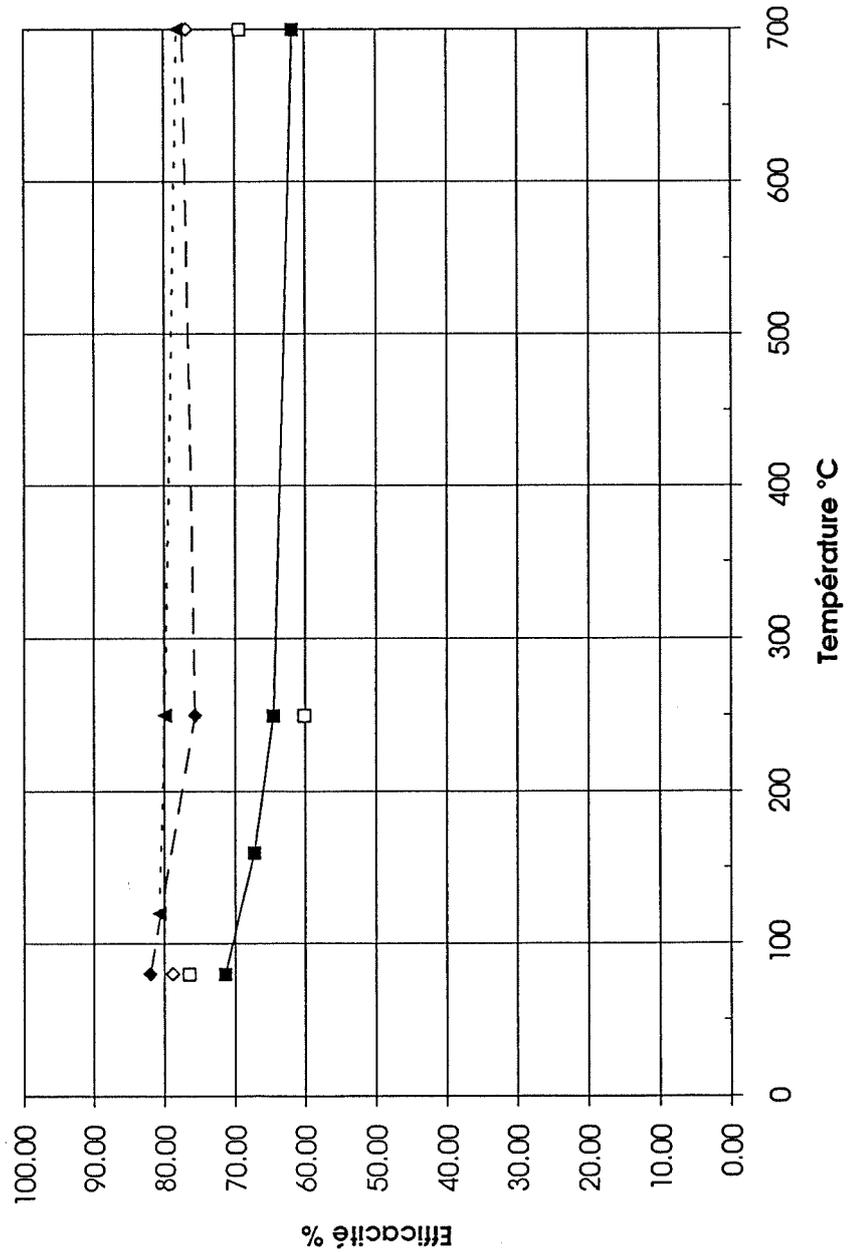


Figure 5

5.2 - Influence de la vitesse d'aspiration

Les essais portant sur l'influence de la vitesse d'aspiration V_a ont été réalisées :

- pour la maquette EPAD sur la configuration V 1/3 2/3 avec poutrelles et sur les configurations P 1/2 et Lsym avec plafond lisse ;
- pour la maquette CETU sur les configurations P 1/2, P 1/3 et Lsym.

Les résultats globaux obtenus sont reportés sur les figures 6, 7 et 8.

Dans le cas de la maquette EPAD, les vitesses d'aspiration testées varient de 3 m/s à 11 m/s, ce qui correspond plutôt à de faibles vitesses. Quels que soient la configuration ou le panache testés, on ne constate pas une grande variation de l'efficacité avec la vitesse d'aspiration.

Dans le cas de la maquette CETU, les vitesses d'aspiration testées sont plus fortes et varient de 10 m/s à 20 m/s. Quelques essais réalisés par erreur sur la configuration P 1/2 atteignent même 30 m/s. Sur la figure 8, on observe une légère tendance à la décroissance de l'efficacité avec la vitesse d'aspiration, celle-ci étant plus ou moins marquée suivant les configurations testées. La décroissance la plus importante est obtenue pour la configuration P 1/2 - 4 x 20 m³/s.

Une analyse plus détaillée, section par section, portant sur l'efficacité relative a par ailleurs été faite. Elle confirme bien sûr la même tendance mais révèle aussi un comportement à nouveau singulier de la configuration P 1/2, en particulier pour la vitesse d'aspiration de 10 m/s où les efficacités relatives présentent une dispersion beaucoup plus large que celle des autres configurations à la même vitesse. Si pour cette même configuration on compare l'ensemble des résultats disponibles, on constate un comportement assez chaotique de l'efficacité avec la vitesse d'aspiration. Certes les résultats correspondent à des panaches, des températures ou des débits d'aspiration différents, toutefois il apparaît difficile, voire impossible, de leur trouver une logique.

En conclusion, on retiendra que jusqu'à 10 m/s, la vitesse d'aspiration n'influe pratiquement pas sur l'efficacité du système, tandis qu'au delà de 10 m/s une légère tendance à la baisse de l'efficacité avec la vitesse d'aspiration semble s'amorcer, variable suivant les panaches de fumée (en particulier leur épaisseur) et les configurations de trappes (les résultats obtenus avec P 1/2 étant à prendre avec réserves).

Maquette EPAD avec poutrelles
Configuration V 1/3 2/3 - 250 °C
Influence de la vitesse d'aspiration
Efficacité totale = f(Vaspiration)

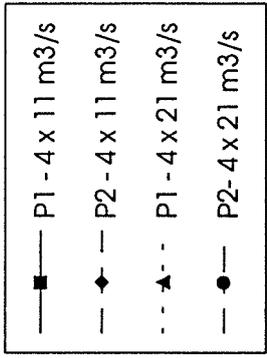
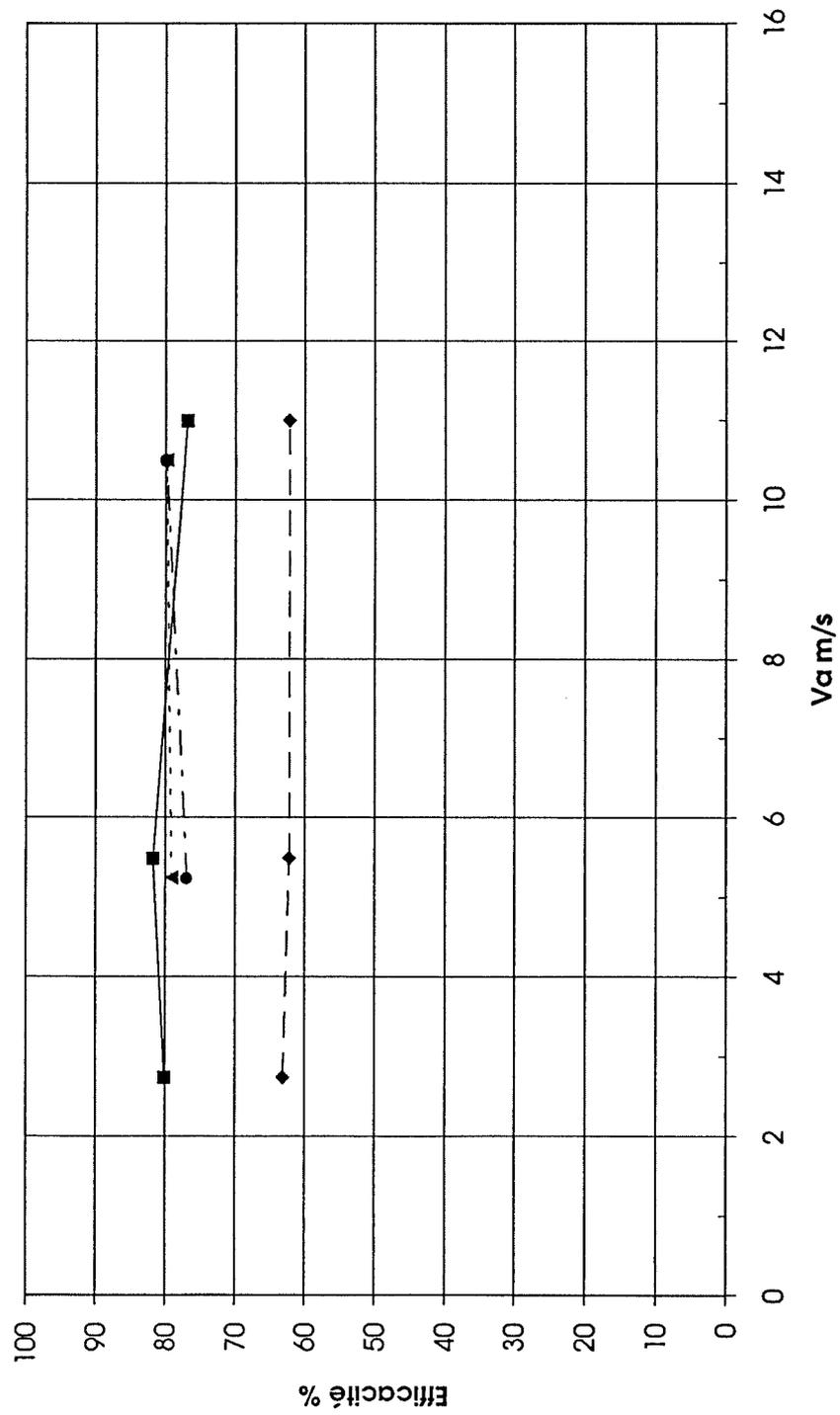


Figure 6

Maquette EPAD plafond lisse
P2 - 250 °C - 4 x 11 m³/s
Influence de la vitesse d'aspiration
Efficacité totale = f(V_{aspiration})

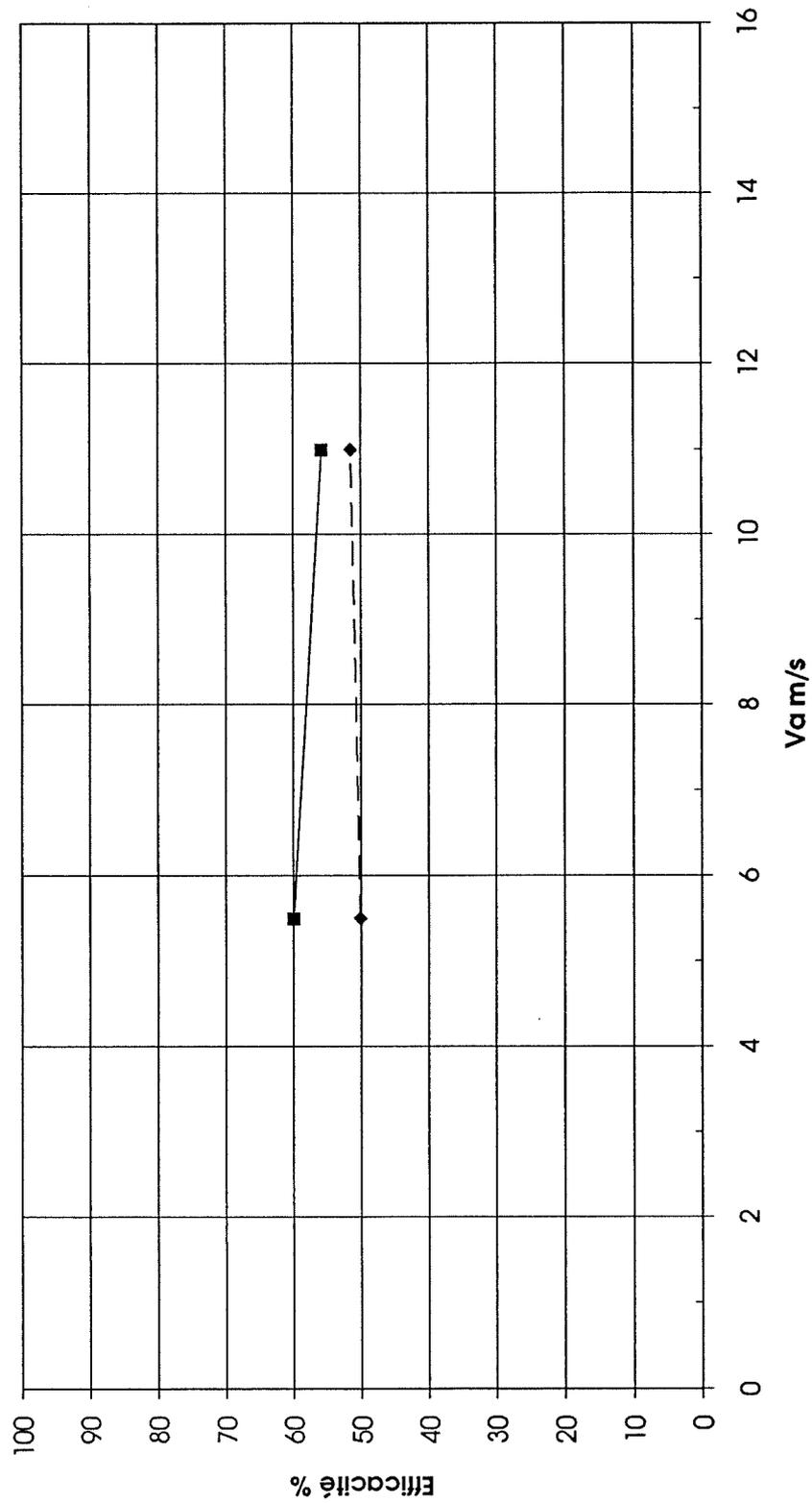
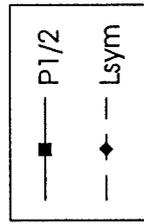


Figure 7



Maquette CETU
 P2 - 250 °C
 Influence de la vitesse d'aspiration
 Efficacité totale = f(V_{aspiration})

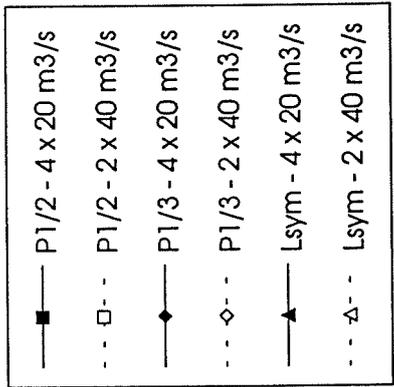
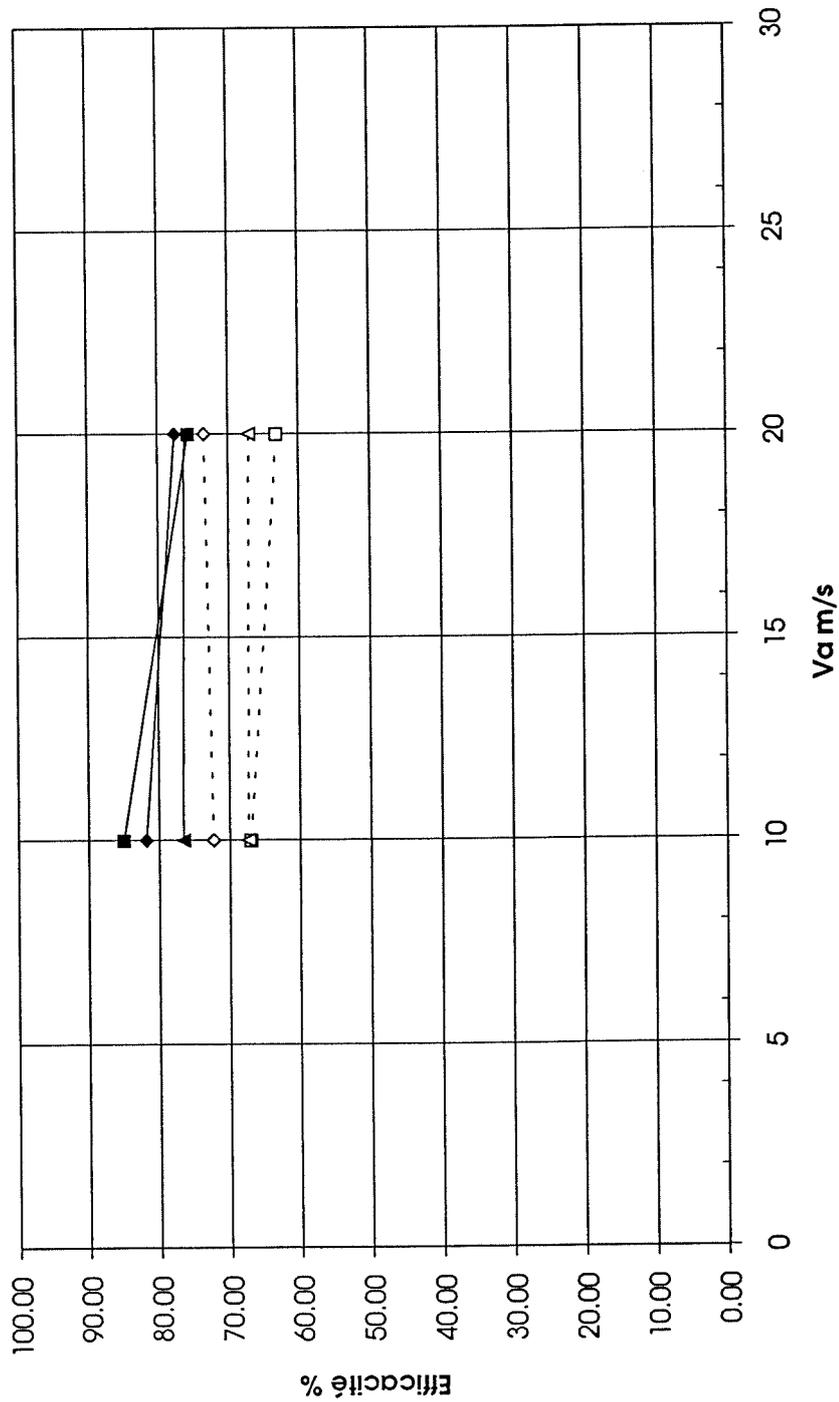


Figure 8

5.3 - Influence de la forme des trappes

Les essais portant sur l'influence de la forme des trappes ont été réalisés sur la maquette CETU pour les configurations P 1/2, P 1/3 et Lsym. Les résultats obtenus sont reportés sur la figure 9.

Pour ces essais, il s'agissait de faire varier à section des trappes constante, la largeur de celles-ci pour les configurations en plafond, et la longueur de celles-ci pour les configurations latérales.

Pour la configuration P 1/2, la fente continue de même section a été considérée comme cas extrême de distorsion.

A partir de la figure 9, on peut faire les constatations suivantes :

- la forme joue peu sur le résultat pour Lsym,
- la forme ne joue pas du tout sur le résultat P 1/2 et P 1/3 si on compare une trappe de 2 m x 1 m et une trappe de 4 m x 0,5 m,
- le cas extrême d'une fente continue joue en revanche sur le résultat puisqu'entre une trappe de 4 m x 0,5 m et une trappe de 8 m x 0,25 m, l'efficacité passe de 84 % à 91 %.

En conclusion, si on reste dans des formes relativement compactes, la forme n'a pas ou peu d'influence sur l'efficacité . Toutefois, on préférera des trappes ayant leur plus grande dimension dans le sens transversal du tunnel pour les trappes en plafond, et dans le sens longitudinal du tunnel pour les trappes latérales. Ce résultat n'est guère surprenant mais méritait d'être vérifié et surtout quantifié.

Maquette CETU
4 x 20 m3/s - Va = 10 m/s - P2 - 250 °C
Influence de la forme
Efficacité totale = f(Largeur)

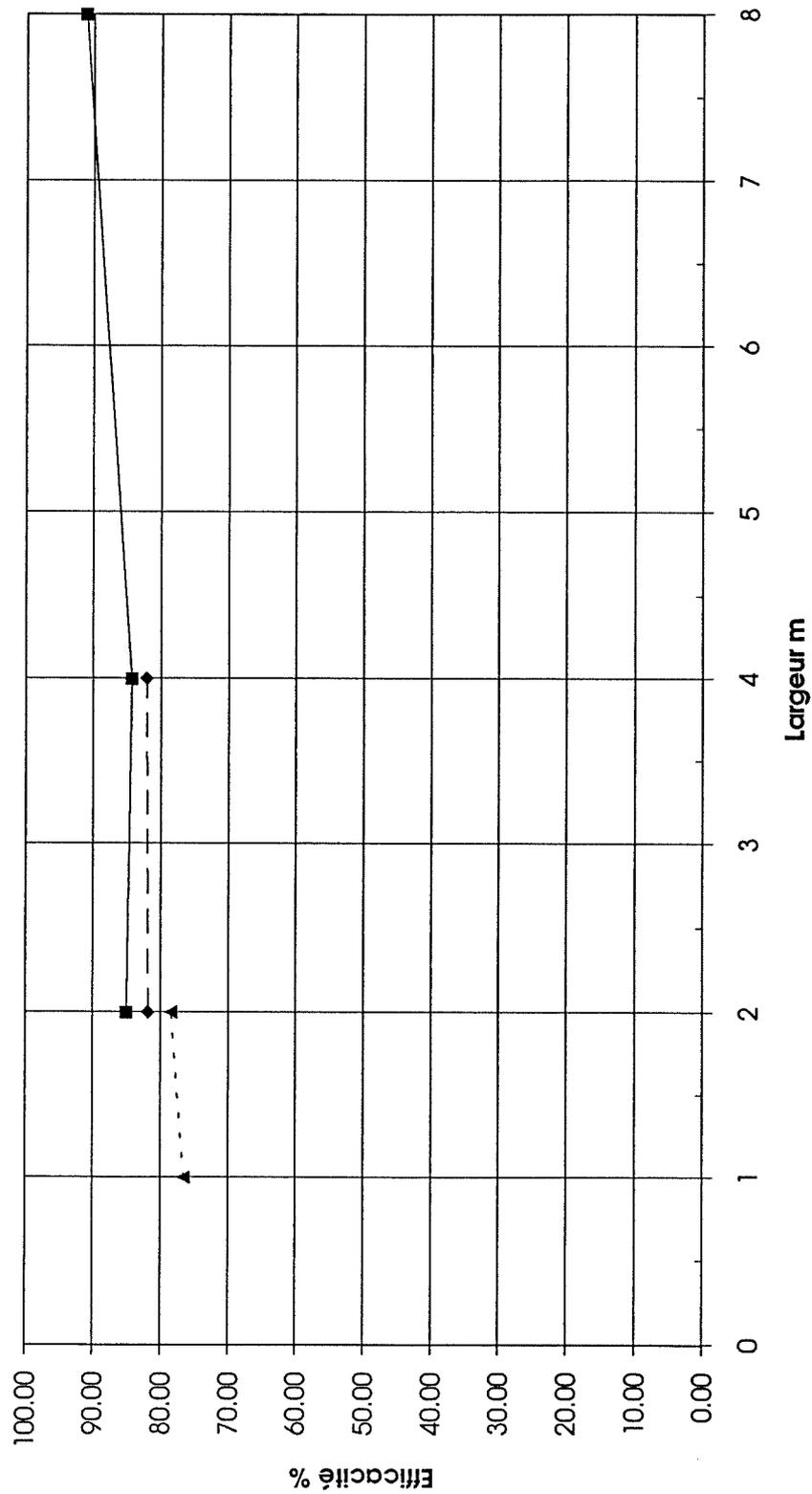
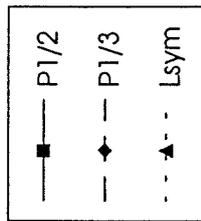


Figure 9



5.4 - Influence de la configuration des trappes

Les essais portant sur l'influence de la configuration des trappes ont été réalisés dans les conditions suivantes :

- pour la maquette EPAD avec poutrelles ou plafond lisse : 4 aspirations de 11 m³/s, une vitesse d'aspiration de 5,5 m/s (soit une section de trappes de 2 m²), et une température de 250 °C pour les panaches P1 et P2 ;
- pour la maquette CETU : trappes de 2 m² de section, un seul panache P2 à 250 °C et 2 distributions de l'aspiration 4 x 20 m³/s (donc vitesse d'aspiration de 10 m/s) et 2 x 40 m³/s (vitesse d'aspiration 20 m/s).

Les résultats obtenus sont reportés sur les figures 10 et 11 pour les essais EPAD et sur la figure 12 pour les essais CETU.

Pour la maquette EPAD avec poutrelles, on obtient, de la meilleure à la moins bonne configuration, le classement suivant : V 1/2, V 1/3 2/3, H 1/2 et H 1/3 2/3. La tendance est à peu près la même pour les deux panaches P1 et P2. On notera cependant que les différences de performances entre V 1/3 2/3, H 1/3 2/3, H 1/2, P 1/3 2/3 et P 1/2 ne sont pas très grandes.

Pour la maquette EPAD avec plafond lisse, on obtient, toujours de la meilleure à la moins bonne configuration, le classement suivant : P 1/3 2/3, P 1/2, Lsym et Ldissym. Là encore, la même tendance est observée pour les deux panaches P1 et P2.

Ces essais ont été décisifs pour arrêter le choix de la configuration du système de désenfumage de la future autoroute A.14. En effet, les gaines de ventilation étant latérales, le choix se situait entre une aspiration latérale (Lsym et Ldissym) et une aspiration avec carneaux (V 1/3 2/3, V 1/2, H 1/3 2/3 ou H 1/2). La différence de performances étant nette entre les aspirations latérales et les autres configurations, le choix d'une aspiration avec carneaux s'est imposé de toute évidence, même si on sait d'après les essais préliminaires sur les panaches que les carneaux apparents tendent à favoriser la déstratification .

Pour la maquette CETU, si on élimine de la classification la configuration P 1/2, on obtient, de la meilleure à la moins bonne configuration, le classement suivant : fente continue, P 1/4 1/2 3/4, P 1/3 2/3, P 1/3, Lsym et Ldissym. La tendance est la même pour les deux distributions de l'aspiration 4 x 20 m³/s et 2 x 40 m³/s.

Comme indiqué précédemment, on peut à nouveau constater sur ces essais le comportement atypique de la configuration P 1/2, dont les performances sont meilleures que celles de la configuration P 1/3 pour la distribution de l'aspiration 4 x 20 m³/s, et moins bonnes que celles de la configuration Lsym pour la distribution de l'aspiration 2 x 40 m³/s. Bien qu'ayant réalisé des contrôles sur la configuration P 1/2, aucune explication physique valable n'a pu être avancée pour expliquer ce phénomène.

Si les essais réalisés sur la maquette CETU permettent de tirer des enseignements sur la disposition transversale des trappes, ils donnent aussi des indications quant à la distribution longitudinale des points d'aspiration à débit total aspiré identique.

En effet, on constate que la courbe 4 x 20 m³/s se situe toujours au-dessus de la courbe 2 x 40 m³/s, par conséquent il apparaît préférable de distribuer l'aspiration en quatre points plutôt que de la concentrer en deux points. Il est vrai que dans ces essais, le maintien d'une vitesse d'aspiration constante aurait été préférable à celui de la section, ce dernier paramètre étant sans doute moins pertinent.

L'influence du nombre de sections d'aspiration sera étudiée plus en détail au § 5.6.

Maquette EPAD avec poutrelles
4 x 11 m³/s - V_a = 5,5 m/s - 250 °C
Influence de la configuration des trappes
Efficacité totale = f(Configuration)

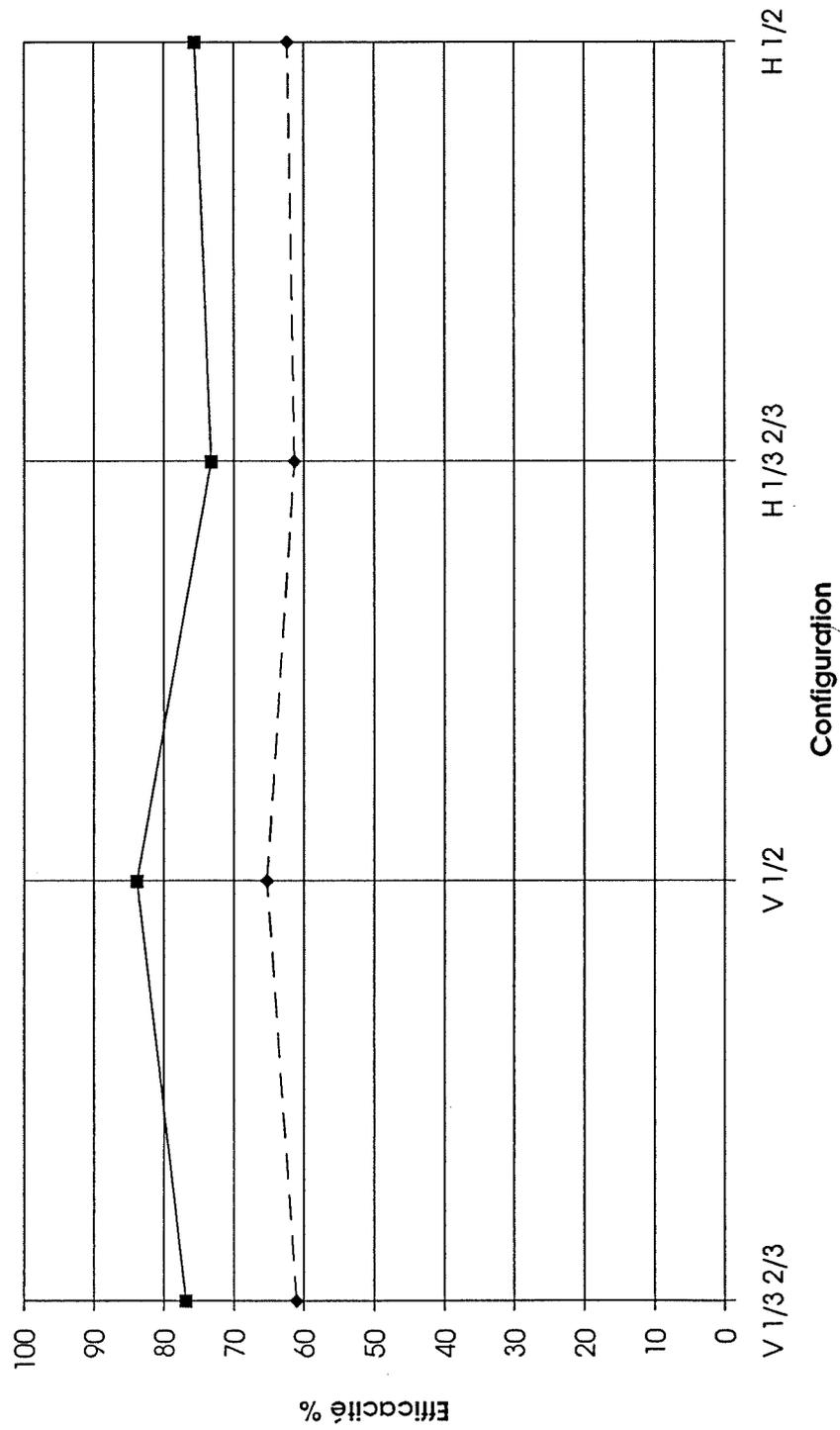
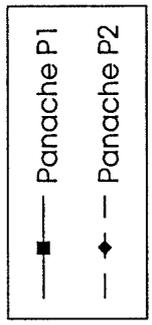


Figure 10



Maquette EPAD plafond lisse
4 x 11 m³/s - Va = 5,5 m/s - 250 °C
Influence de la configuration des trappes
Efficacité totale = f(Configuration)

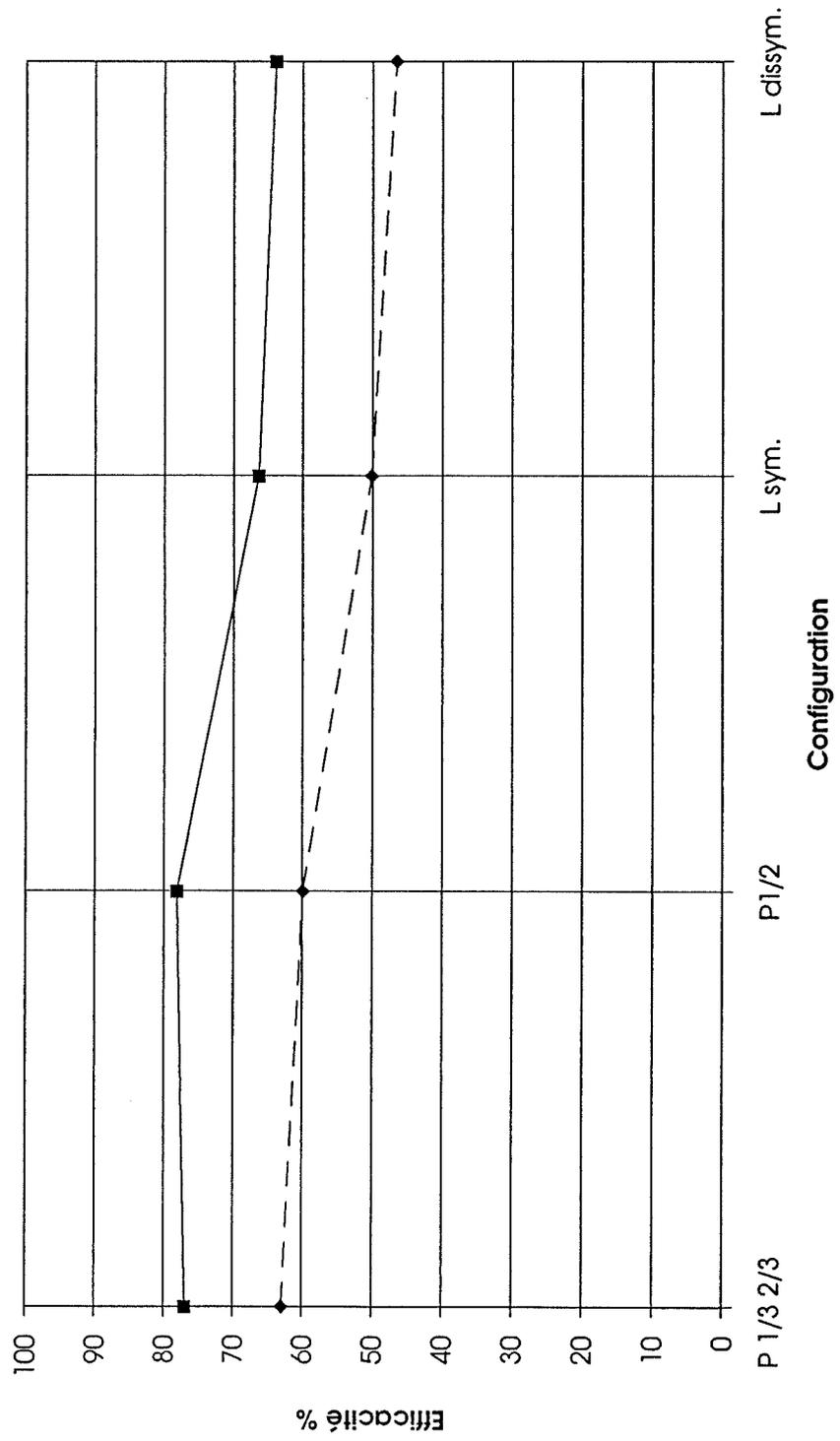
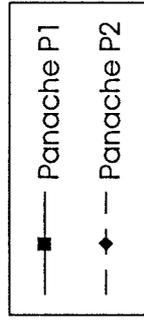


Figure 11



Maquette CETU
Sa = 2 m2 - P2 - 250 °C
Influence de la configuration des trappes
Efficacité totale = f(Configuration)

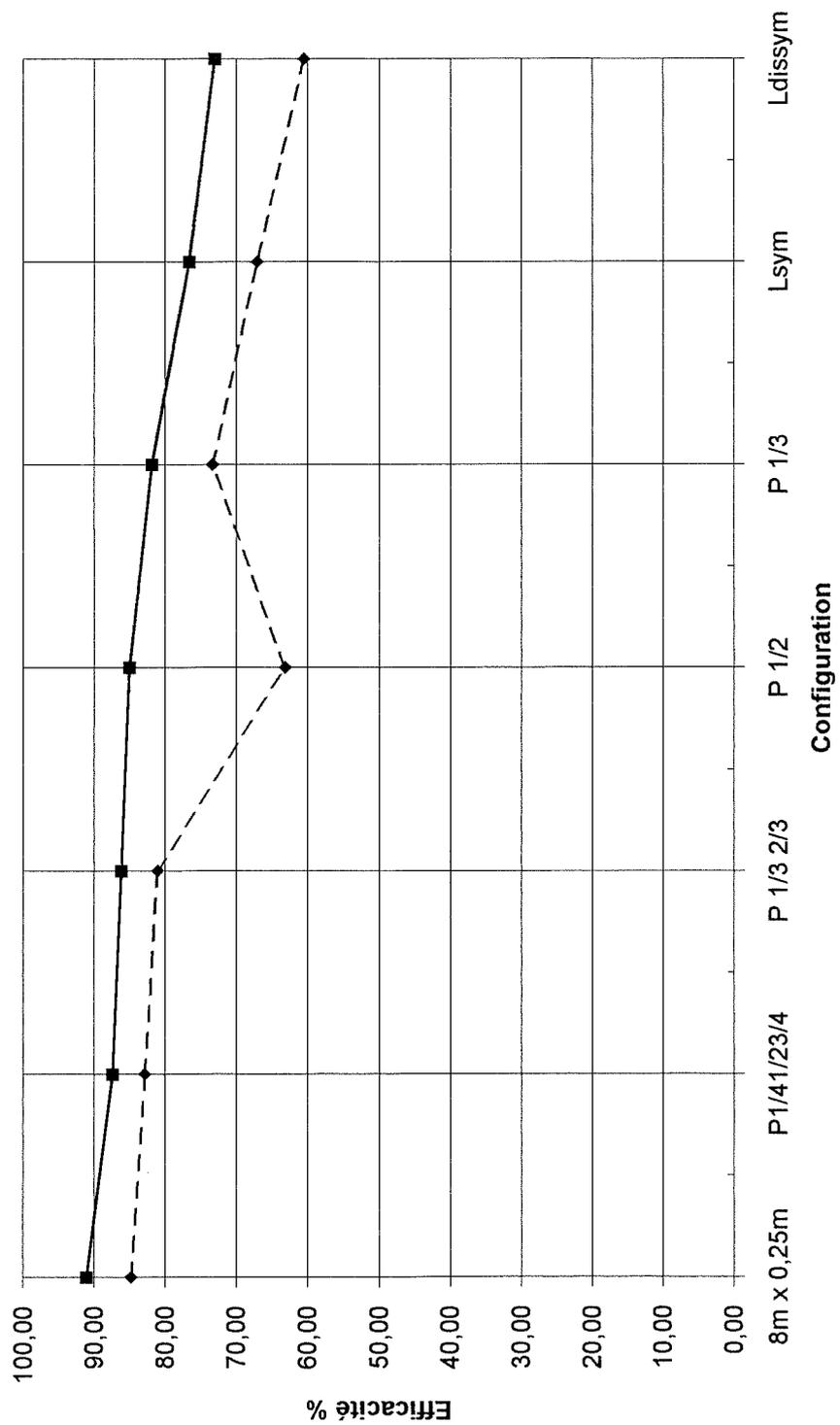
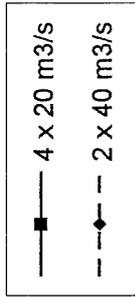


Figure 12



5.5 - Influence du débit total d'aspiration

Les essais portant sur l'influence du débit total d'aspiration ont été réalisés :

- pour la maquette EPAD sur la configuration V 1/3 2/3 avec poutrelles et sur les configurations P 1/2 et Lsym avec plafond lisse ;
- pour la maquette CETU sur les configurations P 1/3 et Ldissym.

Les résultats obtenus sont reportés sur les figures 13 à 17 pour une analyse globale de l'efficacité de l'ensemble du système.

Pour les deux maquettes, on constate que l'efficacité totale croît avec le débit total d'aspiration jusqu'à atteindre une valeur limite à laquelle elle semble plafonner.

Sur la maquette EPAD, les résultats sont les suivants :

- Configuration V 1/3 2/3 avec poutrelles : l'efficacité totale plafonne à 80 % à partir de 40 m³/s pour le panache P1 et de 80 m³/s pour le panache P2.
- Configuration P 1/2 avec plafond lisse : l'efficacité totale plafonne à 80 % à partir de 40 m³/s ou moins pour le panache P1 ; pour le panache P2, les deux essais permettent seulement de conclure qu'un plafond n'est pas atteint pour 40 m³/s et que l'efficacité atteint 75 % pour 80 m³/s.
- Configuration Lsym avec plafond lisse : pour à peu près le même palier d'efficacité de 80 %, on constate qu'il faut doubler les débits d'aspiration par rapport aux configurations précédentes.

Sur la maquette CETU, les résultats sont les suivants :

- Configuration P 1/3 : l'efficacité totale est déjà de 85 % pour 40 m³/s et plafonne à 90 % à partir de 80 m³/s pour le panache P1 ; elle continue de croître lentement au-dessus de 80 % à partir de 80 m³/s pour le panache P2. Une tendance similaire à celle du panache P2 est constatée pour le panache P4 mais pour des débits doubles.
- Configuration Ldissym : avec les débits testés, les paliers d'efficacité n'ont été atteints ni pour le panache P2, ni pour le panache P4. Comme sur la maquette EPAD avec Lsym, il faut des débits supérieurs pour atteindre les mêmes efficacités que la configuration P 1/3. On notera cependant que pour le panache P4, l'efficacité obtenue avec un débit de 160 m³/s est très voisine de celle obtenue avec le même débit sur la configuration P 1/3.

En résumé, on obtient pour tous les cas de trappes en plafond une efficacité de l'ordre de 80 % dès que le débit d'aspiration total atteint le débit de fumées majoré d'environ un tiers (dès 40 m³/s pour P1, 80 m³/s pour P2, 160 m³/s pour P4). Pour les aspirations latérales, les résultats sont moins systématiques :

- dans le tunnel large de l'EPAD, l'aspiration simultanée sur les deux côtés demande des débits d'aspiration doublés pour atteindre la même efficacité qu'en plafond,

- dans le tunnel étroit du CETU, l'aspiration d'un seul côté donne à peu près les mêmes résultats qu'en plafond pour le panache P4, alors que les débits d'aspiration doivent être majorés d'environ 50 % pour obtenir la même efficacité avec le panache P2.

Pour mieux comprendre les situations où on constate un plafonnement de l'efficacité, une analyse plus détaillée peut être faite à partir d'un examen de l'efficacité relative de chaque section d'aspiration, définie comme on l'a vu comme le rapport du volume de fumées aspirées pour la section sur le volume total de fumées restant dans le tunnel juste avant cette section.

Pour la première section (C1) l'efficacité relative croît toujours avec le débit d'aspiration. La deuxième section (C2) a un comportement plus ou moins proche selon les cas. En revanche, la troisième (C3) et surtout la quatrième section (C4) ont une efficacité relative qui chute quand le débit d'aspiration croît : non seulement il y a moins de fumées qui parviennent jusque là, les premières sections en aspirant davantage, mais en outre les dernières sections n'en reprennent qu'une proportion plus faible. La baisse d'efficacité des dernières sections compense presque exactement l'augmentation d'efficacité des premières au-delà d'un certain débit d'aspiration. Ce n'est pas le cas pour la maquette EPAD en configuration Lsym où toutes les sections voient leur efficacité relative augmenter avec le débit d'aspiration et où on ne constate pas de plafonnement (pour les valeurs de débit testées).

En ce qui concerne le rendement brut du système, on constate que celui-ci décroît toujours lorsque le débit d'aspiration augmente, ce qui n'est guère surprenant mais prouve aussi qu'on ne peut jamais éviter d'entraîner de l'air pur en même temps qu'on aspire les fumées.

On notera qu'aucun des essais réalisés, y compris ceux à très forts débits, n'a permis d'atteindre une efficacité globale proche de 100 %, avec d'ailleurs des paliers d'efficacité différents sur la maquette EPAD et sur la maquette CETU.

Notons pourtant que certains essais comportent une aspiration supérieure à ce qui est injecté à l'entrée du tunnel (air frais + fumées) et entraînent donc une entrée d'air frais par l'autre extrémité du tunnel d'essai. C'est le cas des essais suivants :

- EPAD : essais avec le panache P1 et débit d'aspiration total supérieur à 55 m³/s
- CETU : essais avec le panache P1 et débit d'aspiration total supérieur à 45 m³/s
essais avec le panache P2 et débit d'aspiration total supérieur à 110 m³/s

On reviendra plus loin sur ce constat, a priori surprenant.

En conclusion et même si les paliers atteints pour l'efficacité totale peuvent sembler un peu faibles, on retiendra qu'il est intéressant d'augmenter le débit total d'aspiration, mais qu'il existe une limite à partir de laquelle il devient inutile d'aspirer davantage tant les gains d'efficacité deviennent petits, voire nuls.

Maquette EPAD avec poutrelles
V 1/3 2/3 - 4 x 0.5 m² - 250 °C
Aspiration 4 x 50 m
Influence du débit total aspiré
Efficacité totale = f(Q_{total aspiré})
Rendement brut = f(Q_{total aspiré})

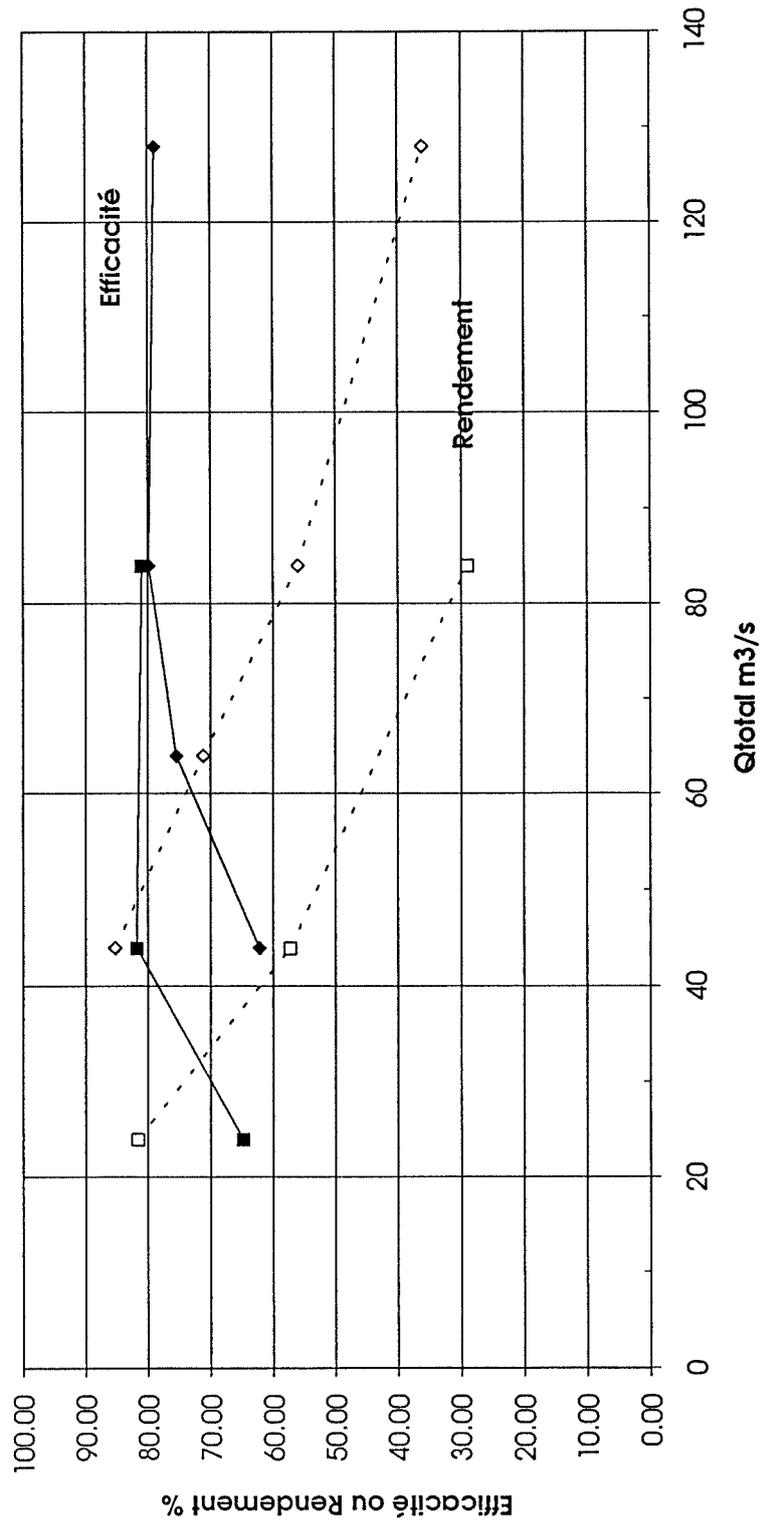
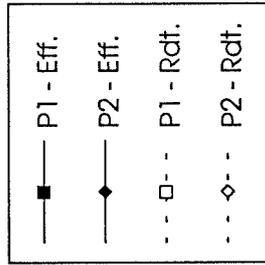


Figure 13



Maquette EPAD plafond lisse
 P1/2 - 2.0 m2 - 250 °C
 Aspiration 4 x 50 m
 Influence du débit total aspiré
 Efficacité totale = f(Qtotal aspiré)
 Rendement brut = f(Qtotal aspiré)

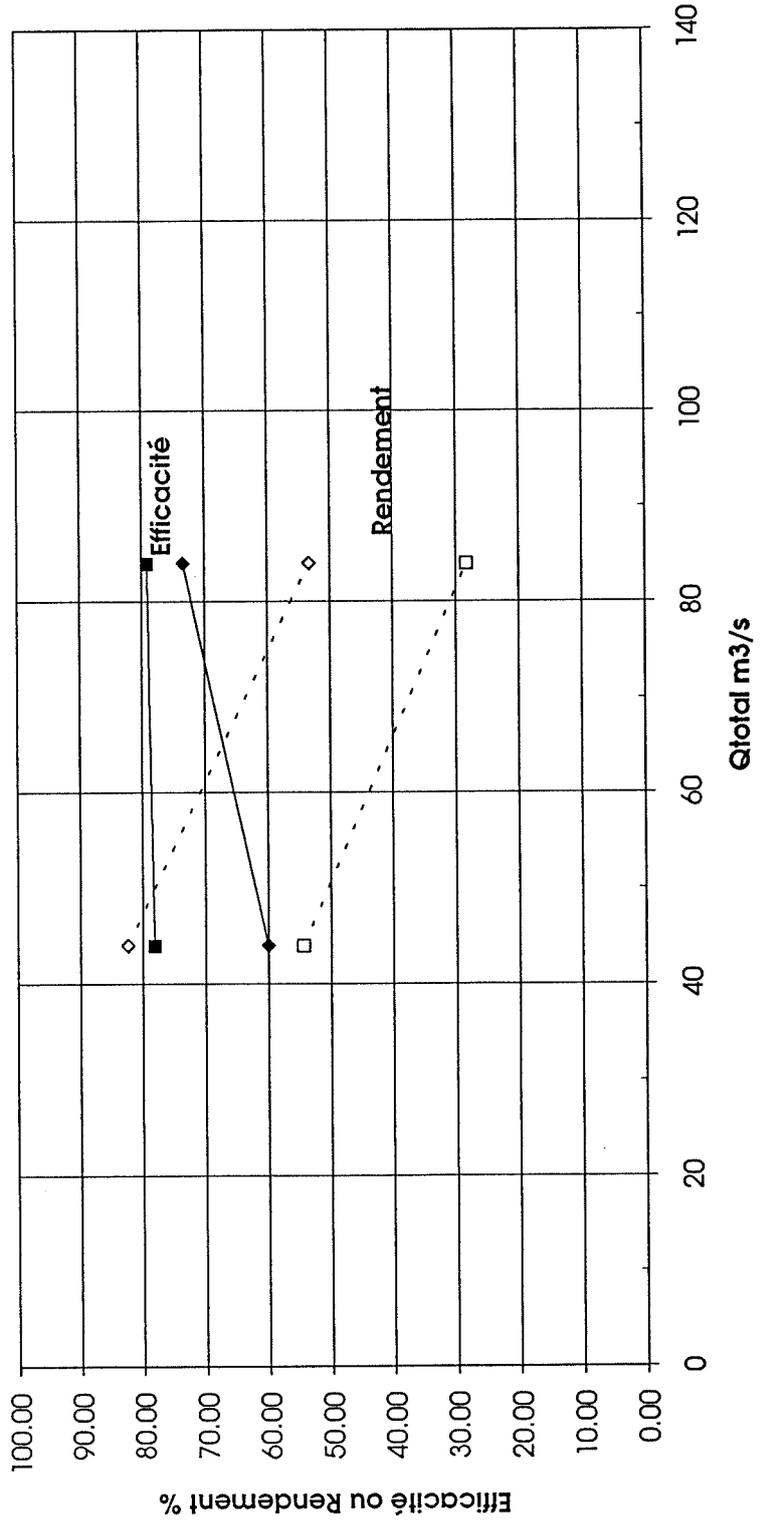
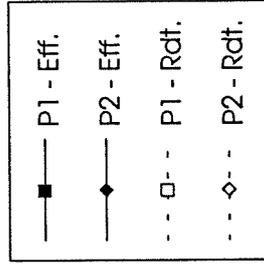


Figure 14



Maquette EPAD plafond lisse
 Lsym - 2.0 m2 - 250 °C
 Aspiration 4 x 50 m
 Influence du débit total aspiré
 Efficacité totale = f(Qtotal aspiré)
 Rendement brut = f(Qtotal aspiré)

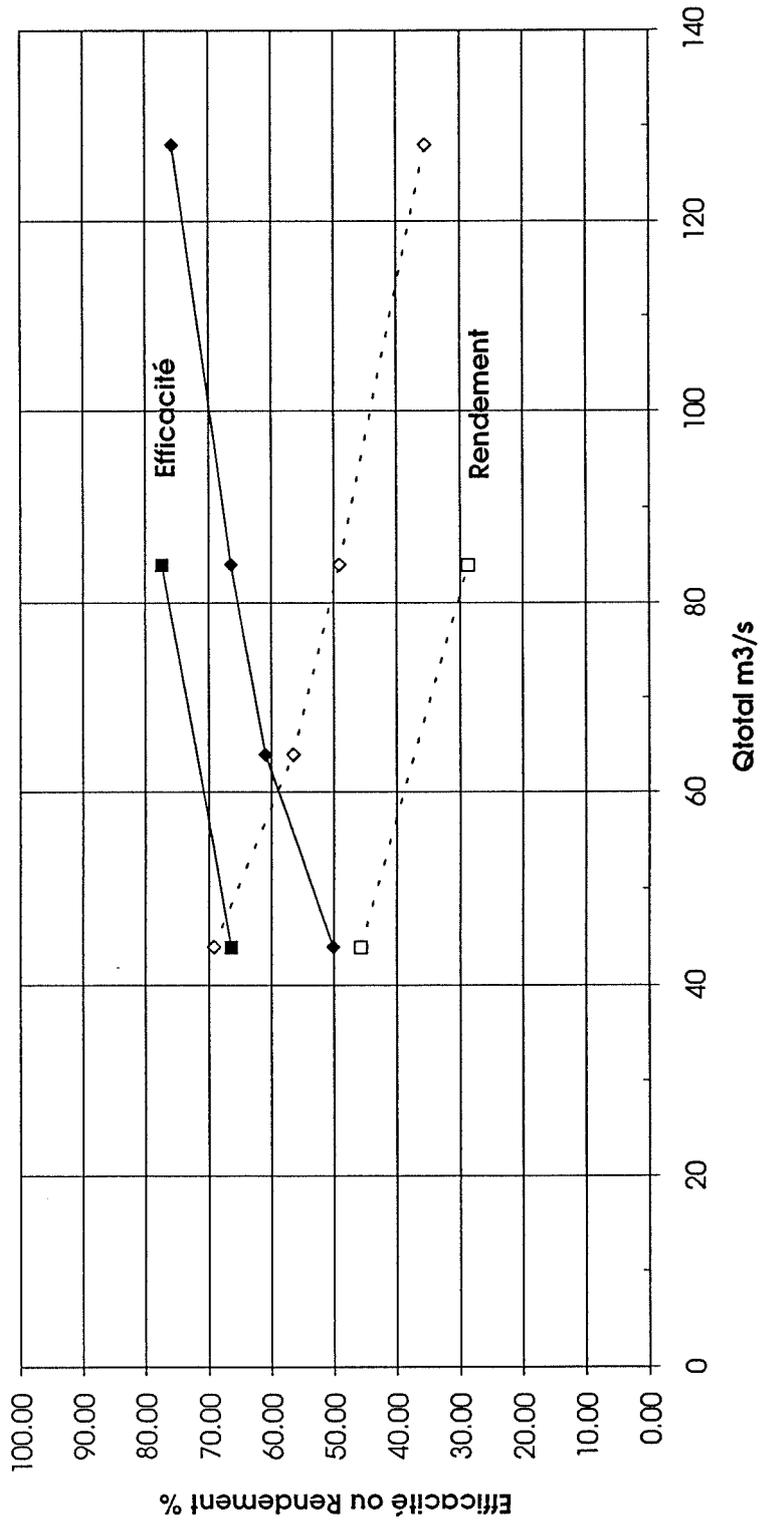
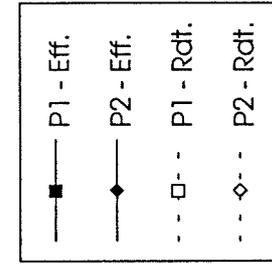


Figure 15



Maquette CETU
P1/3 - $V_a = 10 \text{ m/s} - 250 \text{ °C}$
Aspiration 4 x 50 m
Influence du débit total aspiré
Efficacité totale = $f(Q_{\text{total aspiré}})$
Rendement brut = $f(Q_{\text{total aspiré}})$

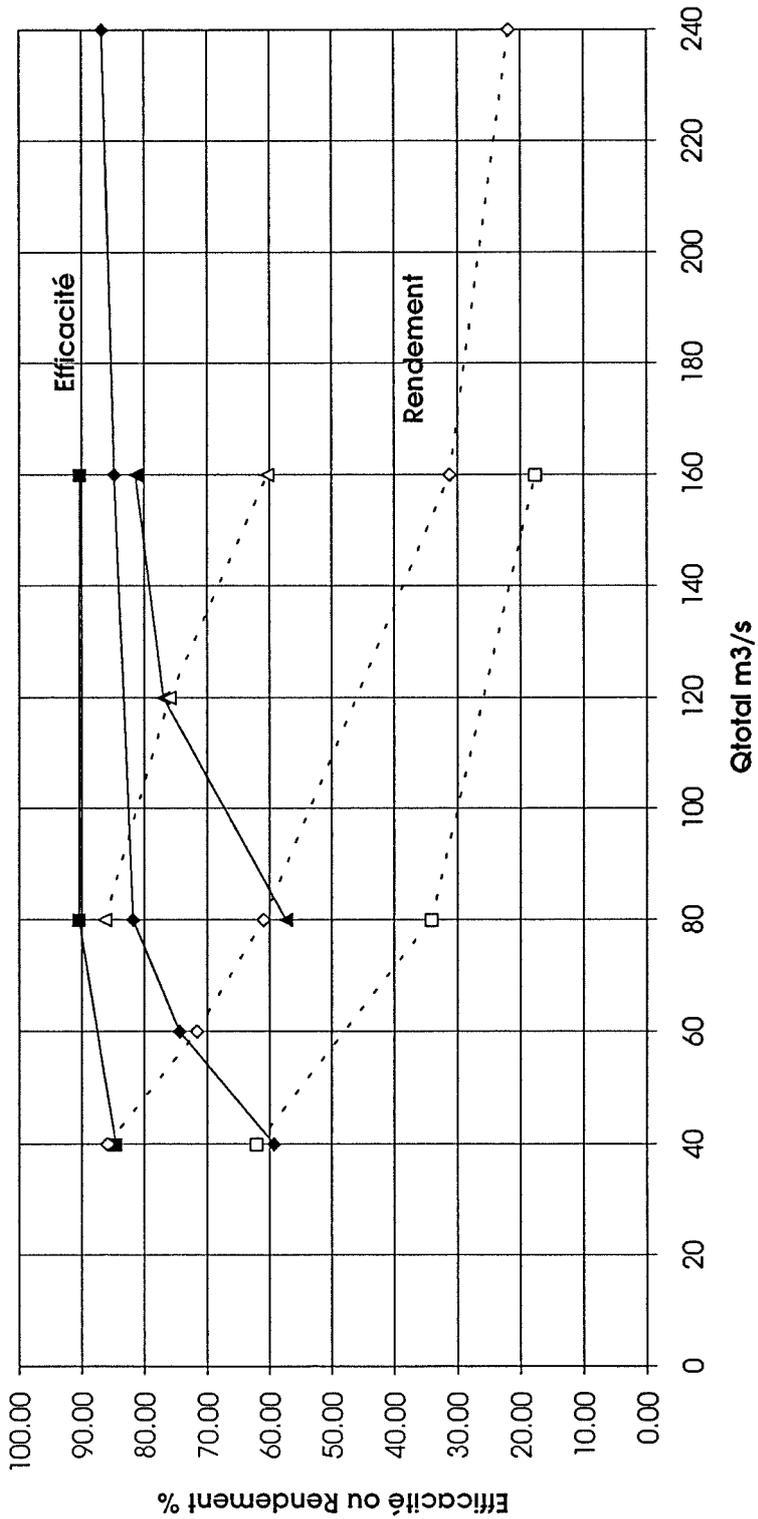
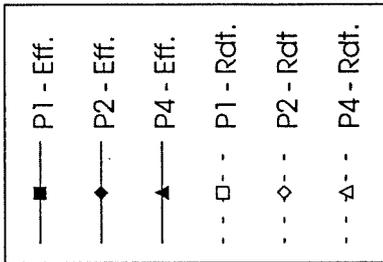


Figure 16



Maquette CETU
Ldissym - Sa = 2 m2 - 250 °C
Aspiration 4 x 50 m
Influence du débit total aspiré
Efficacité totale = f(Qtotal aspiré)
Rendement brut = f(Qtotal aspiré)

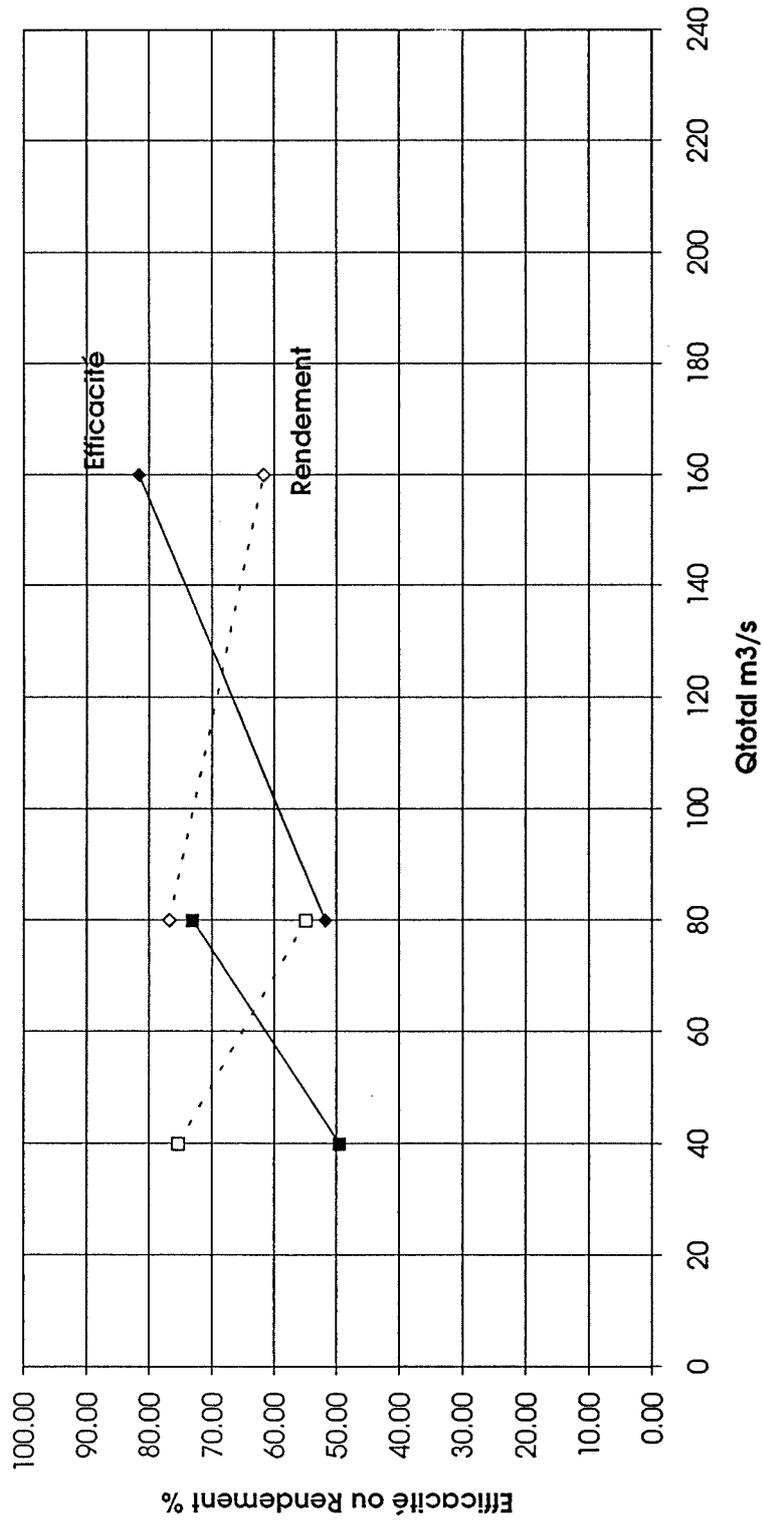
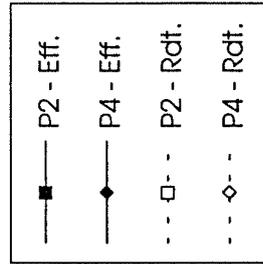


Figure 17



5.6 - Influence du nombre de points d'aspiration

Sur la maquette CETU, plusieurs essais ont été réalisés en faisant varier le nombre de sections d'aspiration, ce qui permet deux analyses :

- pour un même débit d'aspiration Q_c par section, la comparaison des résultats des deux premières trappes pour des essais réalisés avec un nombre de sections d'aspiration N_c et $2N_c$ donne une information sur l'influence de l'espacement longitudinal ; c'est le cas des essais réalisés avec $2 \times Q_c$ et $4 \times Q_c$;
- pour un débit total aspiré Q_{total} identique mais réparti sur un nombre plus ou moins grand de sections d'aspiration, les essais donnent une information sur l'influence du nombre de points d'aspiration.

La première analyse qui porte sur les efficacité locales montre que, dans la plupart des cas, les résultats obtenus pour les deux premières sections d'aspiration sont peu différents que celles-ci soient espacées de 100 m ou de 50 m (et suivies, dans ce dernier cas seulement, par deux autres sections d'aspiration).

Ce résultat permet d'interpréter avec un seul essai à $4 \times Q_c$, ce que donnerait $3 \times Q_c$, $2 \times Q_c$ ou $1 \times Q_c$. Il permet aussi de dire qu'à débit d'aspiration Q_c par section identique, la distance entre deux sections successives ne joue pratiquement pas sur le résultat tout au moins entre 50 et 100 m, seules les valeurs testées. Cette constatation est apparue intéressante pour limiter le nombre d'essai à réaliser. Elle laisse en outre penser qu'il ne serait pas absurde d'extrapoler les résultats obtenus pour une longueur d'aspiration de 250 m (cas du milieu urbain) à une longueur plus grande, voire même jusqu'à 500 m (tunnels interurbain), sous réserve que la stratification se maintienne sur cette distance.

La deuxième analyse a des conséquences pratiques immédiates car elle correspond à la conclusion déjà énoncée au paragraphe 5.4 sur l'intérêt de multiplier le nombre de points d'aspiration plutôt que de concentrer tout le débit en un nombre réduit de points.

Les résultats obtenus pour différents panaches de fumée, différents débits d'aspiration et pour les configurations P 1/3 et Ldissym sont présentés sur les figures 18 et 19. En outre, la figure 12 du paragraphe 5.4 donne des résultats similaires pour toutes les configurations testées.

On constate globalement qu'il y a effectivement intérêt à répartir le débit total aspiré en plusieurs points, mais on constate aussi que cela semble dépendre du panache de fumée testé. L'influence du panache de fumée est particulièrement nette pour les essais réalisés avec la configuration P 1/3 :

- pour le panache P1, plus on augmente le nombre de points d'aspiration, meilleure est l'efficacité totale ;
- pour le panache P2, on obtient dans un cas ($Q_a = 40 \text{ m}^3/\text{s}$) un comportement similaire, mais avec des variations beaucoup plus faibles ; dans l'autre ($Q_a = 80 \text{ m}^3/\text{s}$) une seule section d'aspiration conduit à une meilleure efficacité que deux sections d'aspiration mais à une moins bonne efficacité que quatre sections ;
- pour le panache P4, il n'y a aucune différence entre une et quatre sections d'aspiration.

La différence de comportement des différents panaches peut sans doute être rapprochée du fait que pour P1 et le deuxième cas de P2 ($Q_a = 80 \text{ m}^3/\text{s}$), les essais sont faits avec un débit d'aspiration dépassant d'un tiers le débit des fumées et qu'on atteint ainsi le "plafond d'efficacité" (cf. § 5.5). Le nombre de sections d'aspiration a alors une influence. En revanche, le premier cas de P2 ($Q_a = 40 \text{ m}^3/\text{s}$) et celui de P4 mettent en jeu un débit d'aspiration inférieur d'un tiers au débit de fumées : ceci explique le niveau modeste de l'efficacité (entre 50 et 60 %) et joue sans doute sur le peu d'influence du nombre de sections d'aspiration, du fait que dans les deux cas il reste en sortie de tunnel 40 % des fumées.

Il a paru intéressant de vérifier que les phénomènes étaient semblables sur la maquette EPAD. Comme il n'y avait pas eu d'essais avec seulement une ou deux sections de trappes en fonctionnement, on a comparé pour un débit total Q_a donné l'efficacité de quatre sections aspirant chacune $Q_a/4$ avec celle des deux premières sections de l'essai réalisé pour le débit total $2Q_a$, où chaque section aspire $Q_a/2$. Une certaine incertitude est ainsi introduite mais elle devrait être faible comme on l'a indiqué au début du présent paragraphe 5.6. La tendance est toujours à une meilleure efficacité avec quatre sections d'aspiration qu'avec deux, mais la différence est très faible dans le cas avec poutrelles et trappes verticales. Elle est un peu plus nette pour L_{sym} et très marquée dans le cas P 1/2, y compris avec un débit de seulement $44 \text{ m}^3/\text{s}$ pour P2. Notons toutefois qu'alors que les essais CETU décrits ci-dessus ont été faits à vitesse d'aspiration constante, ceux sur la maquette EPAD l'ont été à section constante : à l'effet du nombre de trappes s'ajoute ainsi celui (certainement peu important) d'une vitesse d'aspiration plus faible.

En conclusion, nous retiendrons qu'il y a intérêt à multiplier le nombre de points d'aspiration, tout en sachant qu'il y a une limite à ne pas dépasser, car ce raisonnement poussé à l'extrême conduirait à une aspiration répartie ; or à débit égal celle-ci s'est montrée moins efficace que le système de trappes de désenfumage en configuration P 1/3 (cf. § 5.10). Les interdistances qui ont été testées sont de 50 à 100 m pour les trappes et l'appréciation ci-dessus ne doit donc pas être extrapolée à des interdistances notablement plus faibles (15 m pour des bouches réparties d'aspiration). Il faut aussi insister sur le fait que ce sont deux concepts différents puisque les systèmes de trappes de désenfumage permettent de concentrer l'aspiration là où elle est utile grâce aux ouvertures télécommandées, ce qui n'est pas réalisable avec des systèmes classiques de petites bouches réparties (non motorisées).

Maquette CETU
P1/3 - Va = 10 m/s - 250 °C
Influence du nombre de points d'aspiration
Efficacité totale = f(Nbre points d'aspiration)

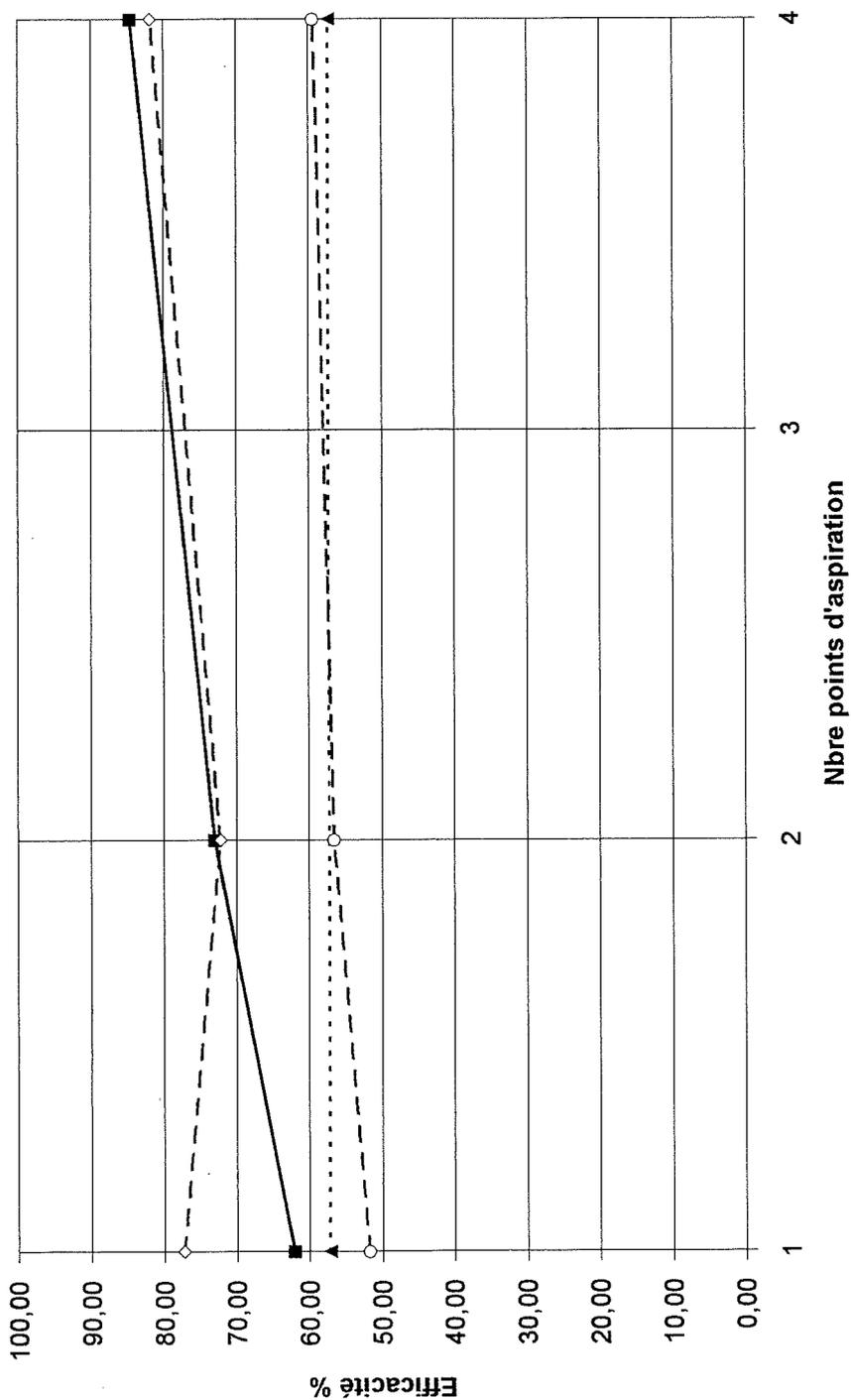
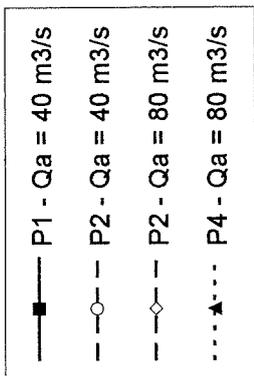


Figure 18



Maquette CETU
Ldissym - Sa = 2 m² - 250 °C
Influence du nombre de points d'aspiration
Efficacité totale = f(Nbre points d'aspiration)

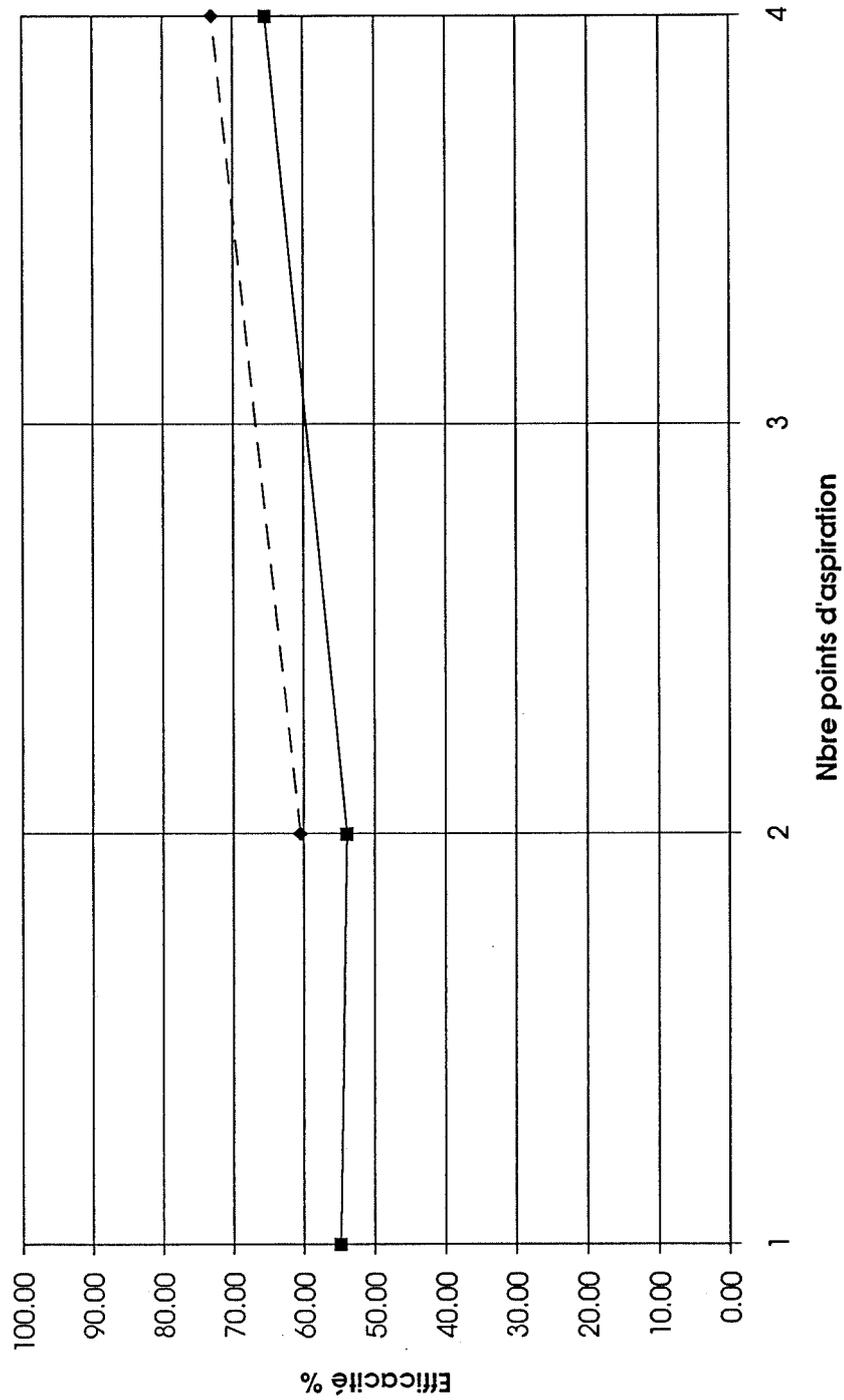
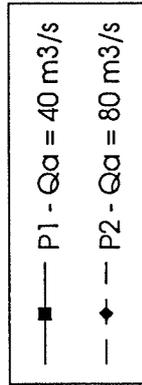


Figure 19



5.7 - Comparaison avec les données bibliographiques sur le poinçonnement

Le terme de "poinçonnement" désigne l'entraînement d'air frais à travers la couche de fumées sous l'effet d'une aspiration ponctuelle importante. Deux faits laissent penser que ce phénomène intervient au cours des essais :

- d'une part le plafonnement de l'efficacité du désenfumage lorsque le débit global d'aspiration dépasse une certaine valeur critique,
- d'autre part, la baisse d'efficacité à débit global d'aspiration constant quand on augmente le débit individuel des trappes en réduisant leur nombre.

Il est donc apparu intéressant d'examiner ce phénomène, bien que les essais n'aient pas été menés en vue de son étude et ne fournissent ainsi que des éléments partiels. Quelques données bibliographiques existant sur ce sujet, il faut commencer par les rappeler avant d'examiner si les essais les confirment ou non.

5.7.1 - Données bibliographiques

L'article de Heselden publié au congrès du BHRA à Cambridge en 1976 (référence 5) indique à ce sujet :

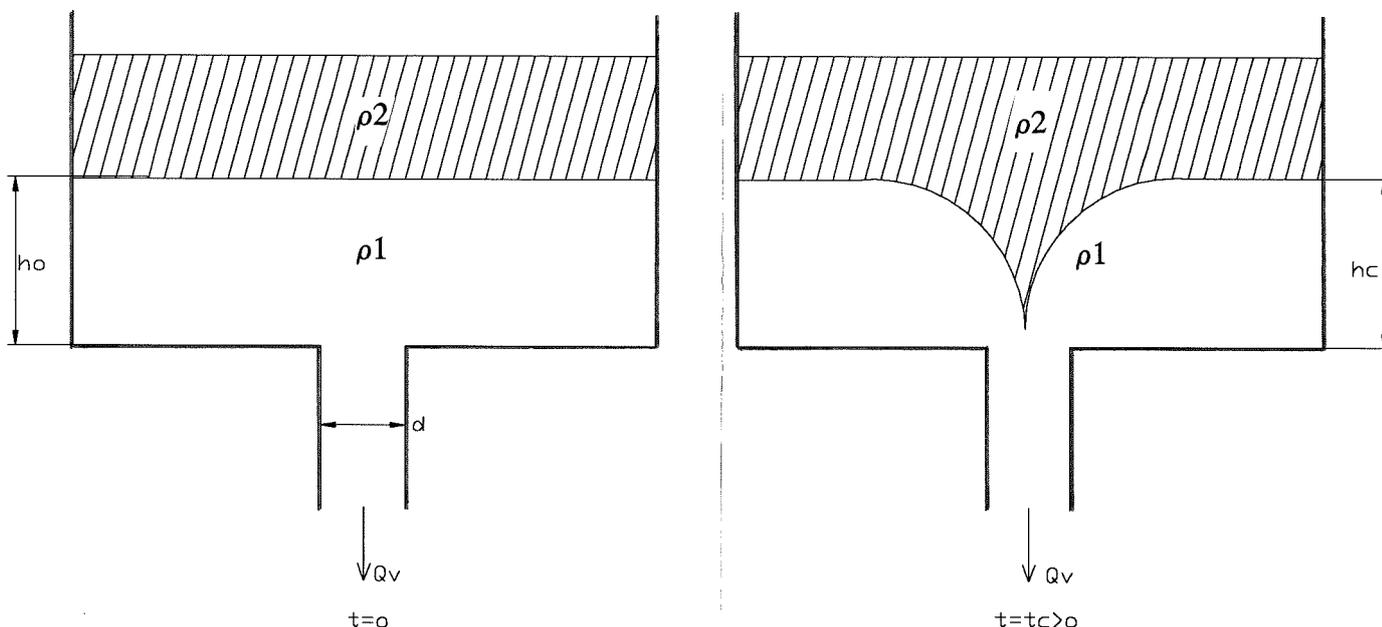
"Si on essaie d'extraire les fumées d'une couche stratifiée à un trop fort débit, alors la stratification est perturbée ; de l'air provenant de la couche inférieure est entraîné dans le conduit d'extraction et le système devient inefficace. Pour ne pas altérer la couche stratifiée, le débit d'extraction en un point éloigné des parois du tunnel doit être maintenu en dessous d'une valeur d'environ $1,7 (g \cdot h_o^5 \cdot T_o \cdot \Delta T / T_f^2)^{1/2}$ kg/s, avec g : accélération de la pesanteur, h_o : épaisseur de la couche de fumée en mètres, T_o : température ambiante en Kelvin, ΔT : température des fumées en °C et T_f : température des fumées en Kelvin".

Cette conclusion provient d'une étude sur le désenfumage d'un passage piétons couvert (référence 6), qui a donné lieu à quelques mesures en vraie grandeur et à des essais paramétriques sur une maquette au 1/7ème. Le foyer était représenté par des récipients où brûlait de l'alcool et le poinçonnement était apprécié visuellement sur une ouverture de désenfumage unique.

Il s'est avéré sur la maquette que le débit critique à partir duquel de l'air frais était entraîné dépendait peu de la forme et de la section de la trappe, mais qu'en revanche son emplacement était important : le coefficient de 1,7 semble correspondre à une ouverture de désenfumage décentrée, il devrait être majoré d'environ 40 % pour une ouverture centrée.

Notons que la formule ci-dessus provient d'un raisonnement théorique sur un équilibre entre forces d'inertie et forces de flottabilité. Il a été vérifié que les résultats expérimentaux montraient le même genre de variation, sur la maquette en ce qui concerne la dépendance en $h_o^{2,5}$, et en vraie grandeur en ce qui concerne celle en $\Delta T^{1/2} / T_f$. Dans ce dernier cas, l'évacuation des fumées se faisait sans aspiration mécanique. Aucun autre raisonnement n'a été fait quant aux similitudes entre maquette et réalité. On s'est borné à vérifier que le coefficient de la formule était peu différent dans les deux cas. Les essais sur maquette ont été réalisés à température constante et ceux en vraie grandeur avec une seule configuration de trappe. La vitesse d'écoulement des fumées était très faible à la fois sur la maquette et en vraie grandeur, en raison de la présence d'écrans verticaux transversaux sous le plafond.

La formule donnée par Heselden pour le calcul du débit massique critique d'aspiration doit être rapprochée de celle établie et vérifiée expérimentalement par Lubin et Springer (référence 10) pour un problème assez analogue concernant la vidange d'un réservoir rempli de deux liquides de densité différente.



Représentation schématique des expériences réalisés par Lubin et Springer

Dans leur article, Lubin et Springer démontrent, par un raisonnement théorique s'appuyant sur certaines hypothèses, l'existence d'une relation entre le débit volumique Q_v , la hauteur critique h_c à partir de laquelle commence le poinçonnement et les masses volumiques ρ_1 et ρ_2 des deux liquides. Ils donnent par ailleurs une série de résultats expérimentaux confirmant cette relation, mais limités à une vidange "naturelle" du réservoir, c'est à dire sous le seul effet de la gravité, sans aspiration. Ils donnent la relation suivante :

$$h_c/d = k \{Q_v^2 / [(1 - \rho_2/\rho_1) g d^5]\}^{1/5}$$

avec $k = 5/4 \times (1/2\pi^2)^{1/5} \approx 0,69$

Le diamètre d n'est introduit que pour rendre adimensionnel le résultat, mais il ne joue pas sur celui-ci. Ceci tendrait à confirmer que la vitesse d'aspiration a peu d'importance. Toutefois du fait des conditions expérimentales, le débit Q_v dépend directement de d , et l'article ne donne aucun élément pour l'extrapolation éventuelle à des situations où Q_v serait imposé par un dispositif extérieur (aspiration).

Si au début de l'expérience ($t < t_c$), on considère qu'on ne vidange que du fluide de densité ρ_1 , on peut exprimer le résultat ci-dessus en fonction du débit massique Q_m . De plus, si on assimile le fluide de densité ρ_2 à l'air ambiant du tunnel à la température T_0 , on obtient la relation suivante :

$$Q_m = 3,05 (g h_c^5 T_0 \Delta T / T_f^2)^{1/2} \text{ kg/s}$$

L'analogie entre les formules de Heselden et de Lubin et de Springer est quasi parfaite et ne diffère qu'à une constante près, celle-ci étant quand même dans un rapport voisin de 1 à 2.

Il est possible d'appliquer ces deux relations aux conditions reproduites sur les maquettes. L'épaisseur E_f de la couche de fumée étant connue pour chaque panache, les relations précédentes peuvent être transformées pour donner le débit volumique critique d'aspiration à partir duquel il doit y avoir entraînement d'air frais :

$$Q_v = \alpha (g E_f^5 \Delta T / T_0)^{1/2} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

où $\alpha = 1,4$ pour Heselden
 $\alpha = 2,5$ pour Lubin et Springer

Les tableaux suivants donnent les valeurs numériques correspondant aux différents essais qui ont été réalisés sur les maquettes.

Maquette EPAD

Panache	P1	P1	P2	P2	P2
E_f (m)	1,15	1,15	1,54	1,54	1,54
ΔT (°)	250	700	120	250	700
Q_v Helsenden (m^3/s)	6	10	8	12	20
Q_v Lubin (m^3/s)	10	17	15	21	36

Maquette CETU

Panache	P1	P1	P1	P2 et P4	P2 et P4	P2 et P4
E_f (m)	1,67	1,67	1,67	2,22	2,22	2,22
ΔT (°)	80	250	700	80	250	700
Q_v Helsenden (m^3/s)	8	15	25	17	30	50
Q_v Lubin (m^3/s)	15	26	44	30	54	90

D'après ces auteurs, le débit d'aspiration ne dépend donc que de deux paramètres :

- l'épaisseur E_f des fumées, qui joue fortement du fait de l'exposant 5/2 (débit critique variant ci-dessus de 1 à 5 entre le panache P1 sur la maquette EPAD et le panache P2 sur la maquette CETU),
- la température ΔT des durées, dont l'exposant n'est que 1/2, mais qui conduit cependant à tripler le débit critique quand on passe de 80° à 700°.

5.7.2 - Comparaison avec les résultats expérimentaux globaux

Les résultats des essais décrits aux paragraphes précédents essentiellement en termes d'efficacité ou de rendement globaux de l'ensemble du système d'aspiration, montrent-ils le même comportement ?

L'influence de l'épaisseur du panache, à température constante, semble exister, mais elle ne peut être le seul paramètre. En effet, les figures 13 à 17 (§ 5.5 ci-avant) montrent clairement que sur les deux maquettes, à débit total constant, le panache P2, plus épais d'un tiers, conduit à des rendements nettement supérieurs à ceux du panache P1. En revanche le panache P4, pourtant de même épaisseur que P2, donne des rendements encore bien supérieurs.

L'influence très faible de la température, constatée sur les deux maquettes (figures 4 et 5 au § 5.1 ci-avant), est par ailleurs en complète contradiction avec les résultats de Heselden et de Lubin. En toute rigueur, il ne faut considérer sur ce point que les essais CETU faits en configuration P 1/2, car les essais EPAD sur l'influence de la température comportaient des poutrelles. La contradiction est d'autant plus flagrante que les débits d'aspiration par trappe retenus pour les essais CETU sont au-dessus du débit critique pour la température minimale essayée (80°) et en-dessous de celui-ci pour la température maximale (700°), qu'on utilise la formule d'Heselden ou celle de Lubin et Springer. On avait en effet choisi les valeurs suivantes :

P1 : $Q_c = 20 \text{ m}^3$

P2 : $Q_c = 20 \text{ m}^3$ (seul cas où on est peut-être toujours en dessous du débit critique)

P4 : $Q_c = 40 \text{ m}^3$

Le seul point de réelle concordance entre les essais et les résultats des auteurs précités est la tendance globale à une meilleure efficacité si on diminue le débit unitaire d'aspiration à débit total constant. Notons cependant que dans les essais sur la configuration des trappes (§ 5.4 ci-avant), il apparaît que répartir dans une section d'aspiration le même débit entre une, deux ou trois trappes ne joue que faiblement sur l'efficacité globale : entre les configurations P 1/4 1/2 3/4, P 1/3 2/3 et P 1/3 l'écart d'efficacité n'est que de 5 à 10 points, sachant qu'en outre d'autres effets jouent dans le même sens (meilleur "barrage" de la section transversale par plusieurs trappes régulièrement réparties).

5.7.3 - Comparaison avec les résultats de rendement de la première trappe

Les résultats globaux des essais sont donc en contradiction avec les données bibliographiques, qui ne concernent toutefois qu'une trappe isolée. On a donc cherché à savoir si l'étude d'une seule des trappes ne permettrait pas de faire apparaître le "débit critique" étudié par les auteurs précités. Il est possible pour cela de ne considérer que la première trappe en fonctionnement dans les différents essais puisqu'on a constaté que l'influence des trappes suivantes sur celle-ci était très limitée (cf. début du § 5.6 ci-avant).

Notons tout de suite que l'influence de la température apparaît très faible : les rendements de la première section d'aspiration sont inchangés à très peu de choses près dans les différents essais réalisés à des températures variant de 80° à 700°. Il est donc possible de se limiter à la température de 250° pour laquelle a été réalisée la quasi-totalité des essais.

Les figures 19bis à 19quater présentent dans trois exemples de configurations le rendement mesuré à la première section d'aspiration en fonction du débit de celle-ci. On peut imaginer

que l'absence de poinçonnement correspond à des rendements de l'ordre de 90 à 100 %. Mettre en évidence un débit critique reviendrait à faire apparaître un palier de rendement à ce niveau suivi d'une décroissance plus ou moins brusque à partir d'un certain seuil d'aspiration. Nous avons donc essayé de relier les points expérimentaux par des droites soit horizontales, soit inclinées. Nous sommes parfaitement conscients du caractère un peu arbitraire de cette démarche, d'autant que nous ne disposons souvent que de peu de points, les essais n'ayant pas été réalisés dans ce but.

Il n'y a que deux cas, dont un très net (figure 19bis, P2) où le phénomène apparaît. Nous avons considéré que le débit correspondant à l'angle des deux droites était le débit critique à partir duquel l'air frais est entraîné. Dans tous les autres cas, les points expérimentaux sont à peu près sur une même droite, soit horizontale à des niveaux de 85 à 95 % de rendement, soit inclinée et descendante. Pour tenter une interprétation dans ces cas, nous avons considéré :

- pour une droite horizontale que le débit critique était supérieur ou égal au plus grand des débits testés,
- pour une droite inclinée qu'il correspondait grossièrement au point où cette droite croise une ligne horizontale à 90 % de rendement.

Nous avons ainsi établi le tableau ci-dessous pour les deux configurations de trappes en plafond lisse pour lesquelles nous disposons de données, ainsi que pour la configuration EPAD avec poutrelles V 1/3 2/3. Celle-ci n'est bien sûr pas comparable aux résultats des auteurs précités, mais elle présente un comportement analogue aux trappes en plafond lisse.

Maquette	Configuration	Panache	Ef (m)	Vf (m/s)	Q _{crit} biblio(*) (m ³ /s)	Q _{crit} maquette (m ³ /s)
CETU	P 1/3	P1	1,67	2	15-26	≤ 10
		P2	2,22	3	30-54	20 à 30
		P4	2,22	6	30-54	≥ 80
EPAD Plafond lisse	P 1/2	P1	1,15	2	6-10	≤ 10
		P2	1,54	3	12-21	10 à 15
EPAD Poutrelles	V 1/3 2/3	P1	1,15	2	-	≤ 10
		P2	1,54	3	-	20 à 30

(*) Cette colonne indique successivement les résultats des formules de Heselden puis de Lubin et Springer

Les conclusions ne peuvent bien sûr être que qualitatives :

1) Moyennant l'interprétation décrite ci-avant, on arrive à définir un débit critique au-delà duquel le rendement de la trappe baisse.

2) Ce débit critique est assurément lié à l'épaisseur des fumées : il est nettement plus élevé pour la maquette CETU que pour la maquette EPAD où les épaisseurs de fumée sont plus faibles dans le rapport inverse des largeurs : $9/13 = 0,7$. Le rendement de la première trappe est systématiquement plus faible dans la maquette EPAD, toutes choses égales par ailleurs. Le débit critique est également plus élevé sur les deux maquettes avec le panache P2 qu'avec le panache P1 dont l'épaisseur est plus faible d'un tiers.

Figure 19bis

Maquette CETU
 P1/3 - Va = 10 m/s - 250 °C
 Influence du débit aspiré par section
 Rendement 1ère Section = f(Qcarneau)

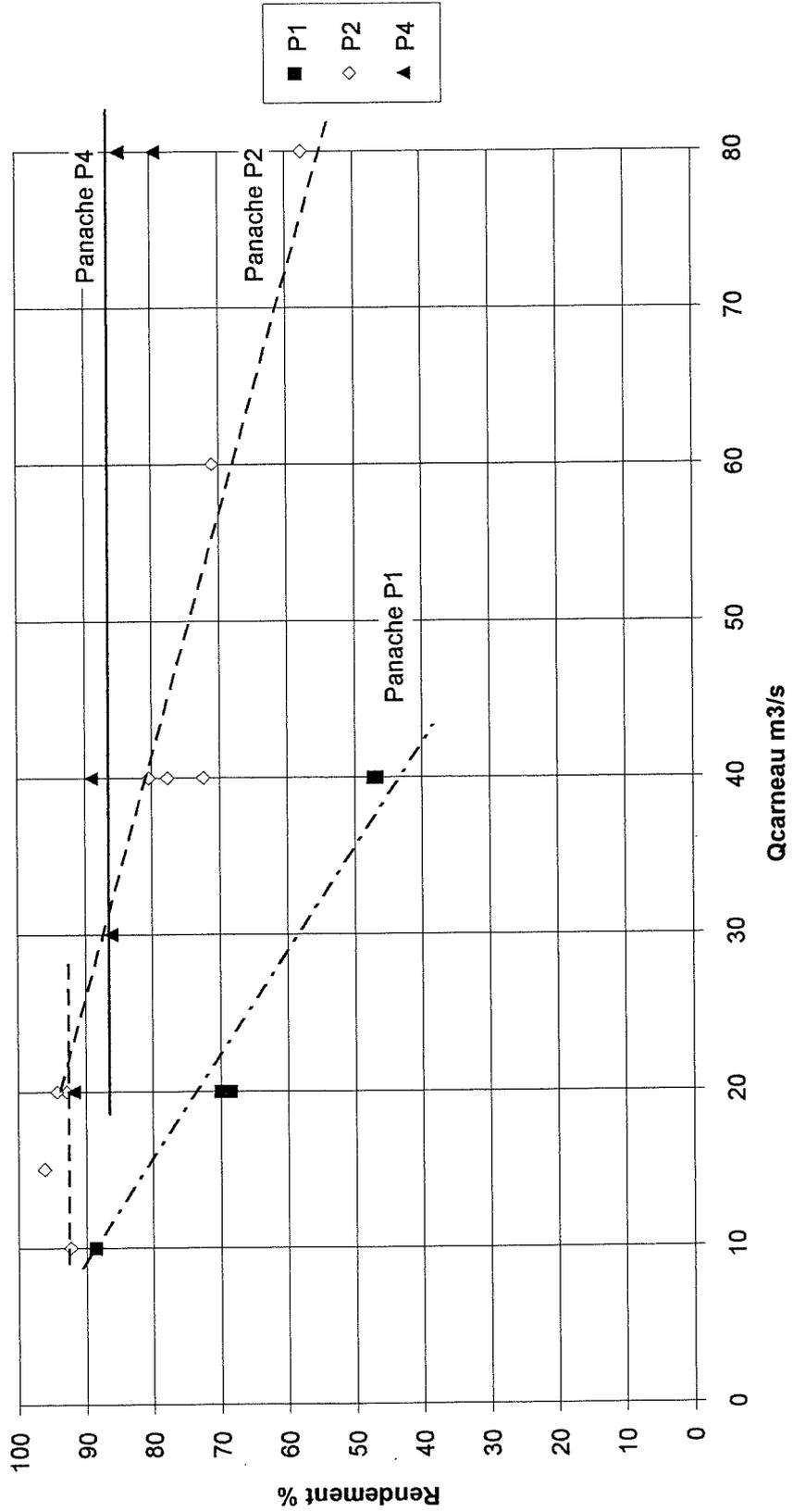


Figure 19ter

Maquette EPAD - Plafond lisse
P 1/2 - Sa = 2 m² - 250 °C
Influence du débit aspiré par section
Rendement 1ère Section = f(Qcarneau)

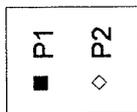
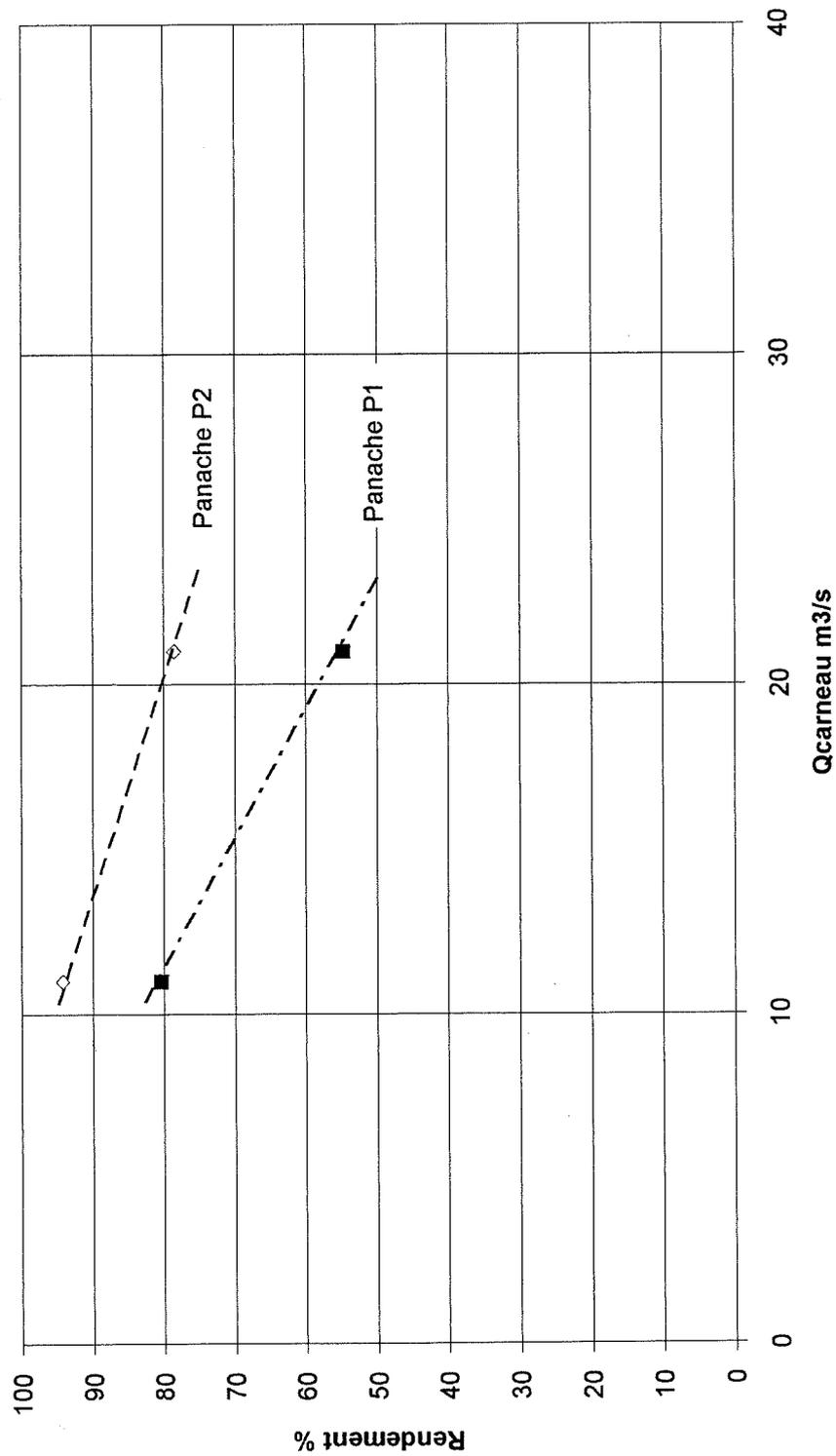
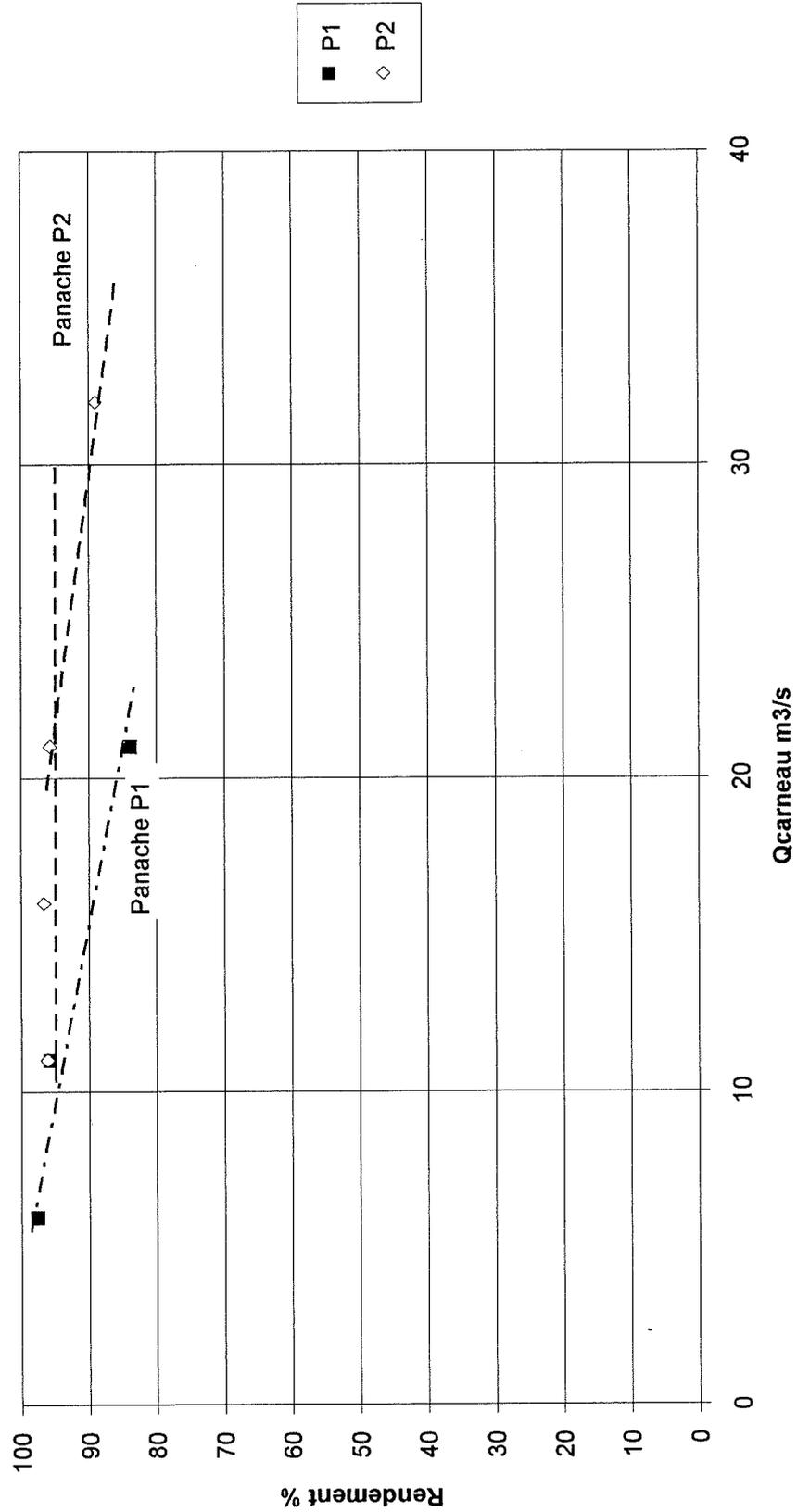


Figure 19quater

Maquette EPAD - Plafond avec poutrelles
 V 1/3 2/3 - Sa totale = 2 m² - 250 °C
 Influence du débit aspiré par section
 Rendement 1ère Section = f(Qcarneau)



3) Toutefois l'épaisseur E_f n'est pas le seul facteur explicatif car les débits testés jusqu'à 80 m³/s sur la maquette CETU n'ont pas permis de dépasser le seuil de poinçonnement pour le panache P4, alors que celui-ci est atteint vers 20 à 30 m³/s pour le panache P2, de même épaisseur. Il semble donc que la vitesse des fumées (ou leur débit) joue un rôle et que le débit critique augmente lorsque cette vitesse croît, toutes choses égales par ailleurs.

Rappelons que les données bibliographiques ont été obtenues pour des vitesses de fumées très faibles ou nulles. On peut noter que les valeurs calculées dans le tableau avec la formule de Heselden pour $\Delta T = 250^\circ$ correspondent aux ordres de grandeur constatés du débit critique avec les trappes en plafond pour les panaches P1 et P2 de vitesses modérées (2 à 3 m/s) mais pas pour P4, nettement plus rapide (6 m/s).

Pour la configuration V1/3 2/3 avec poutrelles de la maquette EPAD, les phénomènes semblent similaires. Les rendements de la première section sont toutefois augmentés par rapport à la configuration P 1/2 et plafond lisse. Les débits critiques sont ainsi du même ordre de grandeur que pour la maquette CETU et P 1/3, malgré des épaisseurs de fumée plus faibles.

Les configurations L_{sym} sur la maquette EPAD et L_{dissym} sur la maquette CETU ont également été examinées. Le rendement de la première section apparaît toujours beaucoup plus faible qu'avec les trappes en plafond et il y a donc systématiquement entraînement d'air frais dès les débits les plus faibles testés. La seule exception est le panache P4 qui ne semble pas faire intervenir de poinçonnement pour les débits testés (jusqu'à 40 m³/s).

5.7.4 - Remarque conclusive

Le développement assez long du présent paragraphe 5.7 visait à une meilleure compréhension des phénomènes, compte-tenu d'une apparente contradiction avec les articles cités.

Il ne doit en aucun cas remettre en cause les conclusions des paragraphes 5.5 et 5.6 concernant l'influence du débit global d'aspiration et de sa répartition sur l'efficacité globale de l'installation. En particulier les "débits critiques" qu'on vient d'examiner n'ont en aucun cas à être pris en considération dans les projets : ils ne concernent que la première trappe et le comportement d'ensemble du système est très différent comme le démontre justement la différence entre nos résultats et ceux de la bibliographie.

5.8 - Influence du soufflage d'air frais

Les essais portant sur l'influence du soufflage d'air frais simultané à une aspiration des fumées ont été réalisés :

- pour la maquette EPAD sur la configuration V 1/3 2/3 avec poutrelles et sur la configuration P 1/2 avec plafond lisse ;
- pour la maquette CETU sur la configuration P 1/3.

Les résultats obtenus sont reportés sur les figures 20 et 21.

Pour la maquette EPAD, le soufflage a été réalisé en partie basse comme prévu au projet, tandis que pour la maquette CETU celui-ci a été réalisé par le haut à partir de bouches disposées latéralement et simulant de manière imparfaite des jets pariétaux.

Sur la maquette EPAD, on ne constate aucune incidence du soufflage d'air frais pour le panache P2, ce qui n'est pas le cas pour le panache P1 pour lequel une diminution de l'ordre de 10 % de l'efficacité totale peut être constatée. Les résultats sont similaires pour les deux configurations testées. Il faut noter que les débits d'aspirations retenus conduisent pour le panache P1 à se situer dans le palier où l'efficacité plafonne, alors qu'on est loin en-dessous de ce palier pour le panache P2. Il apparaît par ailleurs que la température n'a pas d'effet sur ce phénomène : la "meilleure" stratification supposée avec P1 pour 700°C ne réduit pas la baisse d'efficacité due au soufflage d'air frais.

Sur la maquette CETU, l'incidence du soufflage en plafond est à peu près identique pour les trois panaches testés P1, P2 et P4. Sans être négligeable, elle ne conduit cependant pas à une réduction importante de l'efficacité totale (de l'ordre de 5 points). Notons que les débits d'aspiration sont tels qu'on se situe au palier où l'efficacité de l'installation plafonne.

Toujours sur la maquette CETU, des mesures de stratification ont été réalisées avec et sans soufflage d'air frais. La figure 21bis en montre un exemple. Ces mesures apportent une information supplémentaire quant à l'influence du soufflage d'air frais en plafond sur la stratification du panache de fumée. On constate que le soufflage d'air frais favorise le mélange de fumées dans la partie basse du tunnel : les concentrations de fumée à 0,5 m et 2,0 m du sol sont supérieures à 10 % pour le soufflage à 50 m³/s km et à 20 % pour le soufflage à 100 m³/s/km, tandis que celles-ci restent bien en dessous de 5 % lorsqu'il n'y a pas soufflage d'air frais.

Hormis le cas des tranchées couvertes avec galeries latérales de ventilation, le soufflage d'air frais par le bas coûte sensiblement plus cher que le soufflage d'air frais par jets pariétaux compte tenu de la nécessité de réaliser des carnaux à l'intérieur des piédroits. Les résultats des mesures de stratification ne sont cependant pas favorables à la deuxième solution. On sait en effet qu'une faible concentration de fumées induit très rapidement une perte importante de visibilité.

En ce qui concerne le soufflage d'air frais par le bas, on peut dire que les essais réalisés sur la maquette EPAD ne montrent pas une grande influence sur l'efficacité du désenfumage, sachant par ailleurs que le débit d'air frais retenu était important. Le principe retenu d'un soufflage d'air frais à régime réduit (au 1/3 du débit d'extraction d'après les recommandations tirées des essais incendie du tunnel du Zwenberg réf. 7) simultané à l'extraction des fumées n'est donc pas remis en cause par ces essais. A noter que le document "Equipements", section

"Ventilation" du Dossier Pilote du CETU ne recommande celui-ci que lorsque le cantonnement de la ventilation est insuffisant pour maîtriser le courant d'air longitudinal.

Concernant l'emplacement du soufflage d'air frais, nous rappelons aussi la conclusion tirée des essais incendie du tunnel du Zwenberg, à savoir que "le soufflage inférieur ne présente aucun avantage pratique par rapport au soufflage supérieur même en cas d'incendie, cette question étant moins importante que celle de la réduction du débit d'air frais concomitant à l'extraction des fumées" (réf. 8). Cette conclusion semble en contradiction avec nos résultats, mais nous ne disposons malheureusement pas de mesures de stratification avec le soufflage en partie basse.

Enfin suite aux essais d'incendie réalisés par le CETU dans le tunnel de la Bretelle de Monaco, la conclusion concernant le soufflage d'air frais par jets pariétaux est la suivante : "l'insufflation d'air frais au moyen de jets pariétaux a visiblement tendance à déstratifier la couche de fumée chaude en plafond, ce qui la rend beaucoup plus difficile à évacuer au moyen d'une aspiration en plafond, et risque de réduire la visibilité à hauteur d'homme" (réf. 9).

En conclusion, les essais montrent qu'il faut éviter le soufflage d'air frais en plafond dans la zone enfumée : bien que l'efficacité globale du désenfumage en soit peu affectée, ce soufflage entraîne des fumées en partie basse, détériorant ainsi de façon importante les conditions de visibilité et de suivie des usagers et des services de secours.

Le soufflage d'air frais en partie basse n'affecte que peu l'efficacité du désenfumage. Nous ne pouvons que regretter de n'avoir pas fait procéder à des mesures de stratification dans ce cas, ce qui ne permet pas de conclure valablement sur les conditions existant alors au niveau des usagers.

Maquette EPAD
4 x 11 m³/s - Va = 5,5 m/s
Influence du soufflage par le bas
Efficacité totale = f(Qsoufflage)

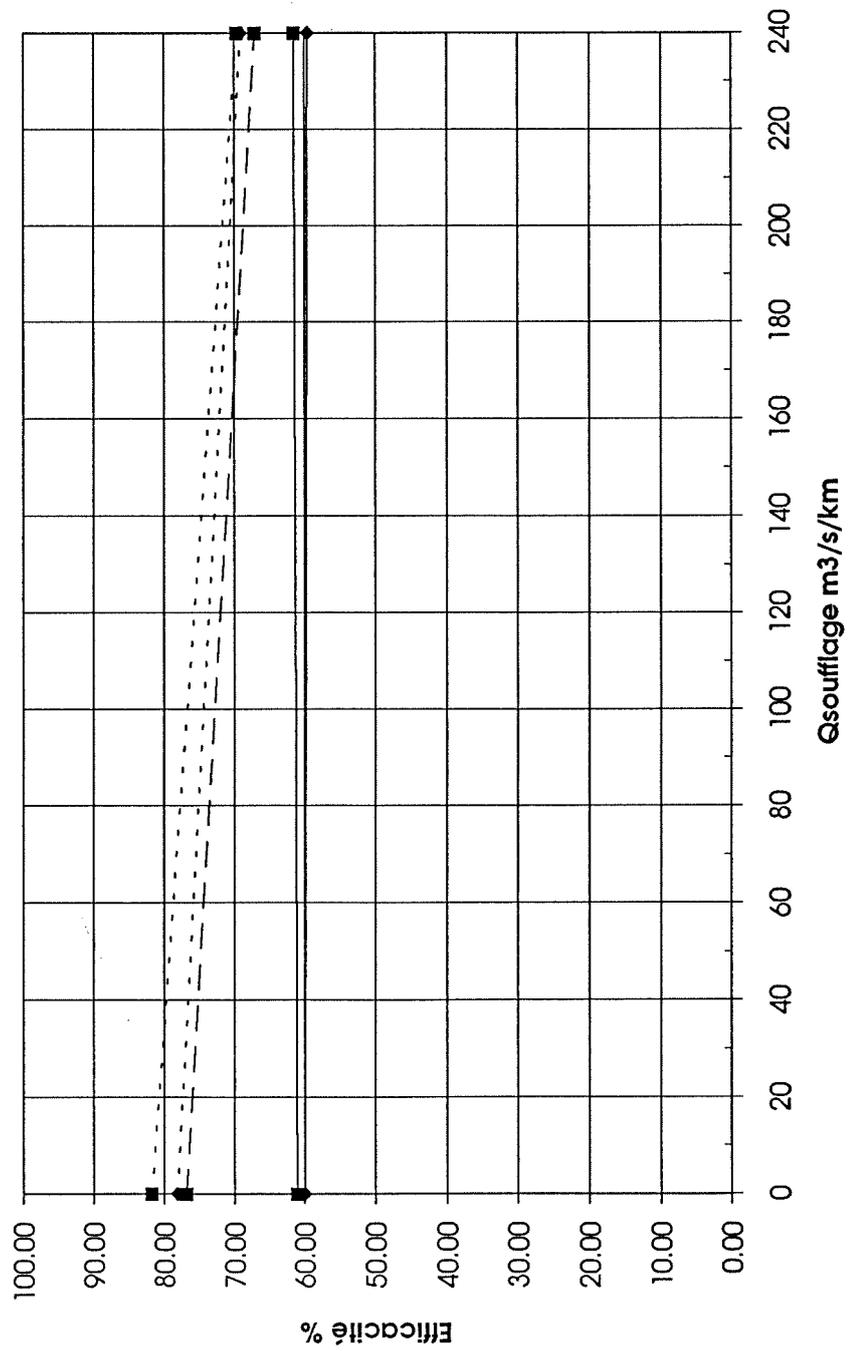
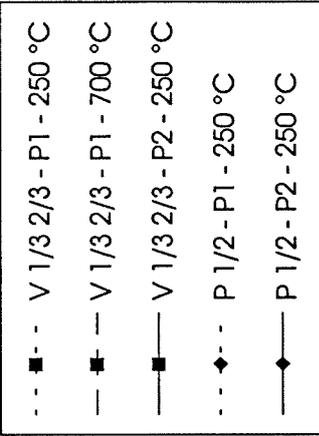


Figure 20



Maquette CETU
P1/3 - $V_a = 10$ m/s
Influence du soufflage par le haut
Efficacité totale = f($Q_{\text{soufflage}}$)

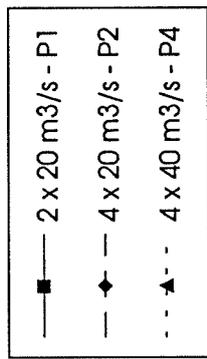
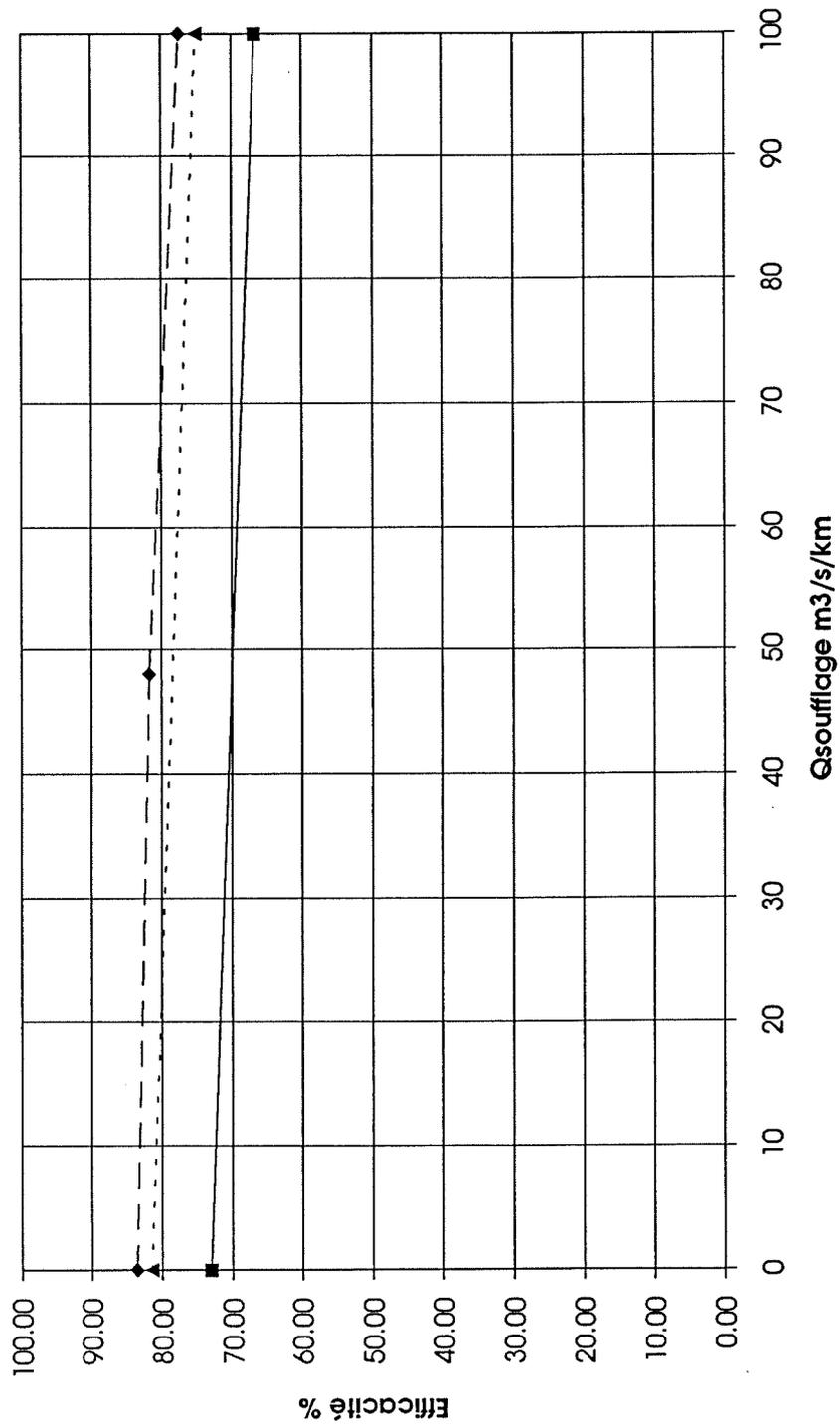


Figure 21

Maquette CETU
P 1/3 - $V_a = 10 \text{ m/s}$ - P2 - $250 \text{ }^\circ\text{C}$
Aspiration 4 x 20 m^3/s
Influence du soufflage d'air frais par le haut
Mesures de stratification entre C3 et C4

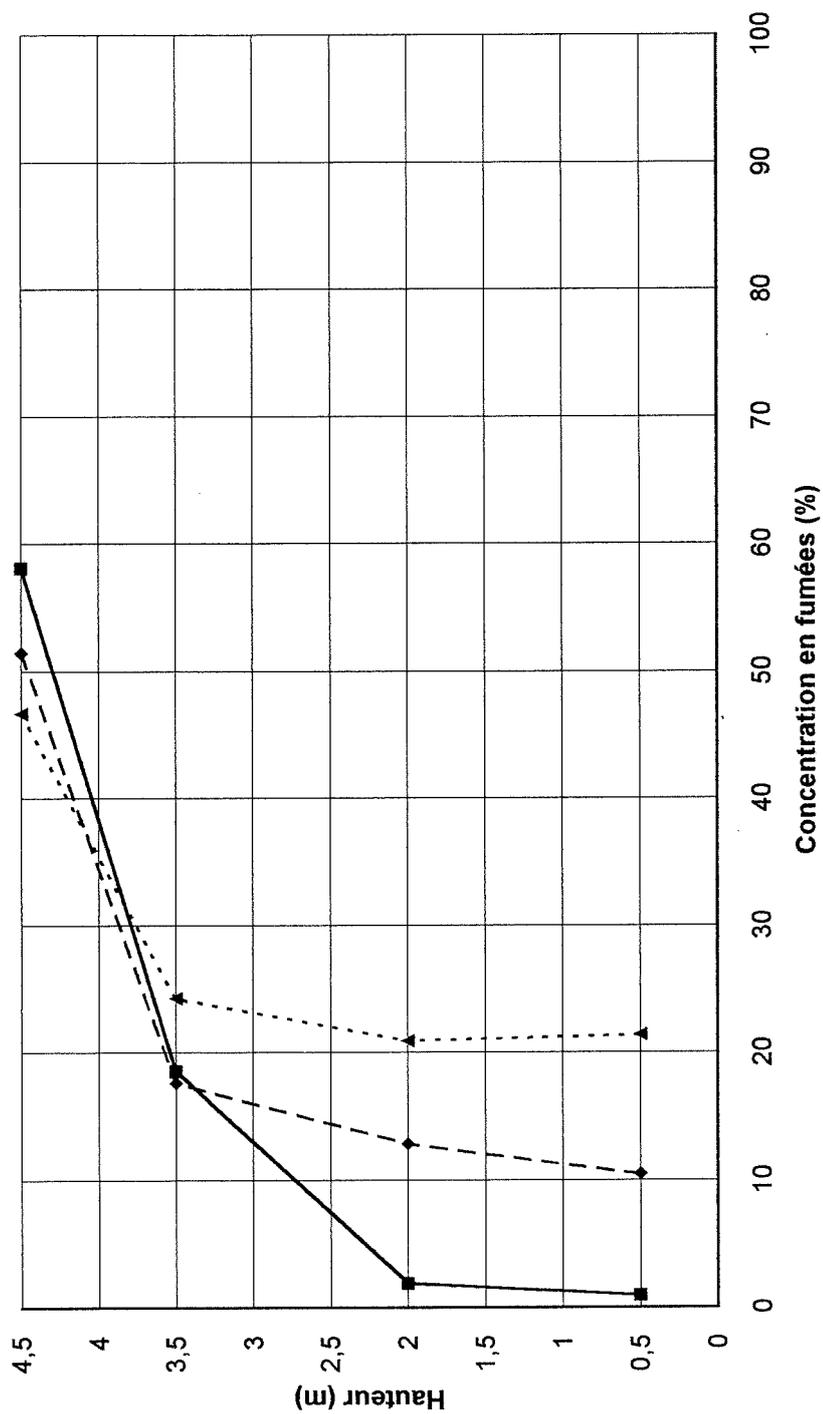
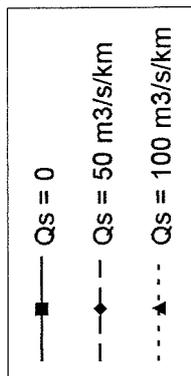


Figure 21bis



5.9 - Influence de la présence de véhicules en tunnel

Lors des essais de stratification, nous avons pu apprécier l'influence de la présence de véhicules en tunnel sur la stabilité des panaches de fumée.

Il s'agit cette fois, pour des panaches stratifiés en présence de véhicules, de tester l'influence de ceux-ci sur l'efficacité de l'aspiration des fumées.

Sur la figure 22, nous avons reporté les essais qui permettent une comparaison avec une situation sans véhicule en tunnel. Il s'agit de la configuration P1/3 de la maquette CETU, avec une vitesse d'aspiration de 10 m/s et une température de 250°C, dans les cas suivants :

- Panache P1 et 2 x 20 m³/s
- Panache P4 et 4 x 40 m³/s

Nous avons en outre indiqué le cas suivant :

- Panache P2 et 4 x 20 m³/s

qui a été testé pour 120° et 700°, considérant que les efficacités obtenues dans les deux cas sont si voisines (1,5 point) qu'on peut supposer qu'elles seraient les mêmes pour 250°.

Les résultats obtenus ne montrent pas une grande influence des véhicules sur l'efficacité de l'aspiration (moins de 5 points), ce qui n'est pas très surprenant dès lors que ceux-ci ne perturbent déjà pas la stratification des panaches sans extraction.

Par ailleurs, comme nous l'avons dit, la température ne joue pas sur les résultats alors qu'elle doit influencer sur la "solidité" de la stratification.

En conclusion, la faible influence de la présence de véhicules en tunnel justifie a posteriori le choix qui avait été fait au début de l'ensemble des essais de réaliser toutes les études paramétriques avec un tunnel vide. L'objectif était de permettre une bonne répétabilité, le remplissage d'un tunnel étant évidemment très variable. Ceci ne se fait donc pas au détriment du réalisme de l'application aux cas réels, puisque l'influence des véhicules est faible.

Maquette CETU
P1/3 - Va = 10 m/s - 250 °C
Influence des véhicules en tunnel
Efficacité totale = f(Véhicules)

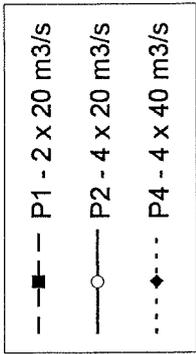
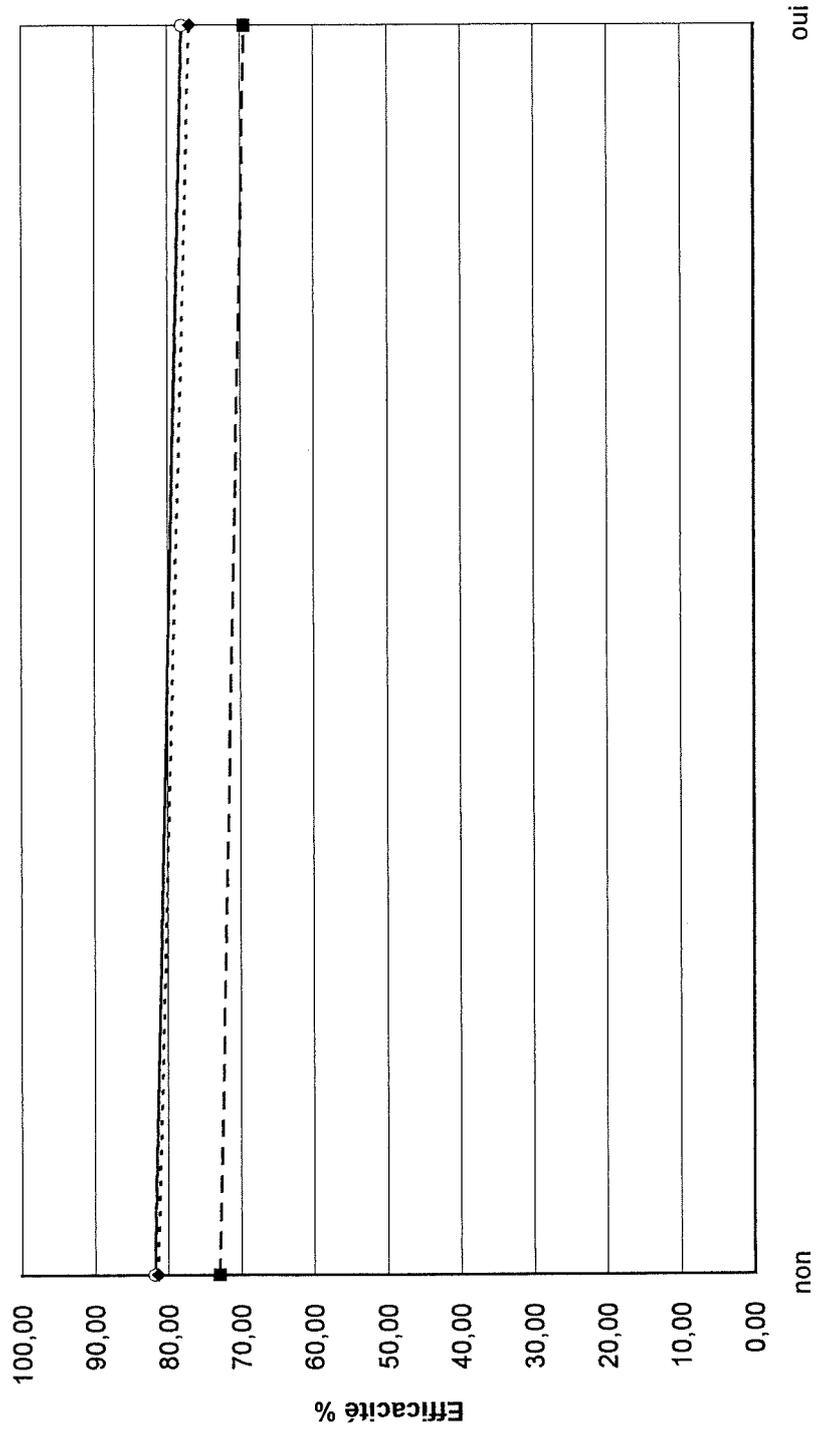


Figure 22

5.10 - Comparaison avec une aspiration répartie

Les essais réalisés avec une aspiration répartie par petites bouches espacées tous les 15 m, latérale ou centrale, permettent de faire une comparaison :

- d'une part avec le système de trappes de désenfumage en configuration P1/3 ;
- d'autre part entre les deux aspirations réparties testées latérale et centrale.

Les résultats obtenus sont reportés sur les figures 23 et 24.

En ce qui concerne la comparaison entre le système de trappes en configuration P1/3 et l'aspiration répartie, celle-ci n'est possible, compte-tenu des essais réalisés, qu'avec la disposition centrale des petites bouches. Pour l'aspiration répartie, les essais retenus correspondent à une vitesse d'aspiration voisine de 13 m/s.

On constate qu'à débit d'aspiration égal, le système de trappes en configuration P1/3 se montre globalement plus efficace que l'aspiration centrale répartie. La différence est surtout sensible pour le panache P1 pour lequel le débit d'aspiration global correspond au palier où l'efficacité du désenfumage plafonne. Elle est beaucoup plus faible, voire nulle, pour les panaches P2 et P4 où on est très en dessous de ce plafond.

La deuxième comparaison possible entre les aspirations réparties latérale et centrale conduit à une meilleure efficacité pour l'aspiration centrale dans le cas du panache P1 (pour lequel l'efficacité plafonne) et à un résultat identique dans le cas du panache P2 (en-dessous du plafond d'efficacité).

Une analyse peut aussi être faite sur l'influence de la vitesse d'aspiration en système réparti. Elle conduit au même résultat que celui obtenu au chapitre 5.2, à savoir que l'efficacité totale diminue un peu (de l'ordre de 5 points) lorsque la vitesse d'aspiration augmente (de 13 à 27 m/s).

Maquette CETU
Qa = 40 m³/s - Va = 10 m/s - 250 °C
Comparaison entre P1/3 et Aspiration répartie

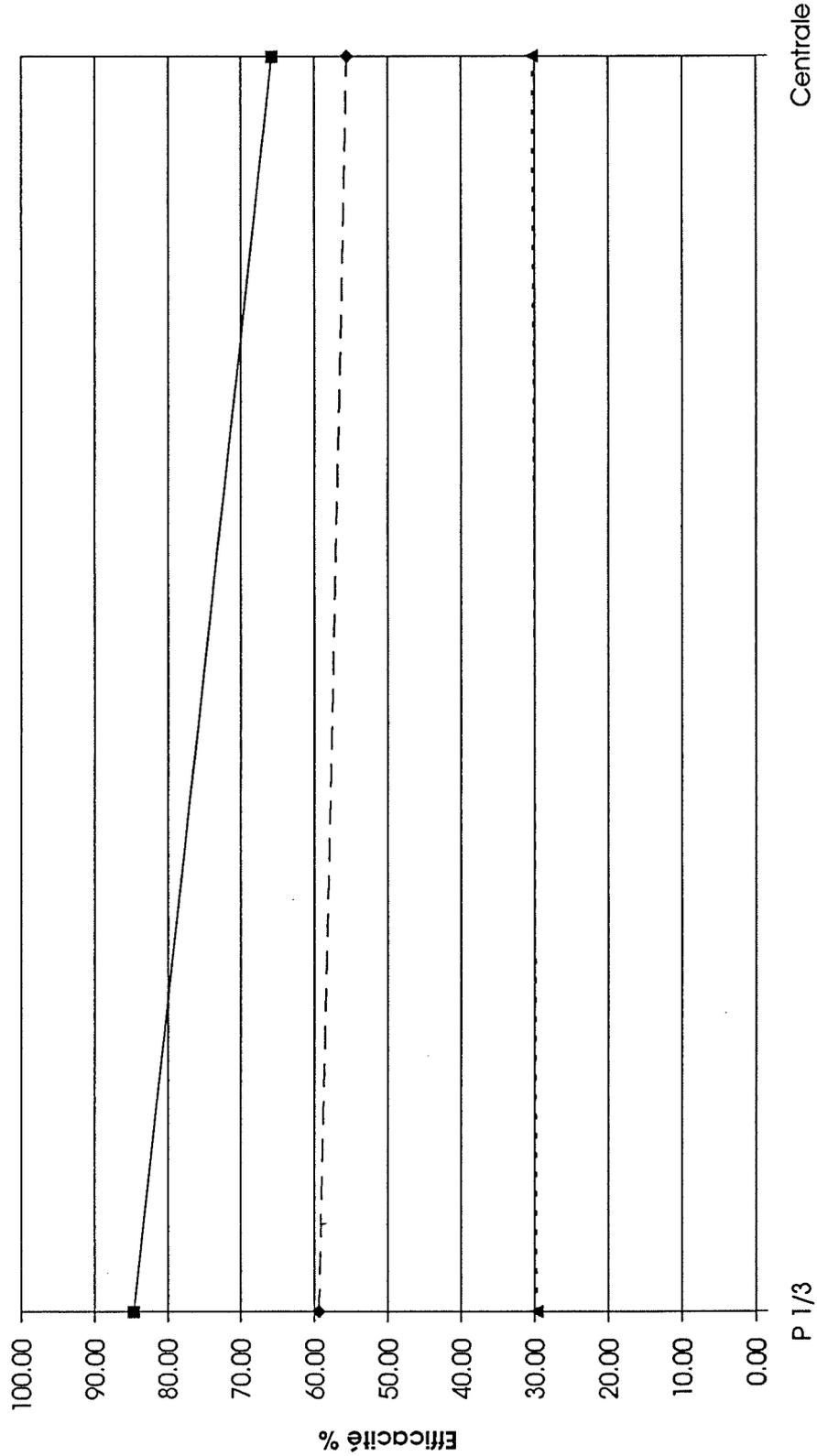
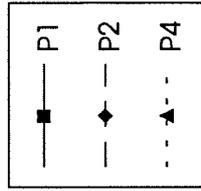


Figure 23



Maquette CETU
Qa = 40 m³/s - Va = 27 m/s - 250 °C
Comparaison entre Aspirations réparties
Latérale et Centrale

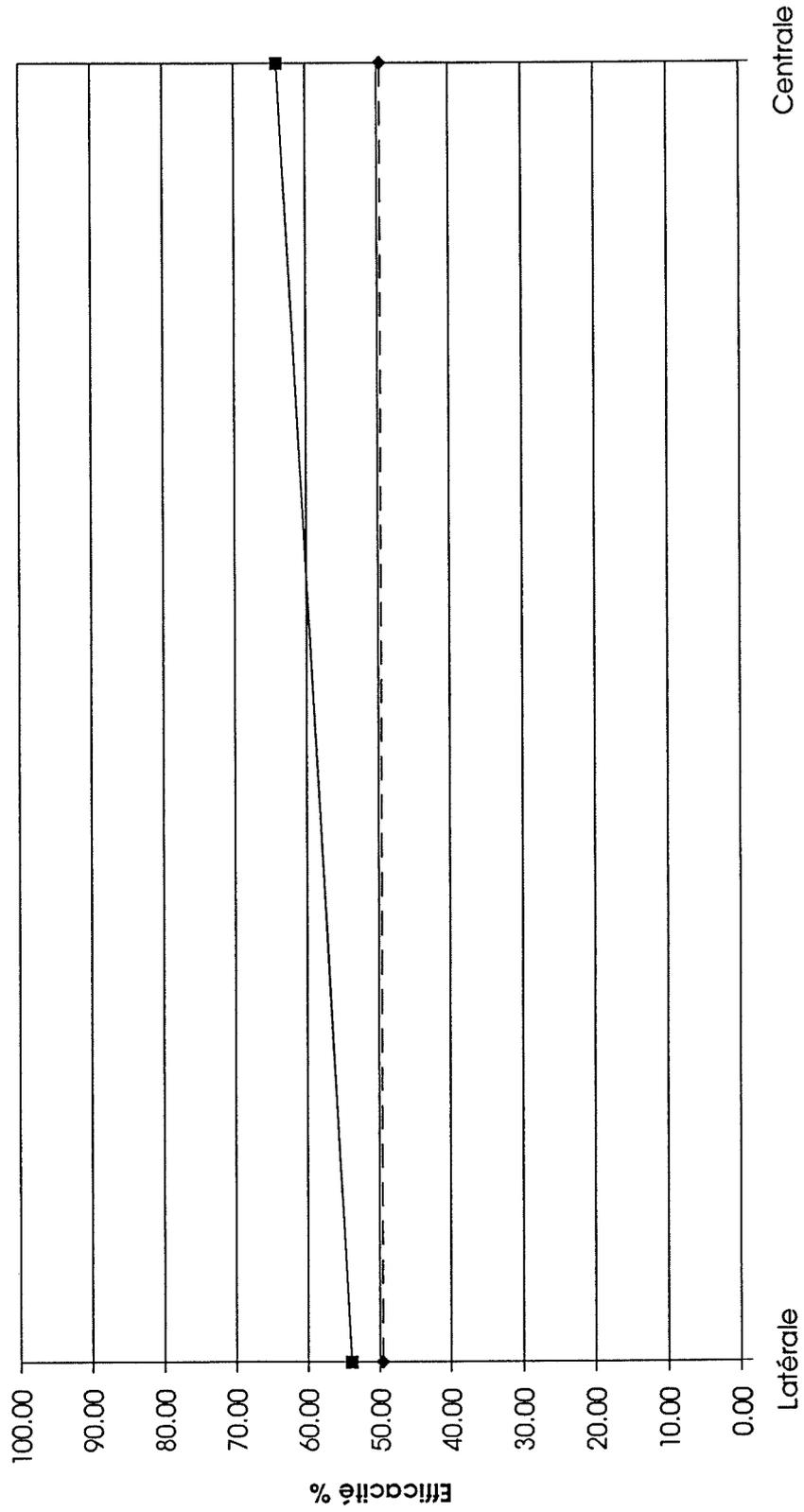
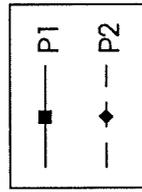


Figure 24



5.11 - Comparaison entre les maquettes EPAD et CETU - Influence de la largeur

L'objectif premier de cette comparaison était de s'assurer que l'instrumentation de la maquette CETU, dont l'étude a été réalisée après celle de la maquette EPAD, fonctionnait normalement.

Cette comparaison permet aussi d'apprécier l'influence de la largeur du tunnel, puisque c'est la seule différence entre la maquette EPAD avec plafond lisse et la maquette CETU (mise à part la hauteur qui varie de 5,4 m pour la maquette EPAD à 5 m pour la maquette CETU et dont nous supposons l'influence négligeable du fait de la bonne stratification des panaches testés).

Les seuls essais complètement comparables entre les deux maquettes sont les suivants :

- configuration P1/2, 4 x 10 m³/s, Va = 5 m/s et panache P1 à 250°C ;
- configuration P1/2, 4 x 20 m³/s, Va = 10 m/s et panache P1 à 250°C ;
- configuration Lsym, 4 x 20 m³/s, Va = 10 m/s et panache P2 à 250°C.

Les essais EPAD ayant été faits avec des débits d'aspiration légèrement différents, à savoir 4 x 11 m³/s et 4 x 21 m³/s, il nous a semblé plus logique d'utiliser la notion d'efficacité théorique locale pour faire cette comparaison, celle-ci permettant en effet de rendre les résultats plus comparables entre eux, même s'il s'agit d'une correction imparfaite. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 25 à 27.

La différence entre les deux maquettes n'apparaît pas très grande. Il semble cependant que la tendance soit à des résultats meilleurs sur la maquette CETU que sur la maquette EPAD. Ceci d'autant plus que le cas où cette tendance paraît la moins nette, à savoir P1/2 et 4 x 20 m³/s, est sujet à caution pour la maquette CETU : l'efficacité totale n'est que de 73,5 % pour le panache P1, alors qu'elle est de 81,5 % pour le panache P2 ; or à nombre d'aspirations et à débit aspiré total identiques, quelle que soit la configuration, on obtient toujours une meilleure efficacité avec le panache P1 qu'avec le panache P2. Ceci rejoint les autres remarques faites sur la configuration P1/2 dans la maquette CETU.

Si on exclut ce cas litigieux, la cohérence apparaît très bonne entre les deux maquettes, et il semble normal que la maquette CETU, moins large, permette une aspiration un peu meilleure des fumées.

Afin de mieux quantifier cet effet nous avons reporté dans le tableau suivant les efficacités globales obtenues dans tous les essais au moins partiellement comparables entre les deux maquettes. Lorsque certains paramètres sont différents, nous avons porté successivement sa valeur EPAD et sa valeur CETU. Un certain nombre de résultats obtenus avec P 1/2 pour la maquette EPAD sont comparés avec P 1/3 sur la maquette CETU, soit pour éliminer le cas douteux ci-dessus, soit parce les valeurs pour P 1/2 n'étaient pas disponibles sur la maquette CETU. Ceci devrait conduire à minorer un peu l'efficacité de la maquette CETU, puisqu'en principe la configuration P 1/3 devrait être un peu moins efficace que P 1/2.

Configuration	Panache	Vasp (m/s)	Nc	Qc (m ³ /s)	Efficacité EPAD	Efficacité CETU	E_{CETU} - E_{EPAD}
P 1/2	P1	5	4	10	74	86	+ 12
P 1/2 - P 1/3	P1	10	4	20	77	91	+ 14
P 1/2 - P 1/3	P2	5 - 10	4	10	57	59	+ 2
P 1/2 - P 1/3	P2	10	4	20	72	81	+ 9
Lsym	P2	10	4	20	65	77	+ 12
Ldissym	P1	5	4	10	61	66	+ 5
	P2	5	4	10	44	50	+ 6

On constate une efficacité systématiquement meilleure sur la maquette CETU. L'écart est faible, de l'ordre de 5 points, lorsque l'aspiration est relativement peu efficace et qu'il reste au moins 40 % de fumées dans le tunnel après aspiration. L'écart est plus important, de l'ordre de 12 points, quand l'efficacité est meilleure, voire même atteint son plafond (à partir de $Q_{asp} = 4 \times 10 \text{ m}^3/\text{s}$ pour P1 et $Q_c = 4 \times 20 \text{ m}^3/\text{s}$ pour P2 avec des trappes en plafond).

Afin de mieux comprendre l'effet de la largeur, on peut se demander si les écarts entre configurations en plafond et configurations latérales, et entre configuration latérale des deux côtés ou d'un seul côté ne seraient pas plus grand dans le tunnel large. La comparaison des figures 11 et 12 (§ 5.4 ci-avant) montre qu'il n'en est rien :

- l'écart entre P 1/2 (ou P 1/3 pour la maquette CETU) et Lsym est de 10 points pour la maquette EPAD et de 4 à 6 points pour la maquette CETU (mais P 1/3 est en principe moins efficace que P 1/2) ;
- l'écart entre Lsym et Ldissym est de 3 à 4 points pour la maquette EPAD et de 4 à 7 points pour la maquette CETU.

Il semblerait donc que la perte d'efficacité lorsque la largeur augmente soit plus liée à la moindre épaisseur de la couche de fumées qu'à l'éloignement entre les trappes et les parties du panache qui en sont le plus loin.

Comparaison entre maquettes EPAD et CETU
P 1/2 - 4 x 10 m³/s - Va = 5 m/s - P1 - 250 °C
Analyse des efficacités théoriques locales

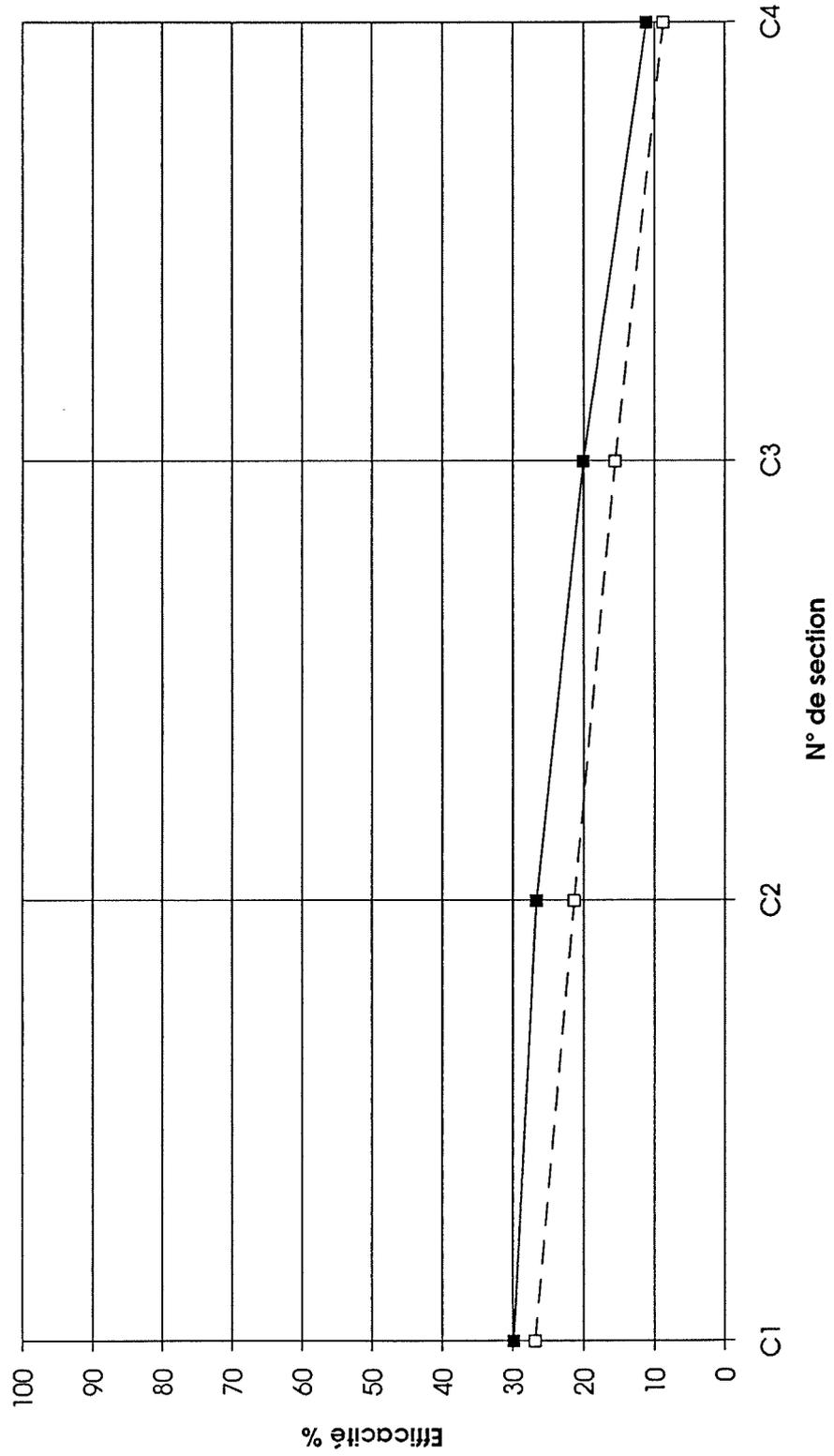


Figure 25

—■— CETU
- -□- EPAD

Comparaison entre maquettes EPAD et CETU
lsym - 4 x 20 m³/s - Va = 10 m/s - P2 - 250 °C
Analyse des efficacités théoriques locales

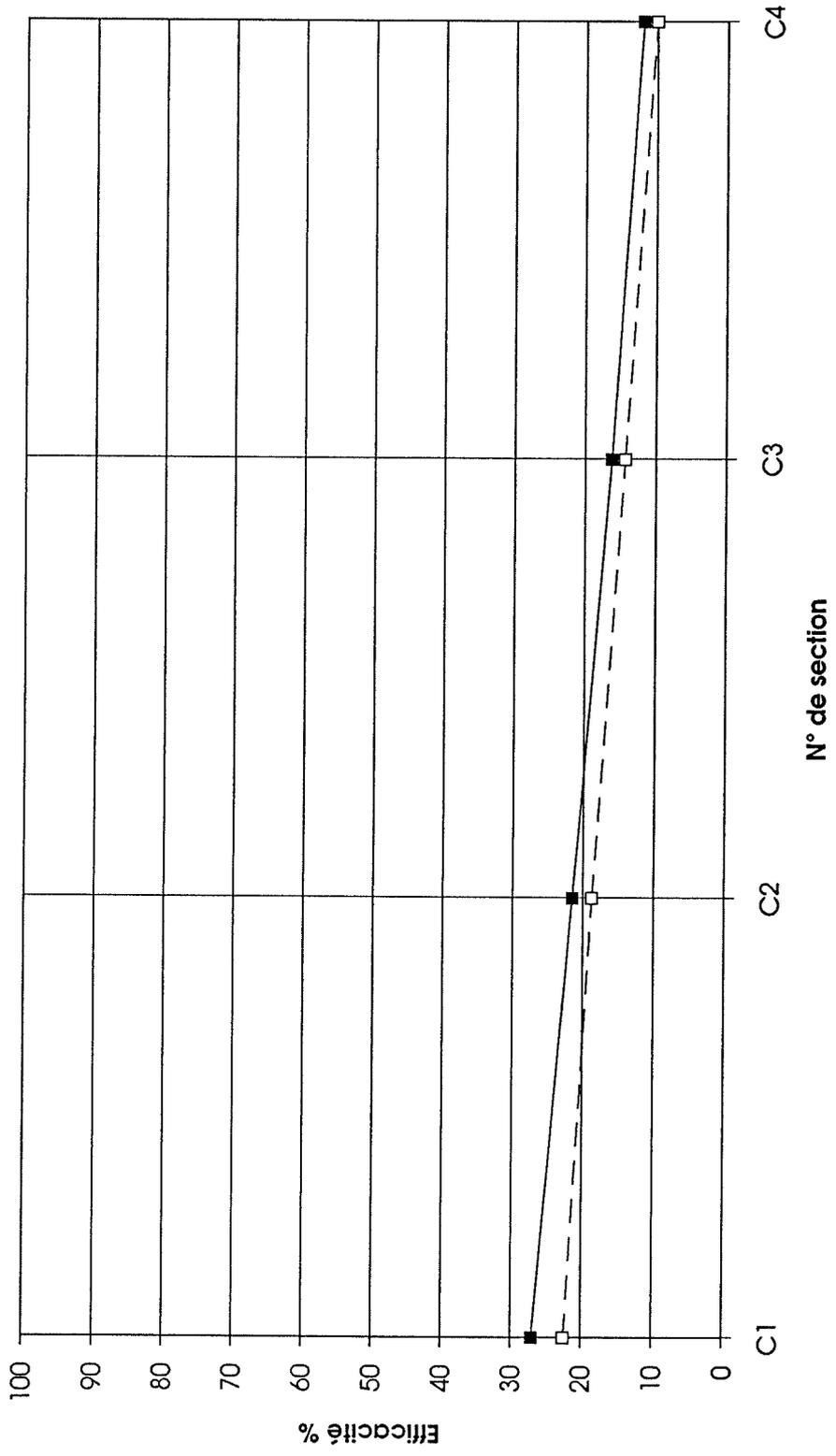


Figure 26

—■— CETU
- -□- - EPAD

**Comparaison entre maquettes EPAD et CETU
 P 1/2 - 4 x 20 m³/s - Va = 10 m/s - P1 - 250 °C
 Analyse des efficacités théoriques locales**

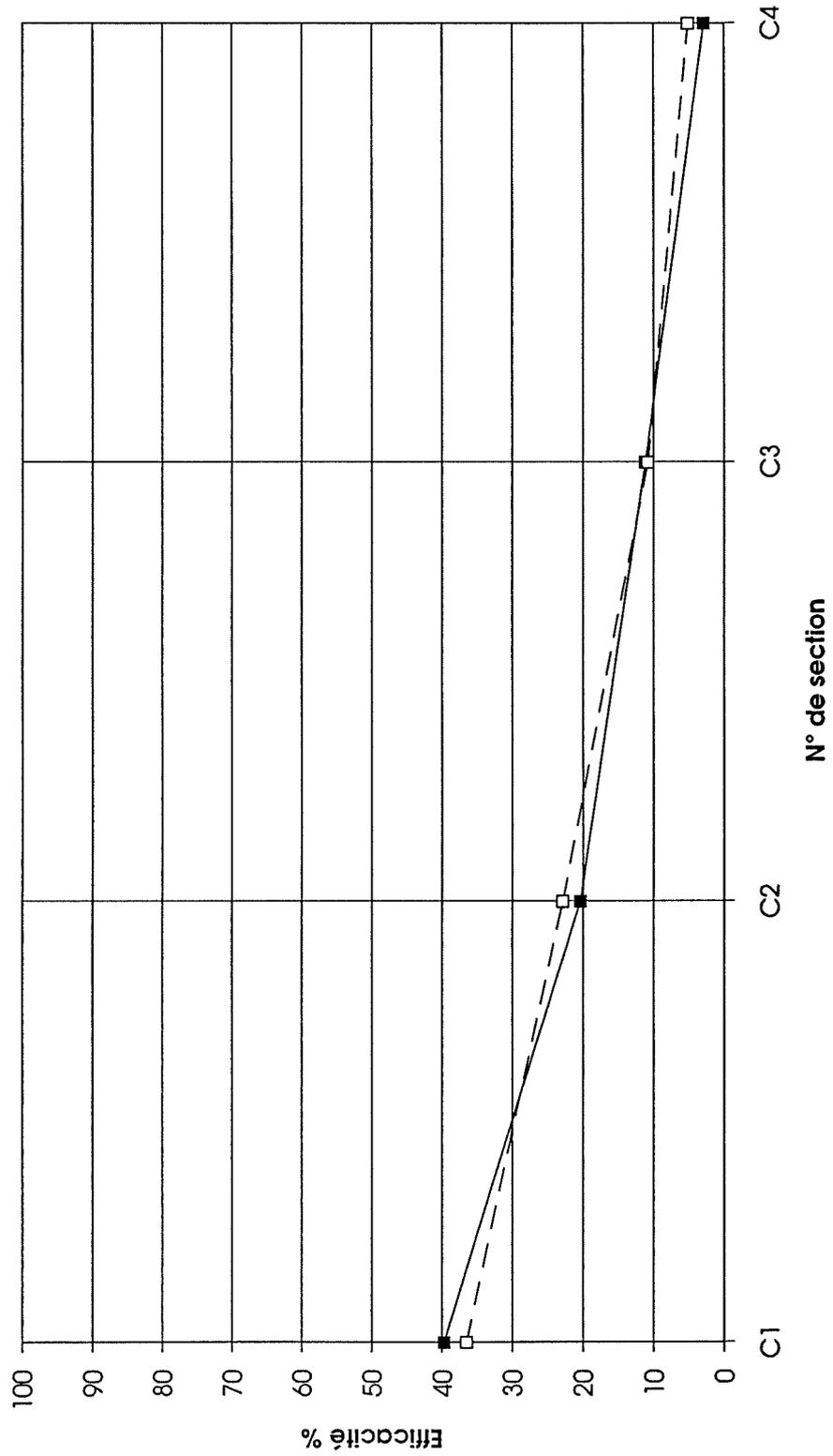


Figure 27
 —■— CETU
 - -□- EPAD

5.12 - Comportement d'autres panaches stratifiés

La totalité des essais commentés jusqu'ici a été réalisée avec les panaches :

- P1 et P2 représentatifs d'un incendie de PL sans matières dangereuses, le premier avec répartition des fumées dans les deux directions, le second avec écoulement des fumées dans une seule direction pour le courant d'air le plus faible en tunnel qui le permette,
- P4 représentatif d'un incendie de matières dangereuses (plus important que ce qu'on considère habituellement), où toutes les fumées sont poussées dans la même direction.

On a en effet considéré qu'il s'agissait là de cas représentatifs des dimensionnements habituels. Le panache P3, représentatif du même incendie de matières dangereuses avec partage des fumées dans les deux directions n'a pas été considéré, car on l'a estimé très proche de P2.

Par ailleurs, trois autres panaches ont été envisagés lors des essais préalables de stratification :

- P5 qui veut représenter un incendie de PL en présence d'un courant d'air important de 4 m/s (que normalement la ventilation doit éviter en cas d'incendie),
- P6 et P7 représentatifs d'un incendie de VL avec écoulement dans un seul ou dans les deux sens. Ces panaches ont été considérés comme non dimensionnants pour les tunnels représentés par la maquette dont la hauteur sous plafond de 5 m permet l'accès des poids lourds.

Nous avons toutefois voulu vérifier sur un cas, la configuration P 1/3 de la maquette CETU, le comportement des panaches P3, P5 et P6. Le panache P7 a été exclu car le débit de fumées est très faible et ne saurait poser problème avec les débits de désenfumage envisagés.

Le tableau ci-après compare les caractéristiques des panaches P2, P3 et P5 et l'efficacité correspondante du désenfumage avec des sections d'aspiration de 20 m³/s de débit unitaire.

	P2	P3	P5
Qf (m ³ /s)	60	60	60
Vf (m/s)	3	4	4
Vtun (m/s)	2	0,5	4
Ef (m)	2,22	1,67	1,67
Efficacité globale pour 3 x 20 m ³ /s	72 %	71 %	60 %
Efficacité globale pour 4 x 20 m ³ /s	81 %	-	69 %

Le panache P3 n'a été testé qu'avec trois sections d'aspiration en fonctionnement, pour éviter un débit d'air entrant par l'autre extrémité de la maquette. Cette question ne se posant pas pour les panaches P2 et P5, ceux-ci ont été testés avec quatre sections d'aspiration, et la dernière section n'a pas été prise en compte pour calculer l'efficacité avec trois sections.

Comme on s'y attendait, le panache P3 a un comportement très proche de P2, malgré une épaisseur plus faible pour un même débit. Il était donc apparemment justifié de ne pas l'étudier davantage.

En revanche, le panache P5 est moins bien aspiré que les deux autres : un courant d'air longitudinal rapide semble donc avoir un effet défavorable sur l'extraction.

Le tableau suivant compare de la même façon les panaches P1 et P6, qui ont été testés le premier avec deux sections d'aspiration et le second avec trois (pour la même raison que P3).

	P1	P6
Qf (m ³ /s)	30	20
Vf (m/s)	2	2
Vtun (m/s)	0,5	1,5
Ef (m)	1,67	1,11
Efficacité globale avec 1 x 20 m ³ /s	46 %	52 %
Efficacité globale avec 2 x 20 m ³ /s	73 %	76 %
Efficacité globale avec 3 x 20 m ³ /s	(85 %)*	86 %

* Valeur obtenue sur les trois premières sections lors d'un essai à 4 x 20 m³/s

On vérifie que l'efficacité du désenfumage est un peu supérieure pour P6 que pour P1, du fait que le débit de fumées est plus faible, et malgré une épaisseur également plus faible. Notons d'ailleurs que P6 avec 2 x 20 m³/s d'aspiration laisse dans le tunnel la même quantité de fumées que P1 avec 3 x 20 m³/s (environ 4,5 m³/s).

6 - COMMENTAIRES SUR LA REPRESENTATIVITE DES ESSAIS

Ce chapitre apporte quelques précisions sur la représentativité des essais qui ont été réalisés sur maquettes, de sorte qu'il n'y ait pas d'ambiguïté sur la transposition des résultats qui peut être faite dans la réalité.

L'objectif visé dans cette étude était l'optimisation des systèmes de trappes de désenfumage, ce qui a conduit à tester l'influence des paramètres les plus significatifs, en espérant in fine disposer de toutes les informations permettant de faire le choix du ou des meilleurs systèmes parmi ceux qui sont possibles. Cet objectif a, au moins pour l'essentiel, été atteint.

Toutefois, il faut garder en mémoire que les systèmes ont été testés sur des panaches qu'on pourrait qualifier "d'idéaux" en ce sens qu'au départ ils ont été choisis bien stratifiés sur toute la longueur étudiée du tunnel. Or dans la réalité, on ne peut prétendre maîtriser parfaitement le développement des panaches de fumée et les obliger à rester stratifiés ; tout au plus peut-on espérer contrôler le courant d'air longitudinal pour éviter une déstratification trop rapide. Mais celle-ci se produit tôt au tard : à cause des pertes thermiques, les forces stabilisatrices de flottabilité diminuent jusqu'à devenir insuffisantes pour contre-balancer le phénomène de diffusion turbulente. Les maquettes ne sont donc que des modèles un peu trop "parfaits" et les situations étudiées ont peu de chances de se reproduire à l'identique dans la réalité.

L'exploitation en valeurs absolues des résultats obtenus n'est donc pas souhaitable. En revanche l'utilisation de ceux-ci pour déterminer des tendances et faire des analyses comparatives est possible, ce à quoi nous nous sommes limités dans les chapitres précédents.

Il paraît inutile, voire dangereux, d'essayer de comparer les essais sur maquettes avec des exercices incendie en vraie grandeur, car les conditions ne seront jamais aussi bien maîtrisées et il y a un grand risque d'être déçu.

Un autre point qui mérite d'être souligné concerne la répartition des débits des différentes trappes entre les maquettes et la réalité. Sur les maquettes, chaque section d'aspiration était contrôlée par un ventilateur indépendant, par conséquent on était certain d'avoir le même débit partout aux précisions de réglage et de mesure près. Dans la réalité, les trappes de désenfumage sont en général raccordées à une même gaine de ventilation, ce qui ne conduit pas nécessairement à une répartition aussi uniforme des débits entre les différentes trappes, les plus proches du ventilateur aspirant toujours plus que les plus éloignées en l'absence de dispositions particulières. La figure 28 extraite du rapport des essais de Monaco (référence 9) permet de s'en rendre compte très facilement.

Enfin, il faut revenir sur les problèmes d'incertitudes et plus particulièrement sur la question des essais à très forts débits d'aspiration où l'efficacité totale n'a jamais atteint 100 %. Il paraît en effet surprenant que, pour les essais suivants réalisés sur la maquette CETU :

- n° 95/0605 où on aspire au total 160 m³/s pour un débit amont entrant de 45 m³/s,
- n° 94/0605 où on aspire au total 160 m³/s pour un débit amont entrant de 110 m³/s,
- n° 96/0605 où on aspire au total 240 m³/s pour un débit amont entrant de 110 m³/s,

les efficacités totales n'atteignent pas des valeurs plus proches de 100 % que celles qu'on obtient.

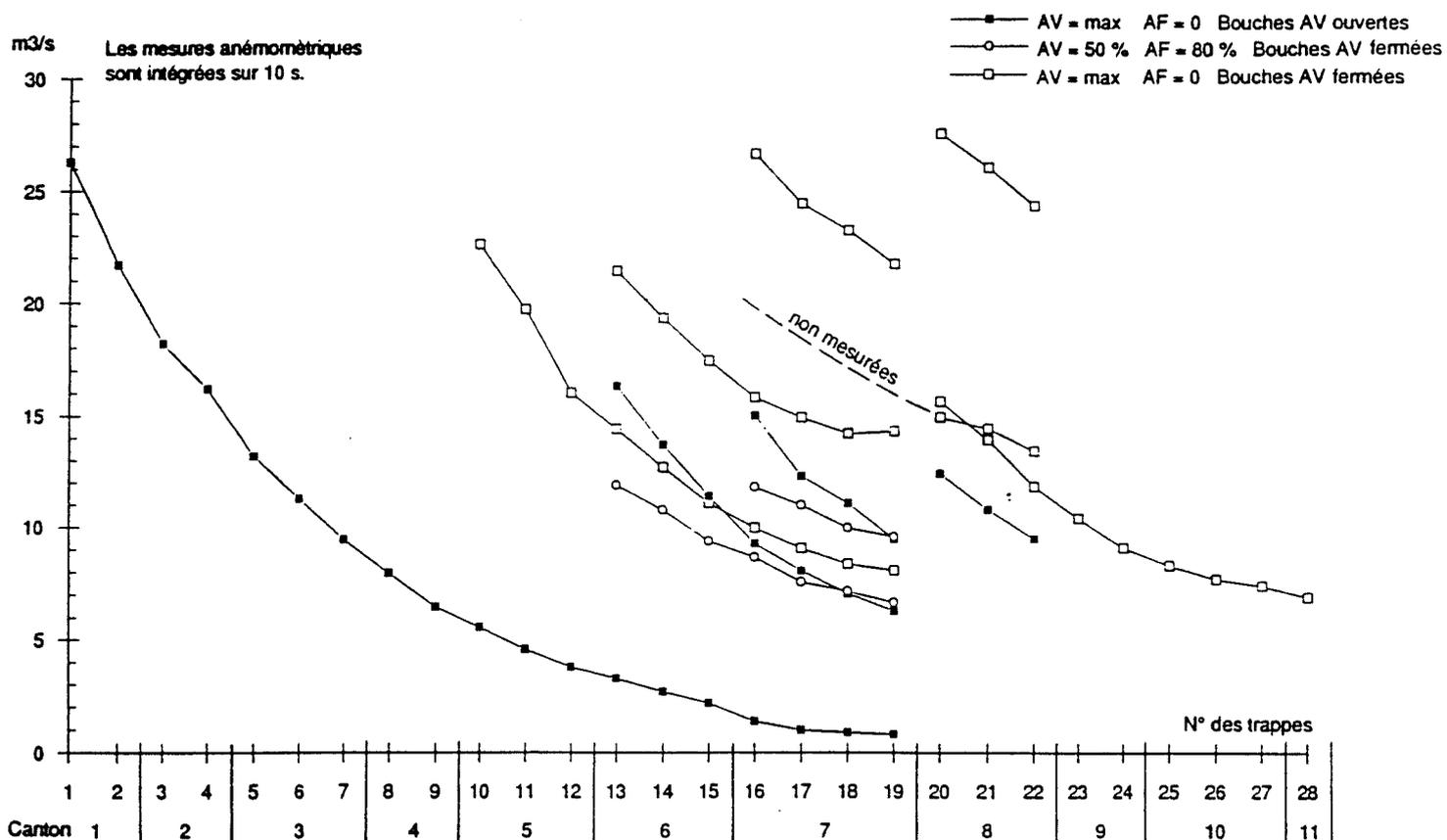
D'après FRAMATOME, lors des tests de visualisation portant sur certains de ces essais, il était possible de voir sortir de la fumée des fumigènes utilisés par l'autre extrémité du tunnel où un débit important est aussi sensé être entré. Cette fumée donnait l'impression de longer les parois du tunnel, ce qui pourrait expliquer que les mesures de concentrations de fumée réalisées au centre du tunnel entre la dernière section d'aspiration et la sortie n'indiquent rien. Seule la bonne foi de l'expérimentateur accrédite cette version car ses observations n'ont pas été filmées et n'auraient d'ailleurs peut être pas non plus été observables sur un film vidéo.

On est également tenté d'émettre l'hypothèse que l'ensemble du dispositif expérimental, tout en étant apparemment sensible et précis, conduise à une sous-évaluation systématique de l'efficacité totale. Cette sous-évaluation pourrait aussi ne pas être identique entre les maquettes EPAD et CETU, ce qui expliquerait que les efficacités totales ne plafonnent pas aux mêmes valeurs dans les deux cas.

Si malgré tout cela, nous affirmons que le dispositif expérimental paraît relativement précis et sensible, c'est que plusieurs essais ont été réalisés deux fois et ont montré la bonne répétabilité des expériences. De même les analyses comparatives, qui ont été faites précédemment, montrent une bonne cohérence de l'ensemble des essais, mis à part ceux de la configuration P 1/2 sur la maquette CETU.

En conclusion, les critiques et réserves émises ci-dessus confirment la nécessité de ne considérer ces essais qu'en relatif, et pas en absolu ou alors avec prudence.

Figure 28



Tunnel de la bretelle de Monaco A800
 Mesure du débit des trappes de désenfumage
 Mai 1992

**7 - RECOMMANDATIONS PROPOSEES POUR LES PROJETS SUITE
AUX ESSAIS**

Ce chapitre tente de proposer de premières conclusions des essais en vue de leur application pour la conception et le dimensionnement des projets de tunnels routiers.

Commençons par noter que les essais ont prouvé la supériorité du concept de trappes télécommandées d'un ou quelques mètres carrés de section, espacées sur la longueur du tunnel, par rapport au système classique de petites bouches d'aspiration réparties à faible intervalle. D'une part ces dernières peuvent difficilement être motorisées, ce qui ne permet pas de concentrer l'aspiration dans la zone enfumée. D'autre part, même dans la zone enfumée, elles sont à débit égal nettement moins efficaces que les trappes, la perte d'efficacité pouvant atteindre jusqu'à 20 points si elles sont centrées et 30 points si elles sont situées sur les côtés, même en quinconce.

Le principe de l'utilisation de trappes étant acquis, les essais font apparaître globalement que deux paramètres ont une importance déterminante sur l'efficacité de l'installation de désenfumage :

- le débit total d'extraction,
- la position des trappes, ou tout au moins le choix entre une aspiration en plafond ou latérale.

Une autre caractéristique du système a une influence moindre :

- la répartition longitudinale de l'extraction,

Les autres paramètres jouent de façon tout à fait secondaire :

- la vitesse d'aspiration,
- la forme des trappes.

Nous traiterons successivement ces différents points avant de rappeler les conclusions concernant l'insufflation d'air frais.

7.1 - Débit total d'extraction

Le débit total d'extraction est le paramètre prépondérant, et de loin, dans l'efficacité de l'installation.

Dans les systèmes de trappes en plafond, y compris sur des carreaux en relief (EPAD avec poutrelles), l'efficacité du désenfumage augmente avec le débit d'aspiration jusqu'à atteindre un palier. Il suffit donc d'atteindre celui-ci pour obtenir la meilleure évacuation possible des fumées. Le débit minimal d'extraction qui permet d'atteindre ce plafond est égal au débit de fumées majoré d'un tiers. Les mesures sur maquette conduisent alors, avec une seule trappe par section d'aspiration, à un rendement de 55 à 65 % pour une efficacité de 80 à 90 %, mais, comme on l'a dit, ces valeurs absolues sont à prendre avec beaucoup de précautions.

Pour arriver à des efficacités comparables en aspiration latérale symétrique (Lsym), il faut sur la maquette EPAD (13 m de largeur) doubler les débits précédents.

Sur la maquette CETU (9 m de largeur), l'aspiration latérale d'un seul côté (Ldissym) demande une majoration des débits qui semble surtout importante pour les "petits" panaches (+ 50 % pour P2), alors que le panache P4 donne à peu près le même résultat que pour une aspiration répartie. Ils serait hasardeux d'extrapoler ces résultats à la maquette EPAD, plus large. En revanche, ceci montre qu'avec un tunnel large de 9 m en configuration Lsym (plus efficace que Ldissym), il n'est besoin au maximum que de majorer de 50 % le débit PL et de conserver le débit MD : on est certainement ainsi surabondant.

En conclusion, pour des trappes en plafond, on peut préconiser les débits d'aspiration totaux Qasp suivants :

VL : $Q_f = 20 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{asp} = 30 \text{ ou } 40 \text{ m}^3/\text{s}$ (seul $40 \text{ m}^3/\text{s}$ a été testé)

PL sans MD : $Q_f = 60 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{asp} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$

PL avec MD : $Q_{asp} = 1,3 Q_f$ (soit $130 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $Q_f = 100 \text{ m}^3/\text{s}$)

Pour une aspiration latérale, une efficacité comparable devrait être obtenue avec les débits suivants :

Tunnel de 9 m de largeur, aspiration d'un seul côté (Ldissym) ou des deux côtés (Lsym) :

VL : $Q_f = 20 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{asp} = ?$ (pas d'essai dans ce cas)

PL sans MD : $Q_f = 60 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{asp} = 120 \text{ m}^3/\text{s}?$ (pas d'essai avec plus de $80 \text{ m}^3/\text{s}$)

PL avec MD : $Q_{asp} = 120 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{asp} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$ (seul essai réalisé)

Tunnel de 13 m de largeur, aspiration des deux côtés :

VL : $Q_f = 20 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{asp} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ (cas testé avec $Q_f = 30 \text{ m}^3/\text{s}$)

PL sans MD : $Q_f = 60 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{asp} = 160 \text{ m}^3/\text{s}?$ (pas d'essai avec plus de $130 \text{ m}^3/\text{s}$)

Pas d'essai avec MD

Il est clair que ces débits ne visent que l'efficacité de l'aspiration et qu'ils supposent qu'on maîtrise par ailleurs le courant d'air longitudinal de façon suffisamment efficace pour éviter la déstratification des fumées sur la longueur où on les extrait.

7.2 - Position transversale des trappes

Nous venons de voir la différence importante qui existe entre les configurations en plafond (avec ou sans carreaux en relief) et les aspirations latérales si on vise des niveaux d'efficacité équivalents. Dans les projets en tranchée couverte où les gaines d'aspiration sont sur un seul côté, ou même sur les deux côtés, il y a donc tout intérêt à réaliser des carreaux en plafond si les hauteurs disponibles le permettent. Ceci s'applique principalement aux largeurs dépassant 10 m. Dans ce cas, la meilleure configuration est celle de deux trappes verticales situées dos à dos au milieu de carreau, ou de quatre trappes verticales situées au 1/3 au 2/3 de la largeur dans le cas d'un tunnel d'au moins une quinzaine de mètres de largeur. Si la hauteur

disponible pose problème, il convient de comparer la solution consistant à augmenter les débits d'aspiration avec celle consistant à modifier le profil en long.

Si on conserve une aspiration latérale sans augmenter le débit d'aspiration, la perte d'efficacité pour les incendie de PL va de 5 à 10 points pour L_{sym} et de 10 à 15 points pour L_{dissym} par rapport à une trappe en plafond, dans la gamme de largeurs testées (9 à 13 m).

Pour une solution en plafond, la disposition des trappes dans le profil en travers a également une influence, de l'ordre de 10 points entre la configuration la plus favorable (fente continue sur toute la largeur du tunnel) et la moins favorable testée (trappe unique décentrée au tiers de la largeur : P 1/3). Par ordre décroissant d'efficacité, on trouve les configurations suivantes :

- fente continue,
- trois trappes régulièrement espacées dans la largeur (P 1/4 1/2 3/4),
- deux trappes régulièrement espacées (P 1/3 2/3),
- une trappe centrée (P 1/2)
- une trappe décentrée au tiers de la largeur (P 1/3).

Il faut toutefois noter que les deux premières solutions, et bien souvent la troisième, ne sont pas réalistes s'il y a plusieurs gaines en plafond. Le faible écart entre les solutions restantes ne justifie pas une complexification du projet pour éviter la solution de la trappe décentrée, surtout si le tunnel n'est pas trop large. Il convient bien sûr d'éviter de décentrer cette trappe plus que le projet ne l'impose.

7.3 - Répartition longitudinale de l'aspiration

Les essais montrent l'intérêt de répartir le débit d'aspiration sur plusieurs sections plutôt que de le concentrer sur une seule. La comparaison a porté sur une trappe, deux trappes espacées de 100 m et quatre trappes espacées de 50 m. Pour certains essais, la différence est sensible en termes d'efficacité : gain de 10 points quand on double le nombre de trappes, gain de 20 points quand on passe de une à quatre trappes.

Il faudrait toutefois se garder d'aller trop loin dans cette direction, car les essais avec des petites bouches espacées de 15 m ont montré une efficacité sensiblement détériorée. L'interdistance de 50 m ne doit pas être loin de l'optimum. Une série d'essais fait apparaître un optimum à 100 m, mais les efficacités sont peu différentes dans ce cas entre les espacements 50 et 100 m.

En conclusion, nous recommandons une interdistance de 50 m des sections d'aspiration lorsque l'objectif est d'extraire les fumées sur 250 m (cas habituel en milieu urbain, qui correspond à nos essais). S'il s'agit d'aspirer les fumées sur 500 m (cas possible en site interurbain), une interdistance de 100 m est sans doute acceptable, étant entendu que l'interdistance de 50 m est vraisemblablement meilleure.

7.4 - Vitesse d'aspiration

L'influence de la vitesse d'aspiration (ou de la section des trappes à débit fixé) apparaît très faible dans la gamme des vitesses qui a été testée : de 3 à 20 m/s. Tout au plus peut-on noter une très légère tendance, dans certains cas, à une baisse d'efficacité quand la vitesse d'aspiration augmente. Mais cela ne joue alors que sur moins de 5 points d'efficacité, et plutôt lorsque la vitesse d'aspiration dépasse 10 m/s.

En conclusion, une vitesse de 10 m/s paraît excellente, mais on peut aller jusqu'à 20 m/s sans perte appréciable d'efficacité.

7.5 - Forme des trappes

Pour des trappes en plafond, les essais ne donnent aucune différence entre 2 m x 1 m et 4 m x 0,5 m, étant entendu que dans les deux cas la plus grande dimension était dans le sens de la largeur.

On retiendra donc que n'importe quelle forme convient, carré ou rectangle, avec de préférence dans ce dernier cas la plus grande dimension dans le sens de la largeur.

Pour une configuration latérale symétrique, les dimensions $L = 2$ m, $H = 0,5$ m montrent un léger avantage sur $L = 1$ m; $H = 1$ m.

On retiendra là encore que la forme importe peu, mais qu'il ne faut pas trop augmenter la hauteur de la trappe dont le bas risque sinon de se rapprocher de l'interface entre fumées et air frais.

7.6 - Soufflage d'air frais dans la zone enfumée

Les essais montrent que le soufflage d'air frais ne réduit que faiblement l'efficacité du désenfumage. Cette détérioration est du même ordre de grandeur que le soufflage se fasse en bas de piédroits ou par jets pariétaux en plafond : de l'ordre de - 5 points par 100 m³/s.km insufflés. Ceci justifie cependant la réduction du débit de soufflage dans la zone de l'incendie à 1/3 du débit maximal, comme il est généralement d'usage.

Malgré sa faible incidence sur l'efficacité de l'extraction, il s'avère que le soufflage par jets pariétaux entraîne des fumées dans la partie basse du tunnel où se situent les usagers et les services de secours. La concentration en fumées peut alors y atteindre 10 % à 20 % suivant l'importance du débit insufflé, contre moins de 2 %, exceptionnellement 5 %, en l'absence de soufflage. Des concentrations de 10 % à 20 % entraînent une perte de visibilité importante, sans préjudice de leur toxicité pour les usagers, et sont vraisemblablement inacceptables. Aussi les essais conduisent-ils à confirmer qu'il faut proscrire tout soufflage d'air frais par jets pariétaux en plafond dans une zone où existe une couche de fumée stratifiée.

La seule solution reste le soufflage en bas de piédroit, si de l'air frais doit réellement être insufflé dans la zone en fumée. Malheureusement nous ne disposons pas de mesures de concentration de fumées en partie basse de tunnel dans ce cas. Notons que la réduction à 1/3 du régime de soufflage ne peut qu'être bénéfique sur ce point aussi.

Rappelons enfin la doctrine du CETU quant à l'insufflation d'air frais dans la zone enfumée : celle-ci n'est jugée nécessaire que si le cantonnement de la ventilation est insuffisant pour maîtriser le courant d'air longitudinal. Dans le cas contraire, l'air frais est apporté par les cantons adjacents qui sont mis en surpression par rapport à la zone enfumée.

8 - PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT

Les études sur maquette qui ont été réalisées ont permis d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement des systèmes de trappes de désenfumage et sur l'influence d'un assez grand nombre de paramètres.

En dépit de 45 essais sur la maquette EPAD et de 80 sur la maquette CETU, on se prend en cours d'interprétation à regretter que des cas supplémentaires n'aient pas été testés. Ceci provient du nombre nécessairement limité d'essais prévu aux deux marchés et aussi du fait que certaines questions ne se sont posées qu'après analyse détaillée des résultats, bien qu'une interprétation ait toujours été réalisée "à l'avancement", au fur et à mesure de la réalisation des essais, afin justement d'orienter les suivants.

Les données supplémentaires dont on souhaiterait disposer concernent principalement une étude plus systématique de l'influence du débit total d'aspiration en configuration latérale (Lsym et Ldissym) sur les deux maquettes : on arrive en effet difficilement à faire des recommandations à ce sujet. D'autre part, on aimerait disposer de mesures de concentrations de fumées beaucoup plus systématiques, à la fois dans l'axe du tunnel et sur les côtés. Cela serait particulièrement appréciable avec soufflage d'air frais en bas de piédroit. De nombreux autres points plus mineurs pourraient également être éclaircis. Cependant l'absence de tous ces éléments ne paraît pas justifier actuellement le coût que représenterait le remontage et la remise en état des maquettes. En revanche, si d'autres maquettes comparables doivent être réalisées pour des projets particuliers, il serait certainement intéressant d'en profiter pour réaliser tout ou partie de ces mesures.

Par ailleurs, les résultats décrits ci-avant méritent de faire l'objet d'études complémentaires en particulier par des approches numériques, soit pour valider des modèles en exploitant les résultats expérimentaux, soit pour approfondir quelques points qui ont posé problème ou qui paraissent insuffisamment étayés pour conclure.

8.1 - Etude de la stabilité des écoulements stratifiés

Les essais de stratification qui ont été réalisés permettent de disposer d'une série de 30 panaches qui présentent suivant les cas une très bonne, une moyenne ou une mauvaise stabilité.

Il pourrait être intéressant de tester, sur la base de ces résultats expérimentaux, la réponse apportée par les modèles numériques utilisés pour les études d'incendie.

Cette étude n'est pas sans intérêt car les modèles numériques sont parfois utilisés pour analyser les conditions de vie à proximité d'un incendie ; par conséquent les conclusions tirées de telles études dépendant étroitement de la qualité des prédictions faites sur la stratification des fumées. Il en est de même de toutes les études portant sur des systèmes de désenfumage de type transversal.

8.2 - Validation de certains résultats particuliers obtenus sur maquette

Nous avons vu au cours de notre analyse des résultats qu'un certain nombre d'entre eux posait problème et qu'il était difficile d'avancer une explication satisfaisante à certains cas paraissant "anormaux". Il s'agit en particulier des essais CETU portant sur la configuration P 1/2 et des essais réalisés avec de très forts débits d'aspiration. Une reprise de ces cas à l'aide de simulations numériques serait utile sinon pour confirmer ou infirmer les résultats, tout au moins pour tenter de mieux les expliquer.

D'autres cas, sans être anormaux, mériteraient aussi d'être approfondis à l'aide de simulations numériques, à savoir :

- les modalités du soufflage d'air frais en zone enfumée,
- l'effet de "poinçonnement" lorsque le débit d'aspiration augmente et la mise en évidence d'un débit critique par point d'aspiration.

8.3 - Comparaison des résultats avec une situation réaliste

L'étude sur maquette a permis de tester les performances de systèmes de trappes de désenfumage sur des panaches stratifiés, sans pertes thermiques, sur une portion réduite de 250 m de tunnel.

Il serait intéressant de comparer ce que donne une telle situation avec une situation plus "réaliste" où l'incendie serait simulé par une source de chaleur, les pertes thermiques prises en compte et la longueur du tunnel étendue à plusieurs cantons de ventilation permettant de tester ainsi l'effet du cantonnement par mise en suspension de cantons adjacents.

Pour que cette simulation soit significative, il faut bien sûr avoir reproduit au préalable l'essai maquette correspondant, pour s'assurer que les résultats numériques et expérimentaux concordent, puis comparer les résultats numériques entre la situation maquette et la situation dite "réaliste".

Rapport établi par P. CHASSE et complété par D. LACROIX sur la base d'un travail conjoint

BIBLIOGRAPHIE

- 1 EPAD - Tunnel A.14 : Etude expérimentale d'un système de désenfumage sur une maquette au 1/15, T. Muller, Framatome, rapport n° MC/TP R93.1081, Mai 1993
- 2 CETU - Tunnel routier : Etude expérimentale d'un système de désenfumage sur une maquette au 1/15, T. Muller, Framatome, rapport n° MC/TP R93.1091/A, Août 1993
- 3 Association Internationale Permanente des Congrès de la Route - Comité des tunnels routiers, Rapport du Congrès de Bruxelles 1987
- 4 Robert D. Blevins, Applied Fluid Dynamics Handbook, Edition Van Nostrand Reinhold
- 5 Heselden, AJM "Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels", Second International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Cambridge, BHRA 1976
- 6 Spratt, D and Heselsden, AJM "Efficient extraction of smoke from a thin layer under a ceiling", Joint Fire Research Organisation Fire Research Note 1001, Fire Research Station, 1974
- 7 Feizlmayr A.H. "Research in Austria on Tunnel Fire", Second International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Cambridge, 1976
- 8 Brandversuche in einem Tunnel, Bundesministerium für Bauten und Technik Strassenforschung, Ingenieurgesellschaft Lässer, Feizlmayr, Wien, 1976
- 9 Tunnel de la Bretelle de Monaco - A.800 - Essais incendie des 15 et 16 Avril 1992, rapport CETU, Janvier 1993
- 10 Barry T. Lubin et George S. Springer "The formation of a dip on the surface a liquid draining from a tank", J. Fluid Mech (1967), vol. 29, part 2, pp. 385-390
- 11 D. Lacroix "Le désenfumage des tunnels routiers en cas d'incendie, 1 - Enjeux et méthodes actuelles", Revue Générale des Routes et Aérodrômes, à paraître en 1994

25, avenue François
Mitterrand
Case n° 1
69674 Bron cedex
Téléphone :
04 72 14 34 00
Télécopie :
04 72 14 34 30
E-mail : [cetu@
equipement.gouv.fr](mailto:cetu@equipement.gouv.fr)

