

Influence de la géométrie d'une source thermique sur le développement du panache

Jérôme Blaise

▶ **To cite this version:**

Jérôme Blaise. Influence de la géométrie d'une source thermique sur le développement du panache. Autre [cond-mat.other]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2008. Français. NNT : 2008NAN10004 . tel-01748346

HAL Id: tel-01748346
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748346

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

U.F.R. Sciences & Techniques
Ecole Doctorale EMMA (Energétique, Mécanique et Matériaux)
Département de Formation Doctorale : Mécanique et Energétique

Thèse

présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I

en Mécanique et Energétique

par **Jérôme BLAISE**

Influence de la géométrie d'une source thermique sur le développement du panache

Membres du jury :

Rapporteurs :	M. Jacques PADET	Professeur, Université de Reims
	M. Francis ALLARD	Professeur, Université de La Rochelle
Examinateurs :	Mme Anne marie BERNARD	Société Allieair
	M. René DEVIENNE	Professeur, U.H.P., Nancy I (Directeur de thèse)
	M. Fabrice LEMOINE	Président du jury Professeur, ENSEM-INPL, Nancy
	M. Paul VALLETTE	Professeur, U.H.P., Nancy I
	M. Jean-Raymond FONTAINE	Ingénieur de recherche, INRS, Nancy

Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée
CNRS UMR 7563 ; 2, Av. De la Forêt de Haye-BP 160 54504 Vandœuvre-lès-Nancy

Institut National de Recherche et de Sécurité, Département Ingénierie des procédés, Laboratoire Ingénierie Aéraulique, AV. de Bourgogne – BP 27 54501 Vandœuvre-lès-Nancy

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier René Devienne et Jean-Raymond Fontaine qui ont accepté de diriger cette thèse et pour le soutien qu'ils m'ont apporté lors de la préparation de ce travail.

Que les rapporteurs Jacques Padet et Francis ALLARD soient assurés de ma gratitude pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Par ailleurs, un grand merci à E. Belut, J. C. Sérieys, F. Bonthoux, R. Braconnier et R. Rapp, pour les conseils avisés qu'ils ont su me donner tout au long de mes recherches. Merci aussi à Messieurs J. C. Cunin et F. Henry ainsi que l'ensemble des personnels de l'INRS pour l'aide technique qu'ils m'ont apporté pendant toute la durée de mon projet.

Une petite pensée également pour l'ensemble des stagiaires qui ont contribué à animer l'ambiance de travail, soit, par ordre chronologique : Laetitia Soudre, Manuel Schaff et Dominique Lains.

Résumé

Ce rapport présente l'étude expérimentale du développement d'un panache thermique dans un milieu confiné et ventilé. Cette situation est rencontrée dans les installations de la ventilation par déplacement. Les expériences ont été effectuées dans une cellule d'essai aéraulique d'une surface au sol de 4,8 x 4,2 m^2 et d'une hauteur de 5,6 m. Les sources de chaleur utilisées sont un cylindre de 1 m de diamètre constitué de cinq éléments d'aires identiques (4 surfaces cylindriques identiques superposés et un disque supérieur) et une source rectangulaire composée de 4 modules de dimensions 0,25 x 1,5 m où seule la surface supérieure est chauffée. Les expériences sont conduites par mesure de température et de vitesse et en l'absence de stratification.

Après une large qualification du nouveau système métrologique composé d'un dispositif d'acquisition permettant la mesure simultanée des vitesses par 16 sondes thermoanémométriques et des températures par 64 thermocouples, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus pour la source cylindrique et la source rectangulaire. L'objectif est d'étudier l'influence de la géométrie de la source sur les lois de développement de panache. Ainsi, pour chaque configuration de source, nous étudions et comparons les paramètres suivants : la position et la vitesse au centre du panache, l'écart de température entre le centre du panache et l'extérieur, la forme et le rayon elliptique du panache pour différentes hauteurs au-dessus de la source. Ces paramètres sont obtenus à partir de l'application du modèle gaussien elliptique aux mesures expérimentales de température et de vitesse. De plus, nous comparons également la position de l'origine virtuelle et la valeur du débit du panache pour les différentes configurations de source et nous étudions l'influence de la géométrie de la source sur ces paramètres. Ainsi, nous avons pu établir des lois théoriques qui nous donnent la position de l'origine virtuelle en fonction de la hauteur de chauffe dans le cas de la source cylindrique et de la largeur de la source dans le cas de la source rectangulaire. La valeur de la position de l'origine virtuelle présente un grand intérêt pour le calcul des débits de panaches et le dimensionnement des systèmes de captage.

Les différentes mesures effectuées ont permis également de vérifier les modèles théoriques de la source ponctuelle et de la source linéaire pour les différents cas étudiés.

Un calcul d'erreur sur la mesure de température et de vitesse est présenté pour chaque configuration et nous donne l'erreur sur le rayon elliptique du panache, le débit et la position de l'origine virtuelle.

Sommaire

Nomenclature
1 Introduction 1
1.1 Positionnement, missions et statut ……..….2
1.1.1 Historique et statut ……..2
1.1.2 Principales activités ...…….2
1.1.3 Le laboratoire d'ingénierie aéraulique ……3
1.2 Contexte de l'étude ….……...…4
1.2.1 Travaux antérieurs ……..4
1.2.2 Développements proposés ……..……4
1.2.3 Objectifs de la thèse …..……5

2 Etude bibliographique 6
2.1 Principe de la ventilation par déplacement ...……7
2.2 Panache en convection naturelle ……8
2.2.1 Panache issu d'une source de chaleur ponctuelle ..……8
2.2.2 Panache issu d'une source de chaleur linéaire ...……13
2.2.3 Panache développé en milieu confiné et ventilé ……16
2.2.4 Caractérisation de la thermocline installée en enceinte ventilée ……20
2.2.5 Hauteur de la thermocline ……25
2.3 Conclusion ……28

3 Installations expérimentales 29
3.1 Cellule aéraulique ……..30
3.1.1 Chambre d'expérience ...……30
3.1.2 Système de traitement et de ventilation d'air ..……31
3.1.3 Caractéristiques de fonctionnement ……32
3.1.4 Système de déplacement 3D ……..32
3.2 Source thermique ……33
3.2.1 Source thermique cylindrique ……33
3.2.2 Source thermique rectangulaire ..……34
3.3 Métrologie ...……..37
3.3.1 Mesures reliées à la source ……37
3.3.2 Mesure de la température d'air dans le panache ……38
3.3.3 Mesure de la vitesse d'air dans le panache ……38
3.3.4 Système d'acquisition ……38
3.3.5 Présentation de la matrice de capteurs ……..39
3.4 Méthodes ……40
3.4.1 Modèle gaussien elliptique ……40
3.4.2 Débit volumique entraîné par un panache elliptique ……41
3.4.3 Excès d'enthalpie dans un panache elliptique ...……41
3.4.4 Modèle du rayon de panache r(z) et du différentiel de température ΔT_c ..…..42
3.4.5 Calcul d'erreur ……..42

4 Qualification **46**
4.1 Introduction ……47
4.2 Qualification du système de mesure ……..47
4.2.1 Ancienne métrologie ……..47
4.2.2 Nouvelle métrologie ..……48
4.2.3 Paramètres expérimentaux ……49
4.2.4 Résultats expérimentaux ..…….50
4.2.5 Conclusion ……56
4.3 Qualification de la source rectangulaire ……56
4.3.1 Configuration expérimentale ..……56
4.3.2 Résultats ...……....56

5 Résultats expérimentaux **59**
5.1 Source cylindrique .....……60
5.1.1 Introduction ……60
5.1.2 Configuration expérimentale .....……60
5.1.3 Comparaison des résultats expérimentaux obtenus à partir du modèle .....…..62
gaussien elliptique pour les 5 cas étudiés
5.1.4 Estimation de l'origine virtuelle ...……70
5.1.5 Estimation du débit d'air emporté par le panache ….……74
5.1.6 ΔT_c, w_c, Q en fonction de $z - z_v$ .....……....74
5.1.7 Comparaison entre les débits théoriques et les débits .....……...76
expérimentaux d'air emportés par le panache
5.1.8 Evaluation de l'excès d'enthalpie du panache .....……..77
5.1.9 Influence de la géométrie de la source sur les paramètres Q, ΔT_c, w_c ...……78
5.1.10 Erreur de mesure ...……80
5.1.11 Conclusion ……90
5.2 Source rectangulaire ……91
5.2.1 Introduction ……91
5.2.2 Configuration expérimentale ……..91
5.2.3 Comparaison des résultats expérimentaux obtenus à partir du modèle ...……94
gaussien elliptique pour les 4 cas étudiés
5.2.4 Estimation de l'origine virtuelle .....……102
5.2.5 Evaluation de l'excès d'enthalpie du panache ……106
5.2.6 Vérification du modèle théorique ……107
5.2.7 Erreur de mesure .....…….....……..108
5.2.8 Conclusion .....……116
5.3 Source rectangulaire : étude de la transition source linéique/source ponctuelle …..117
5.3.1 Introduction ..……117
5.3.2 Configuration expérimentale ……117
5.3.3 Comparaison des résultats expérimentaux pour les cas étudiés .....……118
5.3.4 Influence de la géométrie de la source sur les paramètres Q, ΔT_c, w_c ...…..123
5.3.5 Conclusions ...……125
5.4 Comparaison source cylindrique/source rectangulaire ……126
5.4.1 Cas 1 source cylindrique/2 sources rectangulaires .....……126
5.4.2 Cas 1, 2, 3, 4, 5 source cylindrique/cas 3 sources rectangulaires et .....….128
cas 4 sources rectangulaires

6 Conclusions **129**

Annexe 1 : Justification de l'incertitude sur la mesure de température (0,4°C) et sur la mesure de vitesse (0,02 m/s) **132**

1.1 Introduction 132

1.2 Fluctuation temporelle 132

1.3 Répétitivité des mesures 133

1.4 Conclusion 136

Bibliographie **137**

Nomenclature

a, b	rayons dynamiques du panache pour lequel la vitesse w_b est liée à la vitesse axiale par : $w_b = \frac{w_c}{e} (e = 2{,}718...)$ (m)
a_T, b_T	rayons thermiques du panache pour lequel l'écart de température entre le centre du panache et l'air environnant vaut $\frac{\Delta T_c}{e} (e = 2{,}718...)$ (m)
B	flux de flottabilité ($m^4.s^{-3}$)
B_s	flux de flottabilité à la source ($m^4.s^{-3}$)
Cp	chaleur massique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
$C_{T,r}$	fonction d'intercorrélation radiale
$C_{T,z}$	fonction d'intercorrélation axiale
D_s	diamètre de la source (m)
F	facteur d'aplatissement des fluctuations de concentration ou de température
g	accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)
$G = g\beta \frac{dT_\infty}{dz}$	gradient de température réduit du milieu environnant (s^{-2})
Gr	nombre de Grashof
h	coefficient moyen d'échange superficiel ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
K	coefficient de débit du panache $K = Q\ P_c^{-1/3} z^{-5/3}$ ($m^{4/3}.s^{-1}.W^{-1/3}$)
L_r	échelle de longueur radiale des structures du panache (m)
L_{rm}	échelle moyenne de longueur radiale des structures du panache (m)
L_z	échelle de longueur axiale des structures du panache (m)
Nu	nombre de Nusselt
p	pente de la droite r = p*(Δz-zv)
P_c	puissance convective d'une source thermique (W)
P_R	puissance rayonnée d'une source thermique (W)
P_t	puissance totale consommée par une source thermique (W)
P_{tra}	puissance absorbée par l'air traversant la cellule (W)
Pr	nombre de Prandtl
Q	débit du panache ($m^3.s^{-1}$)
Q_v	débit de ventilation ($m^3.s^{-1}$)
r	direction radiale (m)
Ra	nombre de Rayleigh
S	facteur de dissymétrie des fluctuations de concentration ou de température
$\Delta T = \overline{\Delta T} + t'$	décomposition en valeur moyenne et fluctuante de la différence de température entre le panache et l'air environnant au même niveau (K)
$T' = dT_\infty/dz$	gradient de température du milieu environnant ($K.m^{-1}$)
ΔT_c	écart de température entre le centre du panache et l'air environnant au même niveau (K)

T_a	température du milieu ambiant (°C)
T_R	température de reprise d'air de la cellule d'essai (°C)
T_s	température de la source de chaleur (°C)
T_v	température de soufflage d'air dans la cellule d'essai (°C)
T_∞	température du milieu environnant (°C)
$u = \bar{u} + u'$	décomposition de la vitesse radiale en valeur moyenne et fluctuation turbulente ($m.s^{-1}$)
V_p	vitesse de propagation des structures turbulentes du panache ($m.s^{-1}$)
$w = \bar{w} + w'$	décomposition de la vitesse verticale en valeur moyenne et fluctuation turbulente ($m.s^{-1}$)
w_c	vitesse au centre du panache ($m.s^{-1}$)
X	variable adimensionnelle caractérisant la loi de développement du panache
z	direction verticale (m)
z_i	hauteur de stratification (m)
z_v	position de l'origine virtuelle du panache (m)

Lettres grecques :

α	facteur d'entraînement dynamique pour un panache
α_T	facteur d'entraînement thermique pour un panache
β	coefficient volumique d'expansion thermique (K^{-1})
ε	émissivité
κ	conductivité thermique ($W.K^{-1}.m^{-1}$)
$\lambda=b_T/b$	rapport entre les rayons b_T du profil de température et b du profil de vitesse
$\lambda_a=a_T/a$	rapport entre le rayon thermique a_T et le rayon dynamique a pour un panache elliptique
$\lambda_b=b_T/b$	rapport entre le rayon thermique b_T et le rayon dynamique b pour un panache elliptique
ν	viscosité cinématique ($m^2.s^{-1}$)
ρ	masse volumique ($kg.m^{-3}$)
σ	écart type des fluctuations de concentration ou de température
τ	retard incrémental d'une fonction d'intercorrélation (s)
τ_m	retard incrémental optimal (s)
Φ	puissance thermique (W)
Φ_z	excès d'enthalpie dans le panache à la hauteur z (W)

Indices :

a	ambiant
c	sur l'axe du panache
f	conditions du film
i	interface
s	source
∞	pour les grandes distances radiales de l'axe du panache

Chapitre 1

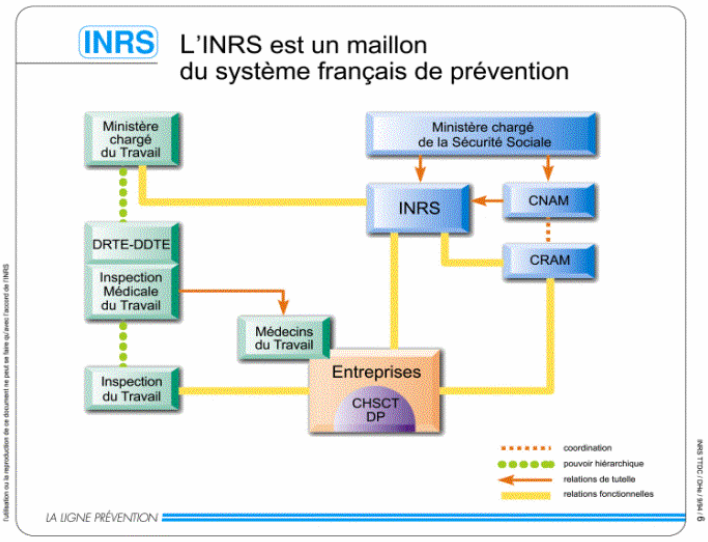
Introduction

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre d'une convention CIFRE, passée entre l'Association Nationale de la Recherche Technique (ANRT), l'INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des maladies professionnelles et des accidents de travail, et le LEMTA, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (UMR CNRS 7563)

1.1 L'INRS : positionnement, missions et statut

1.1.1 Historique et statut

L'Institut National de Sécurité (INS), créé en 1947 par la sécurité sociale, est devenu en 1968 l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS).



L'INRS est une association régie par la loi 1901 ; elle est placée sous la tutelle du Ministère chargé de la Sécurité Sociale et de la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (CNAMTS). Elle exerce son activité dans le cadre de la politique de prévention des risques professionnels qui est sous la responsabilité des ministères chargés du Travail et de la Sécurité Sociale. La prévention des risques professionnels en France est un système dual constitué d'un côté par les Pouvoirs Publics et de l'autre, par l'Assurance Sociale.

Le budget de l'INRS (68 M€) provient en presque totalité de subventions de la CNAM prélevées sur le fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. Ce fond est lui-même alimenté par un prélèvement sur les cotisations AT – MP (Accident du Travail et Maladie Professionnelle) payées par les entreprises.

L'INRS emploie plus de 650 personnes réparties sur 2 sites :

- ✓ 200 personnes au centre de Paris (siège social)
- ✓ 450 personne à Vandoeuvre-les-Nancy et Neuves-Maisons

1.1.2 Principales activités

L'INRS a pour rôle de contribuer sur le plan technique à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles pour assurer la protection de la santé et de la sécurité de l'homme au travail. L'institut se doit d'une part d'aider les acteurs de terrain à résoudre les problèmes de prévention auxquels ils sont confrontés et d'autre part, d'anticiper les besoins futurs en prévention, en développant des connaissances nouvelles, en transformant des connaissances existantes internes ou externes en savoirs pratiques.
Sur le plan opérationnel, les activités de l'INRS sont organisées en quatre secteurs :

- ➢ **Etudes et recherches**

Avec 40% de l'activité totale, elle représente la mission principale de l'INRS. Des recherches sont donc menées pour mieux connaître les risques professionnels, analyser leurs conséquences pour la santé de l'homme au travail et proposer les moyens de leur prévention. Les compétences scientifiques, techniques et médicales de l'institut sont regroupées au sein

de quinze départements qui couvrent une très grande variété de disciplines : acoustique, automatique, biologie, chimie, électricité, électronique, épidémiologie, ergonomie, génie civil, hydraulique, informatique, physiologie, productique, sécurité des systèmes, ventilation, toxicologie.

- **Assistance**

Une assistance médicale, technique et documentaire est assurée par les experts de l'INRS qui répondent à des demandes de conseils émanant aussi bien des organismes de Sécurité Sociale, des entreprises, que des services de médecine du travail. Ils participent également à des groupes de normalisation, aux niveaux français et européen, ainsi qu'à l'élaboration de textes de références.

- **Information**

L'INRS informe pour sensibiliser aux risques professionnels et au moyen de leur prévention par l'édition de brochures et d'affiches, par la publication de cinq périodiques, par la réalisation de produits multimédias, par l'organisation de colloques et de journées techniques et enfin, par des actions auprès du grand public (campagnes, stands d'exposition).

- **Formation**

L'INRS assure la formation continue des spécialistes de la prévention dans ses domaines de compétences. Ces formations sont destinées aux ingénieurs et aux contrôleurs des CRAM, aux médecins du travail, aux personnels d'entreprises, à l'Education Nationale (enseignement technique, professionnel et écoles d'ingénieurs), aux organismes de formation…

1.1.3 Le laboratoire d'Ingénierie Aéraulique

Le laboratoire « Ingénierie Aéraulique » (composé de 7 permanents) fait partie du département « Ingénierie des Procédés » (IP) qui entre dans le cadre opérationnel du secteur d'activité Etudes et Recherches de l'INRS. Il a pour objectif de rechercher, d'étudier et de promouvoir des solutions de prévention dans le but de répondre aux problèmes d'exposition aux polluants chimiques sous leurs diverses formes (gaz, aérosols liquides et solides). Le département IP privilégie les solutions qui conduiront à une maîtrise « amont » de la source de pollution.

La mission du laboratoire IA est de proposer des solutions de prévention, basées sur la ventilation, pour maîtriser l'exposition des salariés aux substances dangereuses et à la chaleur. Ses activités principales concernent la mise au point de méthodes utilisables pour l'évaluation et la conception de système d'assainissement de l'air des postes et locaux de travail.
Une priorité est donnée aux travaux visant à mettre en œuvre, dans le domaine de la prévention, les méthodes de l'ingénierie aéraulique : qualité de la métrologie en laboratoire et sur site, mise au point et validation des méthodes de conception basées sur la simulation, domaine de validité des modèles aérauliques simplifiés.

1.2 Contexte de l'étude

De nombreux procédés industriels utilisent ou génèrent des sources chaudes : fours de fusion ou de cuisson, tunnels de séchage, presses à injecter, procédés d'extrusion soufflage, traitement de surface, soudage, fabrication de papier…). Les dégagements de chaleur s'accompagnent généralement d'une dispersion de polluants dans l'atelier. Ainsi, la caractérisation des panaches de convection naturelle des sources thermiques est nécessaire au dimensionnement des installations de ventilation pour l'assainissement des ambiances de travail (évacuation des polluants et de la chaleur). Que ce soit pour concevoir un captage localisé (hotte) ou une ventilation générale par déplacement d'air, il importe de connaître le débit, la température et la taille des panaches présents. Actuellement aucune méthode ou aucun guide ne sont disponibles pour que l'industriel ou le préventeur (ingénieur conseil, responsable sécurité, médecin du travail) puissent définir un cahier des charges, formuler une recommandation ou effectuer le contrôle d'une telle installation ; la demande de terrain est donc très forte.

1.2.1 Travaux antérieurs

Dans le cadre d'un travail de thèse précédant, l'INRS a mis au point une méthode expérimentale pour caractériser en vraie grandeur le panache de sources thermiques de géométrie simple.
Un banc d'essais a été réalisé et instrumenté à cet effet. Il est constitué d'une cellule aéraulique dont les dimensions sont 4,2 m x 4,8 m x 5,6 m équipé d'une centrale de traitement d'air et d'un système de ventilation permettant un déplacement vertical des flux d'air. Le système peut fonctionner en circuit ouvert (recyclage) ou fermé ; le débit de ventilation peut varier dans la gamme 2000 – 10000 m^3/h. La cellule est équipée d'un robot de déplacement tridimensionnel permettant le positionnement de sondes de température ou d'un anémomètre laser en tout point du volume.
Des sources thermiques dont la dimension caractéristique est de l'ordre du mètre ou des machines réelles peuvent être étudiées dans l'installation ; les puissances thermiques acceptables doivent être inférieures à 20 kW.
Des lois d'échelle pour exprimer à différentes hauteurs le débit et le diamètre du panache en fonction de la puissance thermique et de la taille de la source ont été obtenues. Les résultats actuels sont limités aux sources circulaires (disques chauffés). Ils ont été obtenus en milieu infini ou au contraire en milieu stratifié.

1.2.2 Développements proposés

Les expérimentations réalisées jusqu'à présent se sont limitées à la mesure du champ de température au-dessus de sources de géométrie simple (disques chauffés). Les valeurs de débit du panache résultent d'une mesure indirecte basée sur la position d'une thermocline dans la cellule. Une caractérisation du panache a été obtenue tant dans la zone lointaine (hauteur par rapport à la source supérieure au double du diamètre de la source) que dans la zone proche. Dans la zone lointaine, une loi de panache pleinement développé est applicable alors que dans la zone proche (zone d'intérêt en hygiène industrielle puisqu'elle correspond typiquement à la zone occupée par les salariés d'un atelier contenant des machines dont les dimensions sont de l'ordre du mètre), la loi de panache fait intervenir un paramètre géométrique supplémentaire, le diamètre de la source.

1.2.3 objectifs de la thèse

Pour pouvoir disposer de règles de dimensionnement applicables au problème de prévention initialement décrit, il importe de consolider les résultats antérieurs dans quatre directions :

- **Etudier l'influence de la géométrie de la source sur les lois de développement de panache, en particulier dans la zone proche.**

Pour une même puissance thermique convectée, la géométrie des sources sera variée pour identifier son influence sur le développement du panache. Une source cylindrique composée de cinq éléments d'aires identiques (4 cylindres identiques superposés et un disque supérieur) régulés indépendamment en température permettra de mener des études paramétriques sur des sources tridimensionnelles. De manière similaire, une source rectangulaire modulable sera utilisée pour analyser et modéliser des panaches non axisymétriques dans la zone proche.

- **Caractériser la distribution des vitesses d'air dans le panache**

La méthode expérimentale actuellement utilisée à l'INRS pour déterminer le débit du panache à différentes hauteurs par rapport à la source est basée sur le repérage de la hauteur de thermocline dans une enceinte ventilée à débit ajustable. La méthode est peu précise notamment à cause de l'épaisseur de la thermocline et des fluctuations de température en son sein. Le débit du panache étant un paramètre fondamental nécessaire à la conception des systèmes de ventilation, une méthode directe d'évaluation de ce paramètre sera mise en œuvre par exploration du champ de vitesses au-dessus de la source. Une étude de faisabilité devra être menée pour déterminer le système de vélocimétrie le mieux adapté : sondes thermoanémométriques, anémomètre laser doppler, vélocimétrie à images de particules.

- **Stabilité de la position du panache**

Pour certains régimes thermoanémométriques, des instabilités peuvent être à l'origine d'un déplacement du panache par rapport à la source. Des méthodes seront initiées pour caractériser les régimes d'instabilité et pour évaluer les fluctuations spatio-temporelles correspondantes du centre du panache. Ces phénomènes doivent être pris en compte dans la conception des systèmes de captage puisqu'ils peuvent être à l'origine de l'échappement de bouffées de polluant dans les ambiances de travail.

Chapitre 2

Etude bibliographique

Après avoir décrit le principe de la ventilation par déplacement (VPD), nous rappellerons les principales formulations concernant le développement d'un panache au-dessus d'une source thermique considérée ponctuelle en milieu infini et en milieu stratifié. Les lois de développement de panache en milieu infini au-dessus d'une source thermique linéaire sont également présentées.
Nous évoquerons ensuite les expériences de VPD conduites en milieu confiné pour examiner de plus près les différentes méthodes de caractérisation de la stratification éventuellement produite dans de tels cas.

2.1 Principe de la ventilation par déplacement

Si une ou plusieurs sources de chaleur sont placées dans un local, chacune d'elles génère par convection naturelle un panache thermique. Dans leur développement, chacun de ces panaches emporte un débit d'air ambiant Q qui croit au fur et à mesure de son élévation dans le local. Le principe de la ventilation par déplacement est d'apporter à faible vitesse et en partie basse un débit Q_v d'air neuf et extraire ce même débit en partie haute pour pouvoir ainsi ventiler le local (voir figure 2.1).

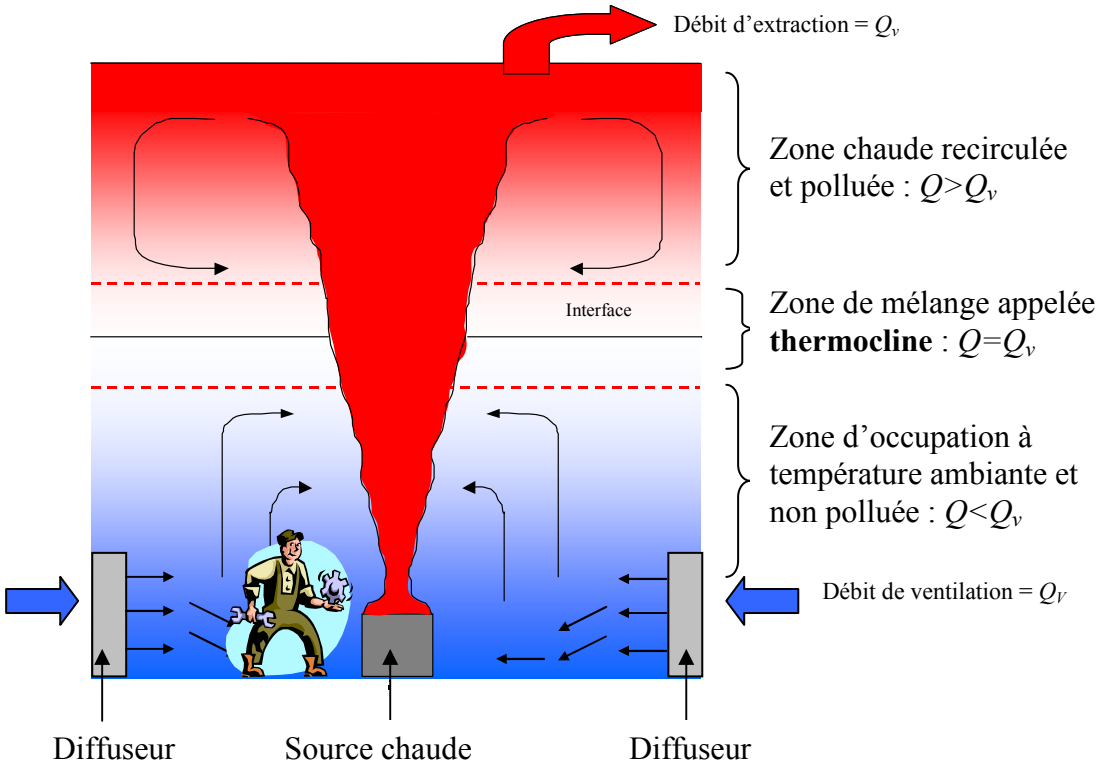


Figure 2.1 : Principe de la ventilation par déplacement

D'après la figure 2.1, si Q_v est inférieur au débit Q emporté par le panache au niveau du plafond, il s'établit dans le local une stratification verticale en température. Le régime permanent fait ainsi apparaître trois zones :

- une zone d'occupation à température ambiante et non polluée : $Q < Q_v$
- une zone de mélange appelée **thermocline** : $Q = Q_v$
- une zone chaude recirculée et polluée : $Q > Q_v$

Si les sources thermiques sont également sources de polluants, ces derniers restent confinés dans les panaches et dans la zone située au-dessus de la thermocline.

2.2 Panache en convection naturelle

2.2.1 Panache issu d'une source de chaleur ponctuelle

a) Théorie du panache développé en milieu infini

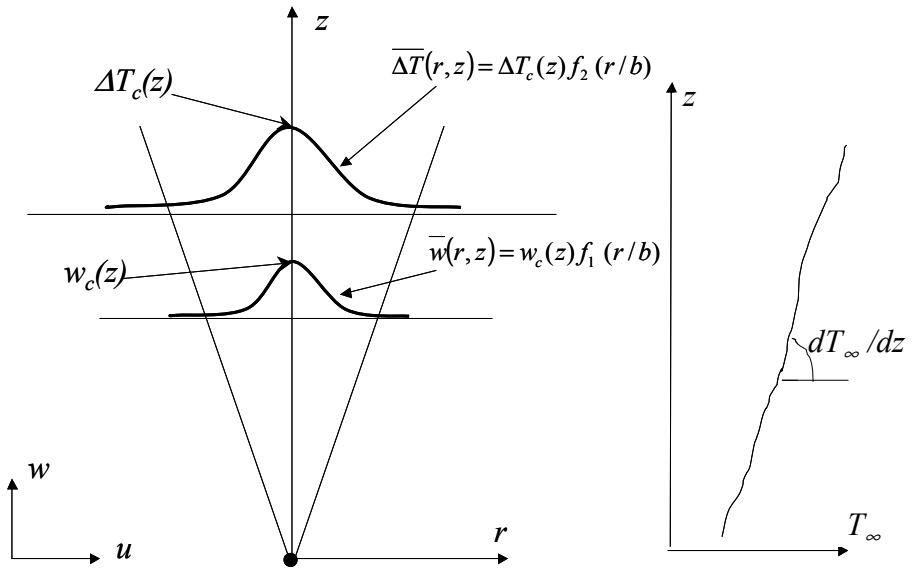


Figure 2.2 : Représentation schématique d'un panache axisymétrique

Les équations fondamentales de la dynamique des fluides sont applicables au cas du développement d'un panache thermique supposé turbulent issu d'une source de chaleur considérée comme ponctuelle et placée dans un milieu infini (voir figure 2.2). Les équations de Navier-Stokes sont généralement écrites sur la base de l'approximation de Boussinesq pour ce qui est de la force de flottabilité.

Hypothèses pour résoudre les équations de conservations :

Moyennant l'hypothèse d'axisymétrie et en négligeant les contraintes visqueuses devant les contraintes de Reynolds, il est possible de trouver une solution auto similaire pour les champs thermiques et dynamiques :

$$\overline{w}(r,z)=w_c(z)f_1\,(r/b)=w_c(z)e^{-\left(\frac{r}{b(z)}\right)^2} \tag{2.1}$$

$$\overline{\Delta T}(r,z)=\Delta T_c(z)f_2\,(r/b)=\Delta T_c(z)e^{-\left(\frac{r}{\lambda b(z)}\right)^2} \tag{2.2}$$

avec les notations suivantes :
w_c : vitesse au centre du panache
ΔT_c : écart de température entre le centre du panache et l'air environnant au même niveau
b : rayon dynamique du panache
$\lambda=b_T/b$: rapport entre les rayons b du profil de vitesse et b_T du profil de température.

Ces formules ont été proposées par Batchelor [1] ; Selon Taylor [2], le terme $\left[\overline{ru}\right]_\infty$ peut être lié à w_c et b par l'intermédiaire du facteur d'entraînement α :

$$-\left[\overline{ru}\right]_\infty = \alpha w_c b$$

Le facteur d'entraînement α caractérise le débit emporté par le panache à chaque niveau. Il caractérise également l'ouverture du panache qui peut être déterminée expérimentalement.

Pour un environnement sans gradient de température ($\frac{dT_\infty}{dz} = 0$), on montre, par intégration des équations de conservations et en tenant compte des hypothèses précédentes, les expressions suivantes :

$$b = \frac{6\alpha}{5} z \tag{2.3}$$

$$w_c = \left(\frac{3g\beta\left(\lambda^2+1\right)}{2\pi\rho_\infty C_p}\right)^{1/3} \left(\frac{6\alpha}{5}\right)^{-2/3} P_c^{1/3} z^{-1/3} \tag{2.4}$$

$$\Delta T_c = \frac{2}{3g\beta\lambda^2}\left(\frac{3g\beta\left(\lambda^2+1\right)}{2\pi\rho_\infty C_p}\right)^{2/3} \left(\frac{6\alpha}{5}\right)^{-4/3} P_c^{2/3} z^{-5/3} \tag{2.5}$$

Le débit emporté par le panache s'écrit alors :

$$Q = \pi b^2 w_c = \pi\left(\frac{3g\beta\left(\lambda^2+1\right)}{2\pi\rho_\infty C_p}\right)^{1/3} \left(\frac{6\alpha}{5}\right)^{4/3} P_c^{1/3} z^{5/3} \tag{2.6}$$

Dans les conditions habituelles d'un local industriel, on retient généralement les propriétés de l'air ambiant à 20 °C et pression atmosphérique :

T_a (°C)	β (K^{-1})	ρ_∞ ($kg.m^{-3}$)	C_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
20	$3{,}4\ 10^{-3}$	1,206	1005

Tableau 2.1 : Propriétés de l'air ambiant à 20 °C et pression atmosphérique

Les observations expérimentales ont conduit beaucoup d'auteurs à retenir en première approximation les valeurs $\lambda=1$ et $\alpha=0{,}1$. En utilisant les propriétés de l'air à 20 °C, on obtient les expressions approchées suivantes :

$$b = 0{,}12z \tag{2.7}$$

$$w_c = 0{,}122 P_c^{1/3} z^{-1/3} \tag{2.8}$$

$$\Delta T_c = 0{,}298 P_c^{2/3} z^{-5/3} \tag{2.9}$$

Où z et P_c doivent respectivement être exprimés en mètre et en Watt.

On obtient également l'expression souvent utilisée pour estimer le débit emporté par un panache thermique dans l'air (Skaret [3], Skistad [4], Mundt [5]) :

$$Q = K P_c^{1/3} z^{5/3} \tag{2.10}$$

où K est un coefficient qui, avec les suppositions précédentes, vaudrait :

$K=5,5.10^{-3}$ ($m^{4/3}.s^{-1}.W^{-1/3}$)

Ce coefficient *K* présent dans l'expression du débit résulte, bien entendu, du jeu de valeurs adopté pour le rapport λ entre le rayon dynamique et le rayon thermique et pour le facteur d'entraînement α. Les vérifications expérimentales des formules établies sont nombreuses, George et al. [8] ont testé le cas d'un jet d'air chaud dans de l'air au repos et ont montré l'importance du phénomène de turbulence. Le tableau ci dessous présente un résumé des résultats obtenus dans différents travaux.

Etude de :	Nature des mesures	Cellule d'essai	λ	α	Coefficient *K*
Rouse et al. [6]	Mesure de vitesse par anémomètre à vanne et mesure de température par thermocouple	Aéraulique, brûleur à gaz	1,163	0,099	0,0047*
Nakagome et Hirata [7]	Mesure de vitesse par anémomètre à fil chaud et mesure de température par thermomètre à résistance	Aéraulique, disque chauffé	0,964	0,100	0,0057*
George et al. [8]	Mesure de vitesse par anémomètre à fil chaud et mesure de température par thermomètre à résistance (fil froid)	Aéraulique, jet d'air chauffé	0,919	0,103	0,0063*
Papanicolaou et List [9]	Mesure de vitesse par vélocimétrie laser Doppler et mesure de concentration par fluorescence induite par laser	Hydraulique, jet de solution saline dans de l'eau pure	1,126	0,088	0,0047*
Kofoed et Nielsen [10]	Mesure de vitesse par anémométrie basse vitesse (sphère chaude) et mesure de température par thermocouples	Aéraulique, tube chauffé dans l'air	0,978	0,078	0,0040*
Skåret [3]	non disponible (ND)	Aéraulique	ND	ND	0,0050
Auban [11]	Mesure de vitesse par vélocimétrie laser Doppler et mesure de concentration par fluorescence induite par laser	Hydraulique, diffusion de solution saline dans de l'eau pure	0,77	0,085	0,0042

* coefficient recalculé d'après les données de l'auteur.

Tableau 2.2 : Comparaison entre les résultats expérimentaux de différents auteurs concernant le coefficient d'entraînement, le rapport λ entre les rayons dynamique et thermique et le coefficient K

Les résultats concernant les deux facteurs λ et α montrent une assez grande dispersion que l'on peut vraisemblablement rattacher aux différences des conditions expérimentales. Ces dernières peuvent ainsi influencer de façon significative sur l'expression du débit.

b) Cas d'un panache développé dans un milieu infini continûment stratifié

Dans la réalité, en milieu infini comme en milieu confiné, les panaches se développent souvent dans une atmosphère dont la température varie avec la hauteur. On cherche ici à préciser ce développement en admettant une variation de température de l'air environnant de la forme $\frac{dT_\infty}{dz} = Cz^p$ (*C*=constante).

Si C est négatif, les équations de conservations peuvent être intégrées (Mundt [5], mais nous ne présenterons pas les solutions car elle ne présente pas grand intérêt dans les problèmes de ventilations de locaux industriels. En effet si C est négatif, la température en haut est moins élevé que la température en bas, c'est le cas dans l'atmosphère.
Dans cette situation, le panache aura, à une hauteur z, une flottabilité plus grande qu'à celle observée en milieu infini uniforme. Il sera ainsi plus étiré et ne sera pas limité en altitude dans son développement.

Si C est positif, il n'y a pas de solution analytique, Morton et al. [12] proposent une solution numérique en mettant les équations sous forme adimensionnelle. Pour cela ils

utilisent comme grandeurs fondamentales, le flux de flottabilité à la source, $B_s = \frac{g\beta}{\rho_\infty C_p} P_c$ ($m^4.s^{-3}$) et le gradient de température réduit sous la forme : $G = g\beta \frac{dT_\infty}{dz}$ (s^{-2}).

En supposant que λ vaut 1, ils définissent alors les variables adimensionnelles suivantes :

- ✓ pour la cote z :

$$z_1 = 2^{7/8}\pi^{1/4}\alpha^{1/2}B_s^{-1/4}G^{3/8}z \quad (2.11)$$

- ✓ pour le rayon dynamique *b* :

$$b_1 = 2^{-1/8}\pi^{1/4}\alpha^{-1/2}B_s^{-1/4}G^{3/8}b \quad (2.12)$$

- ✓ pour la vitesse au centre du panache v_0 :

$$w_{c1} = 2^{-5/8}\pi^{1/4}\alpha^{1/2}B_s^{-1/4}G^{-1/8}w_c \quad (2.13)$$

- ✓ pour l'écart de température avec le milieu ambiant ΔT_0 :

$$\Delta T_{c1} = 2^{-1/8}\pi^{1/4}\alpha^{1/2}B_s^{-1/4}G^{5/8}(g\beta\Delta T_c) \quad (2.14)$$

Les résultats de ce modèle sont présentés sur la figure (2.3).

On peut remarquer que jusqu'à z_1=2, le rayon du panache évolue pratiquement linéairement et que les solutions trouvées ne diffèrent pas sensiblement du cas où le milieu ambiant n'est pas stratifié. Au-delà de cette valeur, du fait de la diminution des forces de flottabilité, le panache s'étale sur un plan horizontal. Le panache atteint ainsi une altitude où la notion d'entraînement devient très discutable. Du fait de sa quantité de mouvement, le panache continue de s'élever au-dessus du niveau de flottabilité nulle jusqu'à z_1=2,8: il se forme un dôme où la masse volumique est constante sur une section droite. Sachant que la hauteur maximale atteinte par le panache est caractérisée par z_1=2,8, on peut en déduit que $z_{max} = 1{,}148\alpha^{-1/2}B_s^{1/4}G^{-3/8}$. La schématisation de Kofoed et Nielsen [10] (figure 2.4) illustre ce cas de développement de panache thermique.

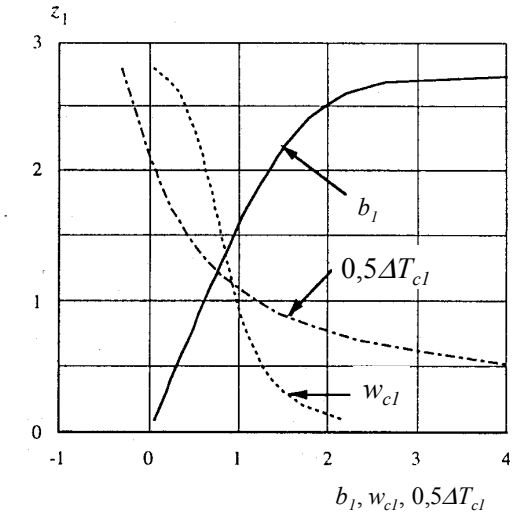


Figure 2.3 : Solutions adimentionnées pour un panache développé en milieu stratifié (d'après Morton et al. [12]).

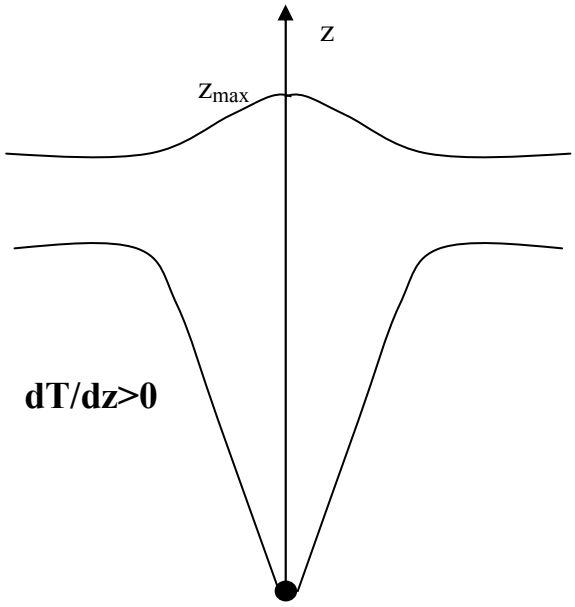


Figure 2.4 : Schéma d'un panache dans un milieu à variation linéaire de température (D'après Kofoed et Nielsen [10]).

c) Panache issu d'une source de chaleur de dimension finie en milieu infini

Toutes les théories citées précédemment concernent le développement d'un panache au-dessus d'une source supposée ponctuelle. Les expériences montrent en effet que, à une assez grande distance d'une source quelconque, le développement du panache ne dépend plus des caractéristiques de cette dernière. L'évolution linéaire du rayon du panache avec l'altitude permet ainsi de le comparer à un panache issu d'une source ponctuelle. Pour préciser les lois de formation du panache Jaluria et Gebhart ([13], [14], [15]) l'ont étudié à proximité d'une source de dimension finie. Ils ont montré que le panache, au voisinage de la source, se développe de façon laminaire jusqu'à une certaine hauteur de l'ordre de la taille de la source. Au-delà de cette hauteur, et après une zone de transition, le panache devient turbulent et s'ouvre au fur et à mesure de son élévation. Dans le même contexte, Kofoed et Nielsen [10] ont distingué trois zones dans l'évolution du panache (figure 2.5).

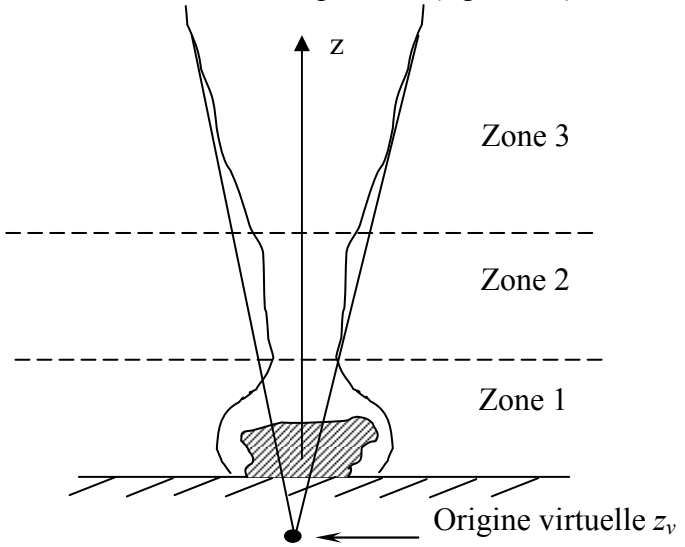


Figure 2.5 : Description en trois zones d'un panache développé au-dessus d'une source non ponctuelle et notion de l'origine virtuelle (d'après Kofoed et Nielsen [10])

Dans la première zone, la description dépend essentiellement de la nature, de la géométrie et des caractéristiques de la source. Dans la deuxième, dite zone de transition, le panache devient de moins en moins sensible à ces caractéristiques. Dans la troisième zone, les lois d'évolution sont identiques pour tous les panache et seulement fonction des conditions aux limites imposées à son environnement. En imaginant une source fictive ponctuelle telle que ces mêmes lois puissent être appliquées dès ce point de départ, on définit une position qui servira d'origine des cotes z pour décrire le panache pleinement développé. Ce point est appelé origine virtuelle du panache ; son altitude par rapport à la source est généralement notée z_v. Cette distance doit évidemment être liée à la géométrie de la source étudiée. Pour donner un ordre de grandeur, Nielsen [16] prévoit une distance de 2 à 3 diamètres D de la source avant qu'il ne soit possible de considérer les lois du panache établi comme applicables. Dans les différentes expériences relevées dans la littérature, les auteurs proposent des cotes z_v assez différentes allant de $-2D_s$ à $+0{,}5D_s$ (Skistad [4], Auban [11]). Hunt et Kaye [17] donnent une revue détaillée des divers types de corrections possibles (corrections empiriques, coniques ou liées à la source). Les tests expérimentaux proposés reposent sur l'étude des panaches massiques dirigés suivant la verticale descendante.

2.2.2 Panache issu d'une source de chaleur linéaire

a) Equations générales du panache linéaire

La source de chaleur étant supposée portée par l'axe des abscisses, les champs thermiques et dynamiques peuvent s'écrire sous la forme :

$$u = \overline{u} + u'$$
$$v = \overline{v} + v'$$
$$w = \overline{w} + w'$$
$$\Delta T = \overline{\Delta T} + t'$$

avec $\overline{u} = 0$, les fluctuations étant fonction des coordonnées cartésiennes y et z, les équations s'écrivent comme suit :

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \overline{v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} = 0$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\overline{v}\frac{\partial \overline{w}}{\partial y} + \overline{w}\frac{\partial \overline{w}}{\partial z} = -\frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} + g\beta\Delta\overline{T}$$

Suivant la direction verticale, les contraintes visqueuses sont supposées négligeables devant les contraintes de Reynolds, de même on suppose $\frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \ll \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y}$.

Conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{w}.\overline{\Delta T}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(u't'\right)=-\overline{w}.\frac{dT_\infty}{dy}$$

L'intégration vis à vis de la variable y conduit aux résultats suivants :

$$\frac{d}{dz}\int_0^{+\infty}\overline{w}.dy=-v(+\infty) \tag{2.15}$$

$$\frac{d}{dz}\int_0^{+\infty}\overline{w}^2.dy=\int_0^{+\infty}g\beta\Delta T dy \tag{2.16}$$

dans le cas où $\frac{dT_\infty}{dz}=0$:

$$\frac{d}{dz}\int_0^{+\infty}\overline{w}.\overline{\Delta T}.dy=0 \tag{2.17}$$

Suivant l'hypothèse de Taylor, il est possible de relier v(∞,z) et w(y = 0,z)

Soit $v(+\infty)=-2\alpha.w(y=0,z)$ α étant un coefficient d'entraînement du panache.

Les équations 2.15, 2.16, 2.17 possèdent une solution particulière de la forme

$$\overline{w}=w_c.\exp-\left[\frac{y}{b(z)}\right]^2 \qquad \overline{\Delta T}=\Delta T_c(z).\exp-\left[\frac{y}{\lambda.b(z)}\right]$$

où, contrairement au cas du panache issu d'une source ponctuelle, la vitesse w_c n'est plus fonction de z.

L'égalité 2.15 conduit à une évolution linéaire du rayon dynamique soit :

$$b=\frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}}z$$

L'égalité 2.16 fournit l'évolution de l'écart de température au centre en fonction de la côte z, soit :

$$\Delta T_c=\frac{w_c^2}{\sqrt{\pi}.g\beta\lambda}\times\frac{1}{z}$$

La relation 2.17 traduit la conservation de l'énergie convectée en fonction de z. Cette dernière étant égale à la puissance linéique de la source notée habituellement Pc/L, on peut écrire :

$$\rho C_p\int_0^{+\infty}w.\Delta T.dy=\frac{P_c}{L}$$

Ce qui permet d'établir les expressions de w_c et ΔT_c en fonction de la côte z et de la puissance linéique Pc/L.

Manfred Berner [18] a établi les équations suivantes pour une source de chaleur linéaire :

Débit volumique Q (m^2/s)	$2\alpha\left(\frac{B}{\alpha}\right)^{1/3} z = u_{\max}\sqrt{\pi}b$
Flux massique (g/s/m)	$Q\rho$
Flux de vitesse (m^3/s^2)	$\sqrt{2}\alpha\left(\frac{B}{\alpha}\right)^{2/3} z = u_{\max}^2\sqrt{\pi/2}b$
Energie cinétique (gm/s^3)	$\frac{\rho B}{\sqrt{3}} z = \rho u_{\max}^3\sqrt{\pi/3}\frac{b}{2}$
Vitesse au centre u_{max} (m/s)	$\left(\frac{B}{\alpha}\right)^{1/3} = const.$
Constante d'entraînement α	0,156
Echelle de longueur b (m)	$\left(2/\sqrt{\pi}\right)\alpha z$
Flux au centre (m/s^2)	$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{B}{\alpha}\right)^{2/3} z^{-1}$
Nombre de Reynolds Re	$\frac{2B^{1/3}}{\sqrt{\pi}\nu}\alpha^{2/3} z$
Nombre de Froude Fr	$\sqrt{\pi/2\alpha} = const.$

Tableau 2.3 : grandeurs caractéristiques pour une source de chaleur linéaire établies par Manfred Berner [18]

Par identification avec les lois théoriques de la source ponctuelle, on obtient l'expression littérale des coefficients K_t, K_v, K_Q :

$$K_t = \frac{1}{\sqrt{2}g\beta\lambda^2}\left(\frac{g\beta(\lambda^2+1)}{2\rho C_p\alpha}\right)^{2/3} \tag{2.18}$$

$$K_v = \left(\frac{g\beta(\lambda^2+1)}{2\rho C_p\alpha}\right)^{1/3} \tag{2.19}$$

$$K_Q = 2\alpha\left(\frac{g\beta(\lambda^2+1)}{2\rho C_p\alpha}\right)^{1/3} \tag{2.20}$$

Les formules suivantes sont une adaptation de celles proposées par Baines et Turner [19] et sont valables pour un environnement sans gradient de température ($\frac{dT_\infty}{dz} = 0$) :

$$Q = 14.10^{-3}.\left(\frac{P_{cv}}{L}\right)^{1/3}.(z - z_v).L \tag{2.21}$$

$$w_c = 0{,}067.\left(\frac{P_{cv}}{L}\right)^{1/3} \tag{2.22}$$

$$\Delta T_c = 0{,}072.\left(\frac{P_{cv}}{L}\right)^{2/3}.(z - z_v)^{-1} \tag{2.23}$$

Remarque : $\mathbf{w}_c$ est indépendant de la hauteur z et de l'origine virtuelle z_v ; dans le cas d'une source linéaire, w_c est constant.

P_{cv}/L désigne la puissance convectée par unité de longueur de source.
Naturellement, les valeurs numériques des coefficients dépendent des valeurs choisies pour le coefficient d'entraînement et le rapport λ, ces valeurs peuvent différer sensiblement de celles concernant le cas de la source axisymétrique.

2.2.3 Panache développé en milieu confiné et ventilé

Dans le cas de la ventilation par déplacement, la source thermique est placée dans un local ventilé avec apport d'air frais en partie basse et extraction au plafond. Le débit emporté par le panache au niveau du plafond ne peut être supérieur au débit injecté. L'hypothèse proposée par Baines [20] consiste à écrire l'égalité du débit du panache considéré comme libre avec le débit injecté de façon à déterminer la position de la thermocline.
En première approximation on considère généralement que la zone située sous la thermocline est homogène en température et que le panache s'y développe comme dans le cas d'une source en milieu infini. Dans cette même approche on considère également que la zone située au dessus de la thermocline est à une température uniforme, égale à la température moyenne du panache au niveau de la thermocline. Dans cette zone le panache est alors assimilé à un jet qui se développe du fait de sa quantité de mouvement initiale.
Dans la réalité la couche séparant les zones supérieure et inférieure a une épaisseur non négligeable qui est alors le siège d'un gradient de température fini. D'autre part les phénomènes de recirculation ou de réchauffement par les parois provoquent souvent dans la zone inférieure un gradient de température de l'ordre de quelques degrés par mètre.
Nous avons déjà vu que les facteurs λ, α et K caractérisant le panache en milieu infini ne pourraient être fixés avec précision et dépendraient des conditions expérimentales. Ces même conditions influent évidemment sur la description du panache en enceinte ventilée.
Pour préciser ce comportement, différentes expériences ont déjà été menées ; les unes par simulation hydraulique les autres en enceinte aéraulique :

- dans les expérimentations en simulation hydraulique, l'eau est le milieu environnant, et une injection à très basse vitesse d'un fluide de masse volumique différente (solution saline, eau glycolée) est utilisée comme source de flottabilité
- dans les expériences aérauliques, le développement des panaches thermiques dans l'air a été étudié à partir de mesures diverses et dans des conditions de ventilation variées.

Les tableaux (2.3 et 2.4) rappellent les expériences relevées dans la littérature et menées respectivement dans ces deux configurations. En simulation hydraulique, les auteurs ont trouvé que les lois prévoyant le débit du panache en milieu infini uniforme étaient applicables dans le cas du milieu confiné. En revanche, la situation semble plus compliquée dans les installations aérauliques. Dans ces expériences on notera que la stratification est plus marquée si la source de flottabilité est constituée par un jet d'air chaud à très basse vitesse (Manzoni et

Rongère [21] ; Manzoni et Guitton [22] ; Pinard et al. [23]) que dans le cas de l'utilisation d'une surface chauffée. Dans ces études il apparaît ainsi que les échanges radiatifs entre source et parois viennent perturber les mouvements créés par la seule puissance convective de la source. Les résultats de Nielsen [24] présentés sur la figure (2.6) illustrent cette influence de l'émissivité de la source utilisée.

Etude de :	**Cellule d'essai**	**Sources utilisées**	**Nature des mesures**	**Remarques, centre d'interet particulier**
Sandberg et Lindstrom [25]	Cuve : 0,5×0,5×0,5 m^3	Cylindre chauffant Hauteur :105 mm Diamètre : 30 mm	Mesure de température par thermocouple	Calcul avec modèle théorique ; problème lié à l'isolation thermique du banc
Sandberg et Lindstrom [26]	Cuve : 0,5×0,5×0,5 m^3	Cylindre chauffant Hauteur :105 mm Diamètre : 30 mm	Mesure de température par thermocouple	Mécanismes d'évolution de l'interface ; effet du réchauffement ou du refroidissement des parois sur l'interface
Sandberg et Mattson [27]	Cuve : 0,5×0,5×0,5 m^3	Cylindre chauffant Hauteur :105 mm Diamètre : 30 mm	Mesure de température par thermocouple	Influence de la mobilité de la source sur la stratification
Auban [11]	Cuve : 0,45×0,42×0,42 m^3	diffusion de solution saline dans de l'eau pure	Mesure de vitesse par vélocimétrie laser Doppler Mesure de concentration par fluorescence induite par laser	Proposition de loi empirique prévoyant la hauteur de la thermocline en zone proche de la source
Chen et al. [28], [29]	Cuve 0,2×0,1×0,2 m^3)	Bulle d'hydrogène produite par électrolyse ; Fil horizontal : Diamètre :1 mm Longueur :10 mm	Mesure du débit de bulles Mesure visuelle de la hauteur de l'interface	Nouvelle technique pour simuler un système de ventilation par déplacement Influence des ouvertures au plafond sur la hauteur de l'interface
Berkel et al. [30]	Cuve : 0,45×0,25×0,4 m^3	diffusion de solution saline dans de l'eau pure	Mesure de vitesse par particle tracking velocimetry (PTV) Visualisation par fluorescence	Comparaison des mesures avec un modèle numérique

Tableau 2.4 : Etudes expérimentales en simulation hydraulique : panache thermique en enceinte ventilé

Etude de :	**Cellule d'essai**	**Sources utilisées**	**Nature des mesures**	**Remarques, centre d'intérêt particulier**
Kofoed et Nielsen [10]	Chambre : 8×6×4,6 m^3	Cylindre noire vertical chauffé : Hauteur : 1 m Diamètre : 0,4 m Puissance : 100 W	Mesure de vitesse par anémométrie basse vitesse (sphère chaude) Mesure de température par thermocouple	Influence du gradient de température du milieu environnant sur le débit du panache
Heiselberg et Sandberg [31]	Chambre : 4,2×3,6×2,5 m^3	Colonne chauffante : Hauteur : 2,5 m (hauteur de la chambre) Diamètre : 0,1 m Puissance : 600 W Source avec injection d'un gaz traceur	Mesure de vitesse par anémomètre à fil chaud Mesure de température par thermocouple Mesure de concentration	Critères de définition de la hauteur de l'interface Comparaison entre les prédictions et les mesures de l'interface Le rayonnement influe la température de l'environnement
Li et al. [32]	Chambre : 4,2×3,6×2,75 m^3	Cube : Longueur : 0,4 m Largeur : 0,3 m Hauteur : 0,5 m Puissance : 600 W	Mesure de vitesse par anémomètre à fil chaud Mesure de température par thermocouple	Effet du rayonnement sur le milieu environnant du panache
Mundt [5]	Chambre : 3,6×3,6×2,4 m^3	Simulateur d'une personne 100 W Lampe de bureau 60 W Lampe fluorescente 36 W Source avec injection d'un gaz traceur	Mesure de vitesse par anémomètre à fil chaud mesure de température par thermocouple mesure de concentration par analyseur infrarouge des gaz	Interaction entre plusieurs sources Gradient linéaire de température
Mierzwinski et al. [33]	Chambre isolée thermiquement : 2×2,4×2 m^3	Jet d'air chaud (P=400 W) à très basse vitesse et injection d'un gaz traceur	Mesure de vitesse par anémomètre mesure de température par thermocouple mesure de concentration	Critères de définition de la hauteur de l'interface
Manzoni et Guitton [34], Manzoni [35]	Chambre : 2,5×3,65×3 m^3	Jet d'air chaud à très basse vitesse (D_s=0,1 m ; P=0÷4,5 kW ;)	Mesure de vitesse par vélocimétrie laser Doppler mesure de température par thermocouple	Influence du refroidissement des parois sur le champ de température
Pinard et al. [23]	Chambre isolée thermiquement : 3,5×3,2×2,75 m^3	Jet d'air chaud à très basse vitesse (ΔT_0=45 °C et 70 °C)	mesure de température par thermocouple	Influence du débit, de la vitesse et de la température du jet sur la position de la thermocline
Trzeciakiewicz et al. [36]	Chambre : 3×3×3 m^3	Disque chauffé (D=0,15 m ; puissance : 600 W) Jet d'air chaud (P=490 W) à très basse vitesse Simulateur d'une personne 100 W Lampe de bureau 100 W Ordinateur (150 W) Sources accompagnées avec un gaz traceur	Mesure de vitesse Mesure de température par thermocouple Mesure de concentration	Critères de définition de la hauteur de l'interface Correction sur le débit du panache en présence d'un gradient positif de température dans le milieu environnant Comparaison entre les prédictions et les mesures de l'interface
Trzeciakiewicz et al. [37]	Chambre : 3×3×3 m^3	Disque chauffé (D_s=0,15 m ; puissance : 600 W) Sources accompagnées avec un gaz traceur	Mesure de vitesse Mesure de température par thermocouple Mesure de concentration	Comparaison entre les prédictions et les mesures des profils de température et du débit du panache
Xing et Awbi [38], Xing et Awbi [39]	Chambre : 2,8×2,8×2,3 m^3	Simulateur d'une personne 100 W Lampe de bureau 36 W Ordinateur 150 W Disque chaud 180 W Sources avec injection d'un gaz traceur	Mesure de vitesse par anémomètre à fil chaud mesure de température par résistance de platine mesure de concentration par analyseur infrarouge des gaz	Comparaison entre les mesures de l'interface à partir des profils de température de concentration avec un modèle numérique

Tableau 2.5 : Etudes expérimentales en enceinte aéraulique : panache thermique en enceinte ventilée

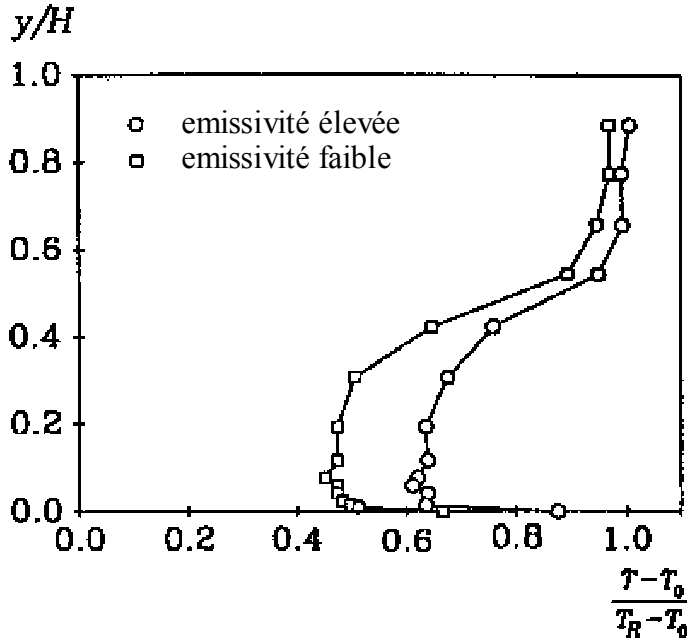


Figure 2.6 : Influence de l'émissivité de la source sur le profil vertical de température (d'après Nielsen [24])

La part d'énergie radiative absorbée par les murs est retransmise à l'air ambiant par convection au niveau de ces parois. Linden et al. [40] ont suggéré un modèle de stratification multicouches avec recirculation dans chacune d'elles. Leurs analyses ont été effectuées pour une source linéique verticale. Ce modèle a été ensuite repris par Chen et al. [28] pour le cas d'un mur vertical chauffé dans un local équipé d'un système de ventilation par déplacement. Chen et al. [29] montrent que la stratification multicouches provoque un gradient linéaire de température du milieu ambiant. Ce gradient de température va conduire à une expansion réduite du panache, par rapport au cas d'un milieu isotherme. Dans cette situation Trzeciakiewicz et al. [36] proposent une correction sur le calcul du débit *Q(z)* à la hauteur *z* du panache :

$$Q\ (z) = K\Phi_z^{1/3}\left(z - z_v\right)^{5/3}$$

Dans cette relation, comparable à la relation (2.10), la puissance convective P_c est remplacée par Φ_z qui représente l'excès d'enthalpie dans le panache à la hauteur considérée.
Cet excès d'enthalpie Φ_z correspond à la puissance convective de la source, diminuée de l'effet du gradient de température vertical. Il peut être calculé par itération sur la base de :

$$\Phi_z = P_c - \rho_\infty C_p \int_0^z Q(z)T'\,dz$$

où $T'=dT_\infty/dz$ est le gradient de température du milieu environnant.
Dans toutes les expériences citées, la stratification concerne donc une couche plus ou moins épaisse. Avant d'examiner les lois proposées pour décrire le niveau de cette stratification, il convient de s'intéresser à la manière dont les auteurs ont défini la position de la thermocline.

2.2.4 Caractérisation de la thermocline installée en enceinte ventilée

La caractérisation de la thermocline dépend fortement de la conception de l'installation expérimentale utilisée. Nous distinguerons donc séparément le cas des cellules aérauliques et celui des cellules hydrauliques.

a) Cellules aérauliques

Dans le cas des cellules aérauliques, la définition de la position de la thermocline a été abordée par certains auteurs en s'appuyant sur l'observation des profils verticaux de température ou de concentration d'un gaz traceur injecté au niveau de la source. Les auteurs tels que Pinard et al. [23] ; Mierzwinski et al. [33] utilisant des jet d'air chaud à très basse vitesse comme source de chaleur ont réussi à localiser l'interface directement à partir des profils verticaux de température comme en témoigne les figures (2.7) et (2.8). En revanche dans les expériences mettant en œuvre des surface chauffées, la stratification est moins nette (figure 2.9). Certains auteurs ont alors utilisé des gaz traceurs injectés au niveau de la source pour localiser la thermocline en mesurant le profil vertical de concentration de ce gaz dans le milieu environnant (figure 2.10).

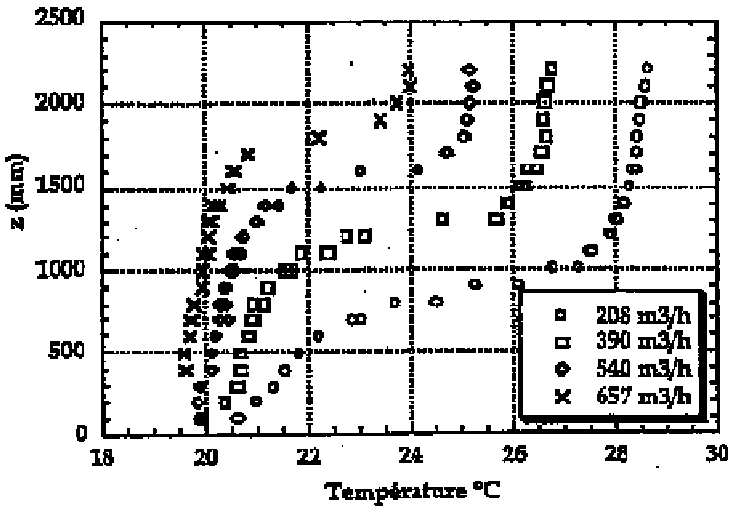


Figure 2.7 : Exemples de profils verticaux de température mesurée en enceinte aéraulique pour différents débits de ventilation dans le cas d'un jet d'air chaud (d'après Pinard et al. [23])

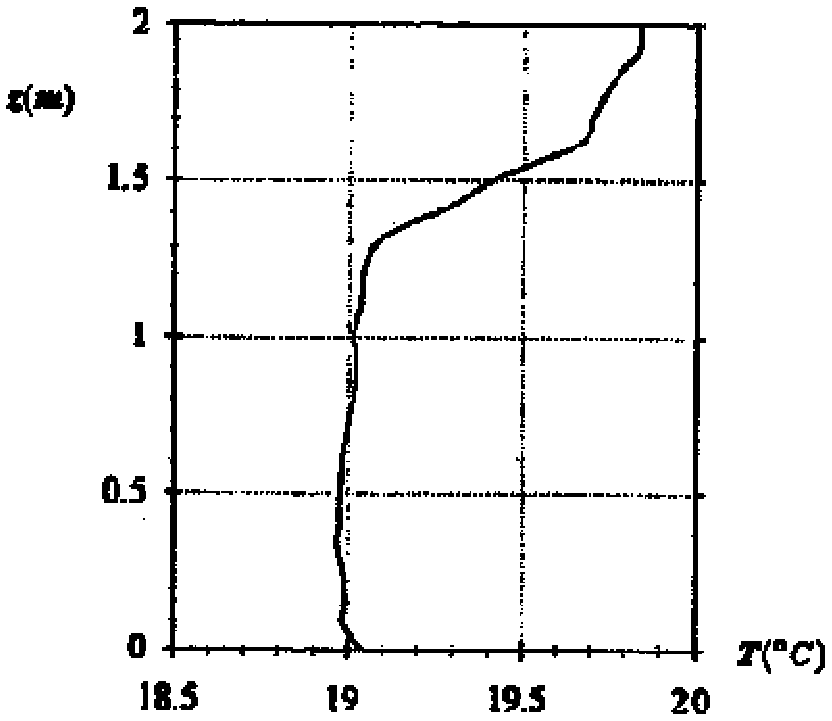


Figure 2.8 : Exemple de profil vertical de température mesurée en enceinte aéraulique dans le cas d'un jet d'air chaud (d'après Mierzwinski et al. [33])

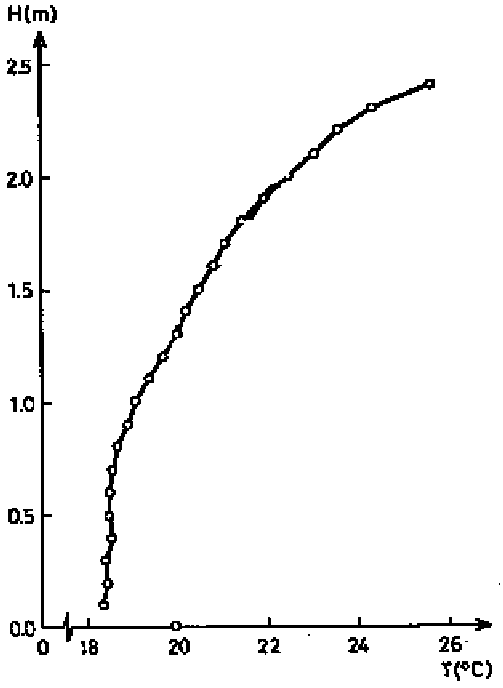


Figure 2.9 : Exemple de profil vertical de température mesurée en enceinte aéraulique dans le cas d'un cylindre chauffé (d'après Heiselberg et Sandberg [31])

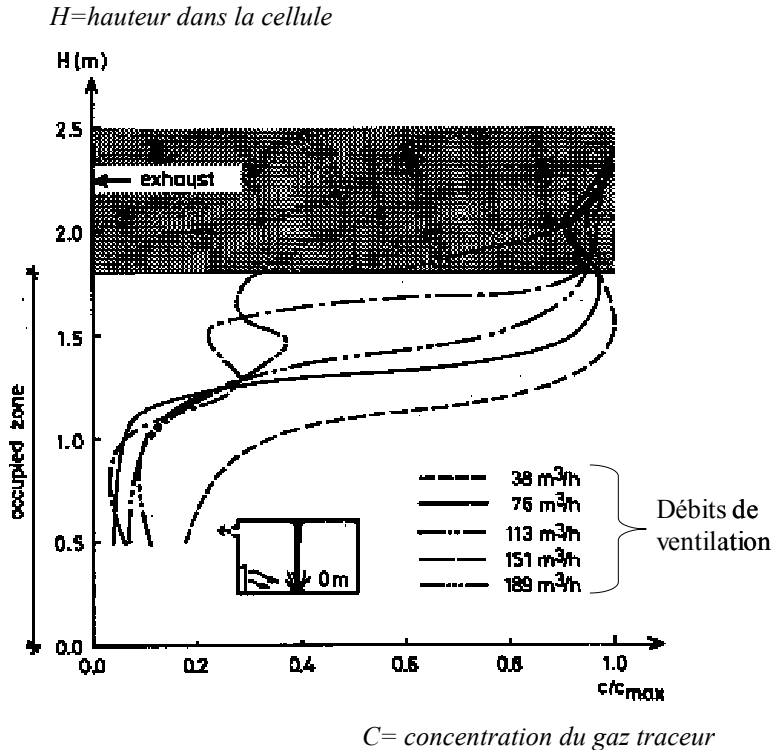


Figure 2.10 : Exemples de profils verticaux de concentration d'un gaz traceur mesurée en enceinte aéraulique pour différents débits de ventilation dans le cas d'un cylindre chauffé (d'après Heiselberg et Sandberg [31]).

Parmi les critères permettant la localisation de la thermocline, certains ont proposé des définitions basées sur la forme des profils moyens de température ou de concentration d'un gaz traceur. D'après Mierzwinski et al. [33], la hauteur de la thermocline correspond au niveau où l'écart de température avec l'air soufflé atteint 30 % de celui mesuré au plafond. Trzeciakiewicz et al. [36], ont adopté une hauteur d'interface correspondant au niveau où la concentration du gaz traceur atteint 50 % de la concentration injectée au niveau de la source. Xing et Awbi [38] et [39] et Stymne et al. [41], ont estimé que l'interface se situe à l'altitude où la température de la paroi est localement égale à la température de l'air (figure 2.11). Ils montrent dans leurs expériences que cette proposition reste valable dans le cas d'un flux radiatif non négligeable.

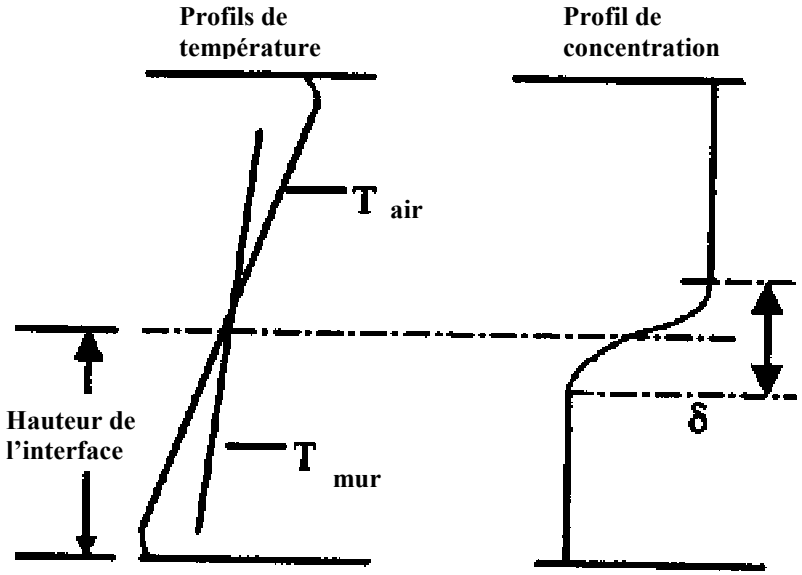


Figure 2.11 : Critères adoptés par Xing et Awbi ([38] et [39]) et Stymne et al. [41] pour localiser la thermocline en enceinte aéraulique.

b) Simulation hydraulique

En simulation hydraulique, le problème du rayonnement ne se pose pas. Ainsi, la localisation de la thermocline semble à priori plus aisée que dans le cas d'une cellule aéraulique. Sandberg et Lindstrom [25] définissent l'interface comme une zone de variation quasi-linéaire de la masse volumique (ou de la flottabilité) comprise entre deux zones à très faible variation. Plus récemment, et de manière nouvelle, Auban [11] et Auban et al. [42] donnent une définition plus précise de la thermocline. Ils proposent de définir une hauteur ainsi qu'une épaisseur d'interface à partir d'un traitement statistique effectué sur les fluctuations du champ de concentration du traceur fluorescent représentant la flottabilité. En utilisant pour la concentration la décomposition de Reynolds $C=\overline{C}+c$, il est possible, à partir d'une série d'images instantanées, de restituer la distribution spatiale de la valeur moyenne $\overline{C}$ (figure 2.12) ainsi que celle de l'écart type σ de ces fluctuations. Pour un nombre suffisamment important d'images, les facteurs de dissymétrie S et d'aplatissement F liés à ces fluctuations peuvent également être estimés en chaque point.

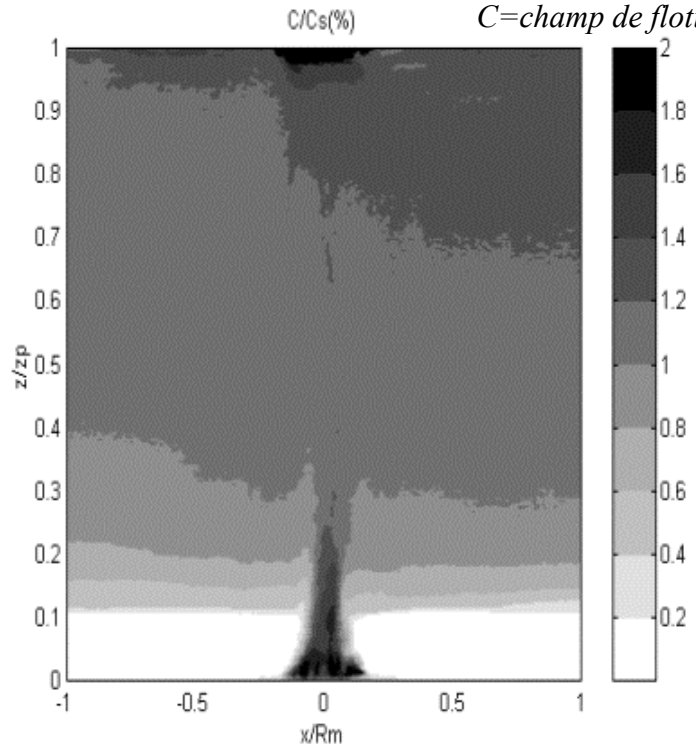


Figure 2.12 : Exemple de champ de concentration mesuré en simulation hydraulique par fluorescence induite par plan laser (d'après Auban [11] ; Auban et al. [42].

Les résultats d'une telle analyse effectuée sur une ligne verticale à l'extérieur du panache sont présentés figure (2.13). Ils font apparaître les deux zones attendues dans l'enceinte : la zone inférieure où les concentrations sont extrêmement faibles et la zone supérieure où elles apparaissent beaucoup plus fortes. Entre ces deux zones se situe la stratification qui présente une certaine épaisseur. Il apparaît possible de situer précisément la position z_i de la thermocline comme celle du maximum d'écart type des fluctuations de la concentration. Cette définition correspond à un critère physique, puisque la région d'interface peut être comparée à une zone de mélange de deux fluides de flottabilités différentes. L'écart type des fluctuations de concentration, correspondant à celui des fluctuations de masse volumique, est l'une des caractéristiques de ce mélange. Deux extréma marquent également les profils verticaux des coefficients de dissymétrie S et d'aplatissement F. La distance δ, séparant ces deux extréma permet de donner un critère représentatif de l'épaisseur de la zone de mélange considérée. Les résultats des facteurs S et F montrent que les fluctuations de concentration témoignent, dans toute cette épaisseur, du passage des structures très cohérentes. Ces dernières proviennent de la zone supérieure ou inférieure à la thermocline et sont respectivement brassées par la recirculation supérieure ou le débit d'air frais apporté au panache.

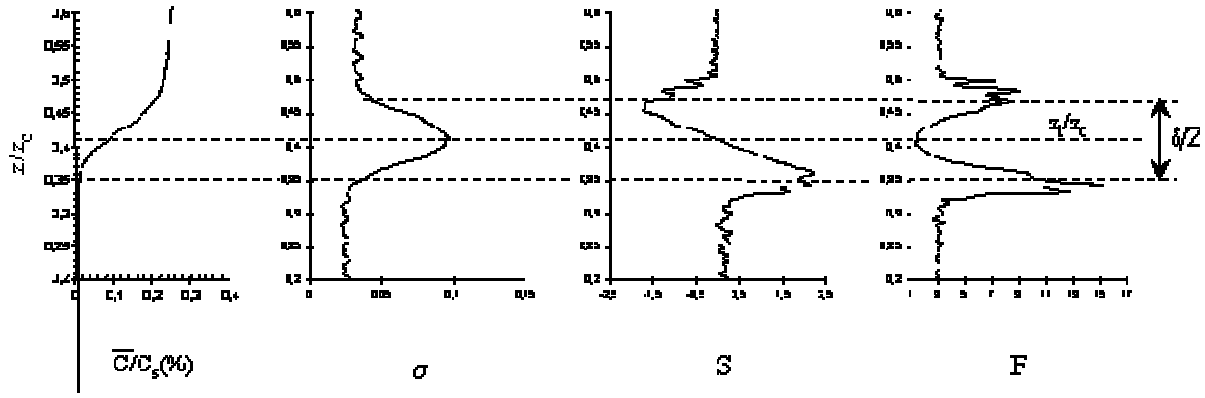


Figure 2.13 : Profils verticaux de concentration moyenne, d'écart type et des facteurs de dissymétrie et d'aplatissement des fluctuations de concentration du traceur fluorescent (d'après Auban [11] ; Auban et al. [42].

Une nouvelle fois il apparaît qu'en l'absence d'échange de type radiatif il est plus aisé de caractériser la stratification par des critères non subjectifs. De nombreux auteurs comme Turner [43] et Colomer [44] s'intéressent à ces situations instationnaires.

2.2.5 Hauteur de la thermocline

a) Milieu confiné sans ventilation :

La source thermique est placée dans une enceinte fermée, du fait de l'absence d'évacuation, l'apport d'énergie de la source au milieu environnant doit entraîner à terme une évolution de l'ensemble du milieu. On distingue deux étapes successives :

- La première relative à la formation puis à la descente progressive d'un front de stratification jusqu'au fond de l'enceinte.
- La deuxième concerne l'évolution vers un état asymptotique des caractéristiques de l'écoulement.

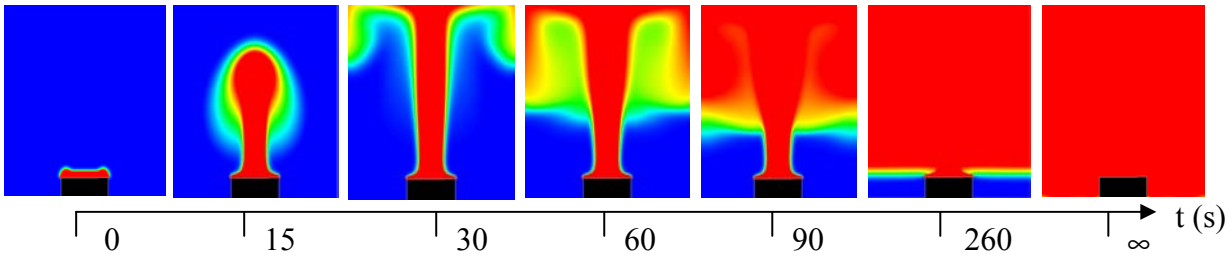


Figure 2.14 : Evolutions du champ de température de l'air environnant dans une enceinte cylindrique(R=2,5m et H=5m) avec une source thermique de 1.54m de diamètre à 200°C

b) Milieu confiné avec ventilation :

La source thermique est placée dans une enceinte ventilée, c'est à dire dans une enceinte où l'on apporte de l'air neuf en partie basse et on extrait le même débit en partie haute.
Soit Q_{max} le débit d'air emporté par le panache en haut de l'enceinte.
2 cas peuvent se produirent suivant le débit de ventilation injecté :

- Si $Q_v > Q_{max}$: On n'observe pas de stratification dans l'enceinte, dans ce cas le débit de ventilation est assez important pour alimenter le panache tout au long de son développement (Figure 2.16 : ligne de courant).

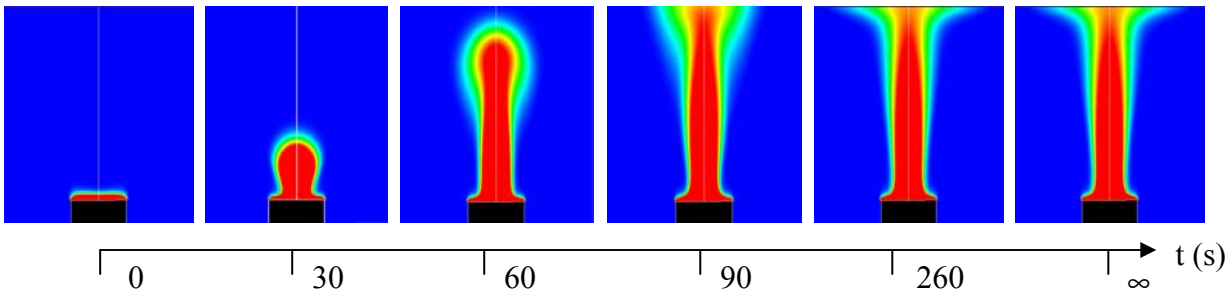


Figure 2.15 : Evolutions du champ de température de l'air environnant dans une enceinte ventilée (Q_v=10000m^3/h) cylindrique(R=2.5m et H=5m) avec une source thermique de 1.54m de diamètre à 200°C

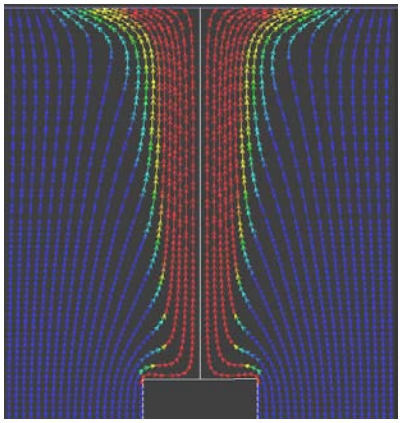


Figure 2.16 : Ligne de courant colorée en fonction de la température, alimentation du panache tout au long de son développement dans l'enceinte

Remarque : le panache s'étale sur le haut de l'enceinte car le débit dans le panache est trop important.

- Si $Q_v < Q_{max}$: Dans ce cas le débit de ventilation n'est pas suffisant pour alimenter le panache sur toute la hauteur de l'enceinte (Figure 2.18 : ligne de courant), une stratification (aussi appelé thermocline) va apparaître. Au-dessus de la stratification on observera une zone de recirculation.

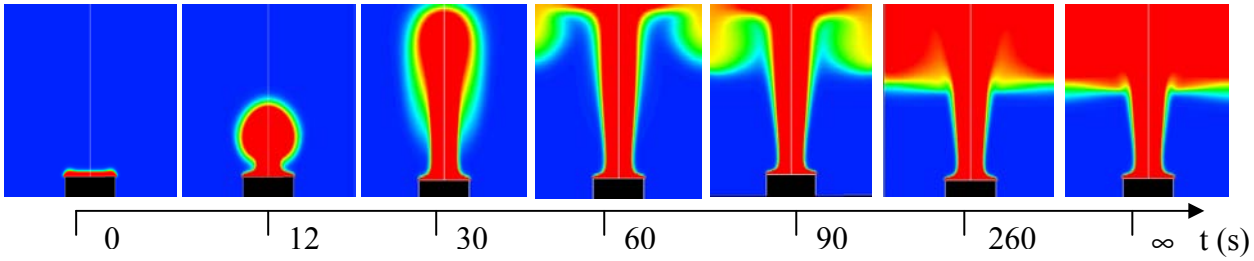


Figure 2.17 : Evolutions du champ de température de l'air environnant dans une enceinte ventilée (Q_v=1500m^3/h) cylindrique (R=2.5m et H=5m) avec une source thermique de 1.54m de diamètre à 200°C

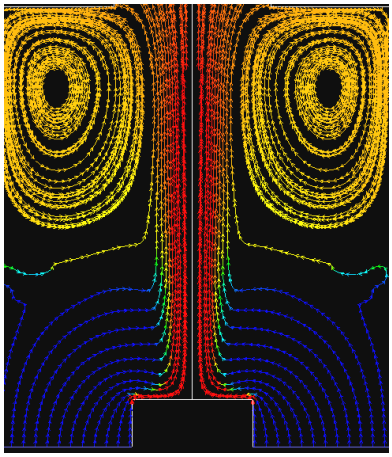


Figure 2.18 : Ligne de courant colorée en fonction de la température, stratification du milieu environnant

Nous savons que la hauteur de stratification en enceinte ventilée est égale à la hauteur à laquelle le panache engendré par la source de chaleur emporte un débit Q égal au débit de ventilation Q_v. De nombreux travaux expérimentaux et théoriques ont confirmé qu'à une distance assez grande de la source appelée zone lointaine, le développement du panache dans un milieu confiné est semblable à celui en milieu infini de même nature. Dans cette zone la prévision de hauteur de stratification est assez simple (on calcule le débit du panache avec les lois énoncées en milieu infini). Dans les applications industrielles les dimensions de la source sont souvent importantes et on cherche à produire une stratification à une hauteur au-dessus de la source de l'ordre de un à deux diamètres. Il est donc important de connaître l'évolution du débit du panache non seulement en zone lointaine mais aussi en zone proche et intermédiaire. A notre connaissance Auban [11] et Bouzinaoui [45] sont les seuls à avoir proposé des lois permettant cette description dans les trois zones pour une source circulaire. Aussi nous résumons ici leurs conclusions.

- Pour X<0,2 (zone proche) $$\left(\frac{z_i}{D_s}\right)^{2/3} \cong 5{,}5X \qquad (2.24)$$

- Pour 0,2<X<1 (zone intermédiaire) $$\left(\frac{z_i}{D_s}\right)^{4/3} \cong 6{,}8X \qquad (2.25)$$

- Pour X>1 (zone lointaine) $$\left(\frac{z_i - z_v}{D_s}\right)^{5/3} \cong 19{,}25X \qquad (2.26)$$

Avec z_i : hauteur de la thermocline

X une grandeur adimensionnelle donnée par : $$X = \frac{Q_v}{D_s \nu}\left[\frac{\mathrm{Pr}^2}{Ra^{4/3}}\right]^{1/3} \qquad (2.27)$$

ou encore en fonction de la puissance convectée $$X = 0{,}5\left(\frac{\rho Cp}{g\beta}\right)^{1/3}\frac{Q_v}{D_s^{5/3}P_c^{1/3}} \qquad (2.28)$$

Remarque : Auban a proposé deux lois, celle dans la zone proche pour X<0,14 et celle dans la zone lointaine pour X>0,14, Bouzinaoui a validé et complété ces deux lois en proposant une loi intermédiaire (0,2<X<1)

2.3 Conclusion

La problématique proposée peut à priori paraître comme complexe. D'une part, la physique des phénomènes de base n'est certainement pas triviale, il s'agit d'une situation de convection mixte avec un couplage plus ou moins marqué aux transferts radiatifs.
D'autre part, les configurations d'intérêt pratiques peuvent différer sensiblement des configurations académiques (sources circulaires planes, par exemple). Dans ces conditions, de nombreux auteurs sont intéressés par la simulation numérique. Sans chercher à être exhaustif, on peut citer : Horan et Finn [46], Fontaine et al. [47], Bastiaans et al. [48], Cook et al. [49].
Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique du développement du panache dans un milieu infini uniforme ou non ainsi que dans un milieu confiné et ventilé. Cette étude nous a permis de prévoir l'évolution de son débit en fonction de la hauteur atteinte et ainsi d'estimer la hauteur stratification dans le cas de la ventilation par déplacement. Auban [11] en simulation hydraulique, a proposé des lois applicables dans la zone proche de la source dite zone de développement du panache, Bouzinaoui [45] les a valider dans une expérience aéraulique en vraie grandeur.
Cette étude présente également les lois de développement de panache en milieu infini au-dessus d'une source thermique considérée ponctuelle et au-dessus d'une source thermique linéaire. Il apparaît intéressant de valider ces modèles pour différentes configurations de source thermiques par des mesures expérimentales en cellule aéraulique et d'étudier l'influence de la géométrie de la source sur les lois de développement de panaches.

Chapitre 3

Installations expérimentales

3.1 Cellule aéraulique

L'INRS a conçu une cellule aéraulique figure (3.1) permettant l'étude de panaches thermiques issus de sources de chaleur dans des conditions de dimensions, températures et débit de ventilation proches des conditions industrielles. Cette étude doit être conduite pour différents débits de ventilation en mesurant essentiellement la distribution des vitesses et des températures dans la cellule.

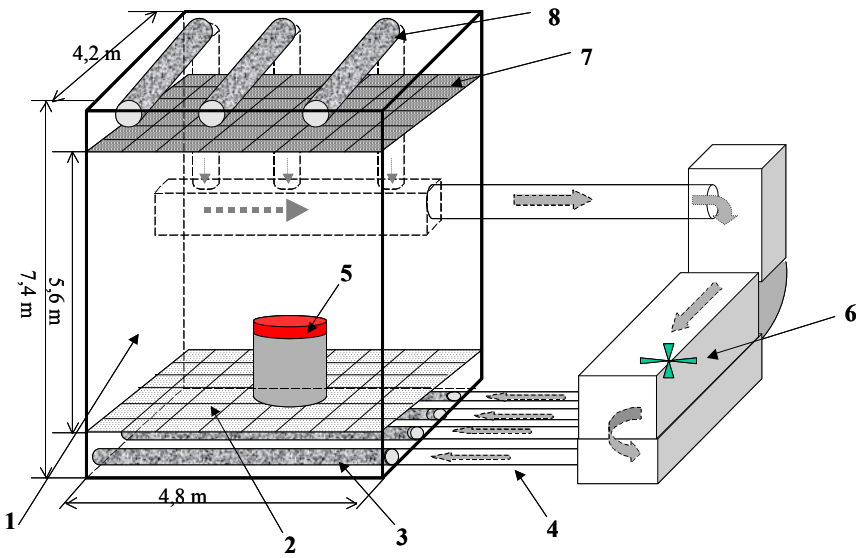


Figure 3.1 : Schéma de la cellule aéraulique installée à l'INRS

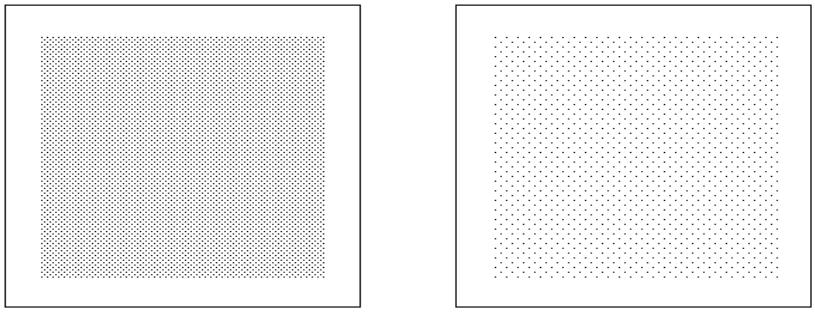
La cellule schématisée, figure (3.1), est installée dans les locaux de l'INRS. Elle fonctionne en circuit fermé. Elle est constituée d'une chambre d'expérience proprement dite, du système de récupération, de traitement et de soufflage de l'air et d'un système de déplacement 3D.

3.1.1 Chambre d'expérience

Les dimensions de la chambre d'expérience sont les suivantes :

- Surface au sol : 4,8 m × 4,2 m
- Hauteur 5,6 m.

Cette chambre est contenue dans un caisson de 7,4 m de hauteur totale. Elle est limitée pour sa partie basse par un plancher perforé (taux de perforation 26 %, figure 3.2a) placé à 0,8 m au-dessus de la base du caisson et pour sa partie haute par un faux plafond également perforé (taux de perforation 11%, figure 3.2b) situé à 1m en dessous du haut du caisson.



a) Dalle perforée pour plancher
Dimensions : 60 mm × 60 mm
Taux de perforation : 26 %
Trous : 5 mm entraxe 10 mm

b) Dalle perforée pour plafond
Dimensions : 60 mm × 60 mm
Taux de perforation : 11 %
Trous : 2 mm entraxe 10 mm

Figure 3.2 : Dalles utilisées pour construire le plancher et le plafond de la chambre d'essai

Les parois latérales sont constituées par une âme isolante en mousse rigide de polyuréthanne de haute densité (épaisseur 100 mm) injectée entre deux parements en tôle d'acier galvanisé (épaisseur 0,6 mm). Une porte d'accès coulissante est réalisée de la même façon que les parois latérales, de 3 m de large et de 2,5 m de hauteur, elle est percée d'un hublot permettant le contrôle visuel du comportement des appareils. Un ensemble de sécurité surpression ou dépression à l'intérieur de la veine conditionne le fonctionnement de l'installation.

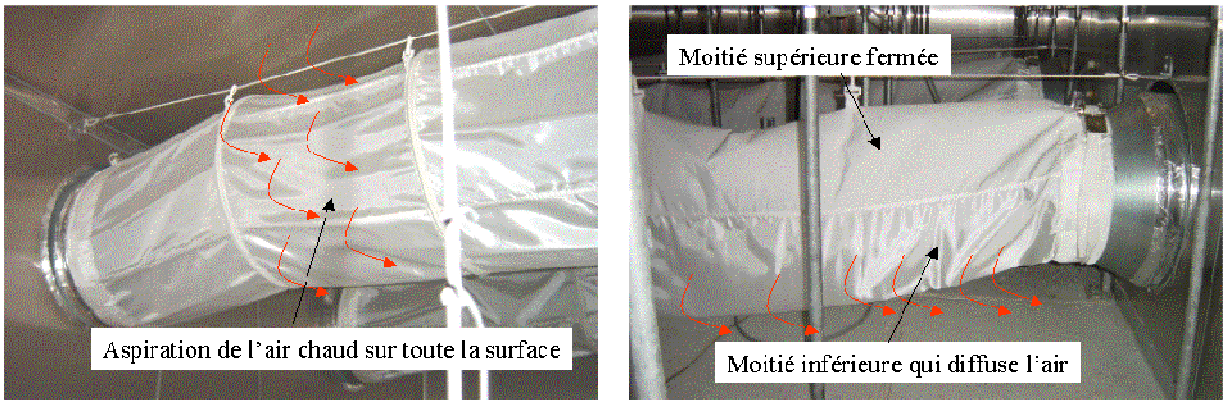
3.1.2 Système de traitement et de ventilation d'air

Le système de ventilation qui assure le soufflage et l'aspiration dans la cellule est essentiellement constitué par les éléments suivants:

- reprise d'air en partie haute de la cellule : elle est assurée par trois gaines poreuses en textile armé de 500 mm de diamètre (figure 3.3a).Ces gaines sont placées au dessus du plafond perforé et reliées à trois conduites de même diamètre. Ces dernières sont reliées à une conduite de reprise extérieure de 710 mm de diamètre.

- traitement d'air : il est réalisé dans une centrale de traitement d'air à coté de la chambre d'expérience comprenant :
  - un filtre
  - une batterie de refroidissement à eau glacée d'une puissance de 18 kW
  - une batterie électrique de chauffage d'une puissance de 10 kW
  - un ventilateur de soufflage
  - un venturi pour contrôler le débit de ventilation

- conduite du débit de ventilation : Quatre conduites de soufflage de 400 mm de diamètre, rectilignes sur 6 m, se terminent sous le plancher par des gaines en textile de 315 mm de diamètre. Ces gaines diffusent l'air uniquement par leur moitié inférieure (figure 3.3b) et sont chacune équipées à l'intérieur d'un cône d'homogénéisation afin de pouvoir distribuer l'air de façon sensiblement uniforme.



(a) (b)

Figure 3.3 : Gaines en textile utilisées dans la chambre d'essai :
a) Pour la reprise de l'air chaud au dessus du faux plafond
b) Pour le soufflage de l'air froid en dessous du plancher

3.1.3 Caractéristiques de fonctionnement

Les caractéristiques de fonctionnement de l'installation sont les suivantes :

- Le débit de soufflage qui est égal au débit d'extraction est continûment ajustable entre 2 000 et 10 000 m^3/h et est régulé à ± 5 % du point du fonctionnement choisi. Pour fixer les ordres de grandeurs, le débit maximum correspond ainsi à une vitesse maximale de soufflage au plancher de l'ordre de 0,15 $m.s^{-1}$.
- La température de soufflage est continûment ajustable entre 20 et 25 °C avec une régulation prévue à ± 0,5 °C en sortie de ventilateur.
- La température maximale de l'air extrait est fixée à 40 °C
- L'installation est conçue pour étudier des sources d'une puissance totale inférieure à 18 kW.

3.1.4 Système de déplacement 3D

Afin de faciliter l'exploration du domaine d'étude, nous avons conçu un système de déplacement (figure 3.4) qui permet un positionnement facile et précis des sondes de mesure dans toute la zone du panache. Il se compose d'un portique qui supporte ces instruments et permet de les déplacer selon la hauteur de la chambre, et des dispositifs qui assurent les translations du portique selon la longueur et la largeur. L'ensemble garantit ainsi un déplacement dans les trois dimensions de l'espace.

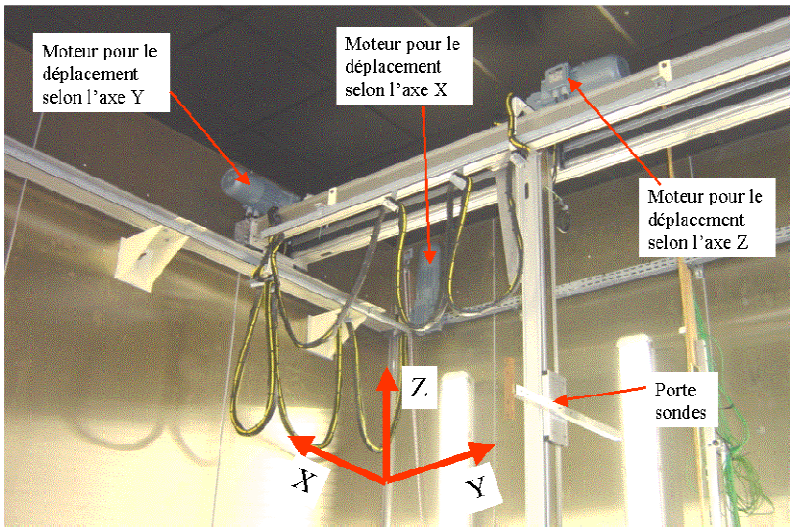


Figure 3.4 : Système de déplacement 3D installé dans la chambre d'essai

Les amplitudes des déplacements sont de 3600 mm selon la longueur (l'axe X), 3300 mm selon la largeur (l'axe Y) et 2200 mm selon la hauteur (l'axe Z) avec une résolution de 0,1mm pour les trois axes.
Les déplacements peuvent être pilotés, soit manuellement à l'aide d'un boîtier de commande, soit automatiquement à l'aide d'un logiciel d'acquisition.

3.2 Source thermique

3.2.1 Source thermique cylindrique

La source de chaleur utilisée est un cylindre de 1 m de diamètre constitué par cinq zones (4 surfaces cylindriques + 1 disque) d'aires identiques égales à 0,785 m^2. Ces zones sont contrôlées indépendamment par cinq régulateurs PID et par l'intermédiaire de cinq sondes de température PT100. Chacune de ces sondes est fixée au milieu de la zone correspondante. Le cylindre est chauffé par l'intérieur à l'aide des résistances électriques d'une puissance totale de 20,6 kW. Chaque zone peut être chauffée au voisinage de 350 °C. La figure 3.5 montre le schéma de la source avec les cinq zones.
Afin de minimiser le rayonnement de la source, un dépôt de Nickel a été réalisé sur la surface extérieure de chaque zone. Le choix de conception de cette source a été validé et qualifié par Bouzinaoui lors de précédentes études à l'INRS.

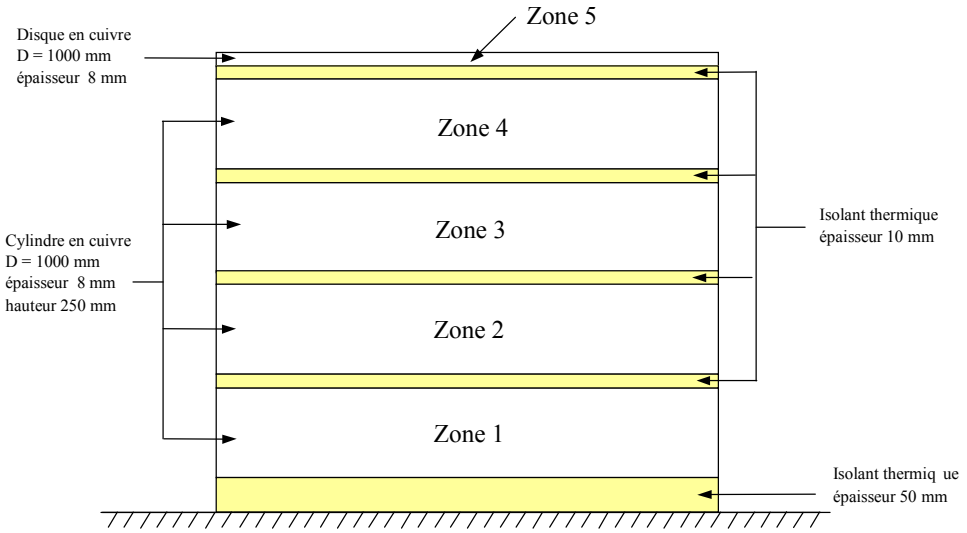


Figure 3.5 : Schéma de la source cylindrique utilisée

Une fois la consigne de température atteinte et le régime établi dans la cellule, un dispositif intégré dans les régulateurs permet de relever à chaque instant la puissance électrique moyenne fournie à chaque zone.

3.2.2 Source thermique rectangulaire

Dans le cadre de ma thèse, une nouvelle source rectangulaire thermique a été commandée auprès de la société Scientax de manière à observer l'influence de la géométrie sur les lois de développement de panaches. Cette source rectangulaire est composée de quatre modules rectangulaires identiques (longueur = 1,5 m, largeur = 0,25 m) que l'on peut chauffer indépendamment. Sur chacun de ces modules, seule la surface supérieure du module est chauffée. Ces modules peuvent être placés les uns à coté des autres suivant le coté de longueur 1,5 m ce qui nous permet donc de faire varier le rapport d'aspect longueur/largeur de la source rectangulaire en chauffant 1, 2, 3 ou 4 modules. Le rapport d'aspect est respectivement 6, 3, 2, 1,5. Voici ci-dessous un schéma d'un module constituant la source rectangulaire :

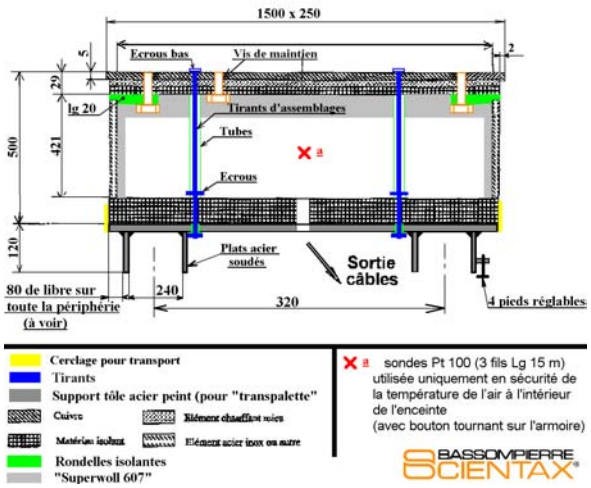


figure 3.6 : schéma d'un des quatre modules constituant la source rectangulaire

a) hauteur de stratification

Dans cette partie, nous calculons la hauteur de stratification pour les différentes configurations de source et pour différents écarts de température entre la température de la source et l'air ambiant. L'étude expérimentale sera conduite en milieu infini (ventilation sans stratification), donc l'objectif de cette partie est de repérer des cas sans stratification (hauteur de stratification > hauteur de la cellule : 5,6m). Pour le calcul de le hauteur de stratification, nous nous sommes appuyés sur l'étude réalisée par A.Bouzinaoui [45]. Dans notre cas, nous avons calculé différentes hauteurs de stratification pour les 4 configurations étudiées en prenant différentes valeurs de ΔT_s (écart de température entre la source et l'air ambiant) et différents débits (2000 m^3/h, 5000 m^3/h, 8000 m^3/h).
Pour connaître la hauteur de stratification, nous avons besoin de calculer la puissance convectée par le panache :
Pour une plaque rectangulaire chauffée, l'échange de chaleur convectif entre la surface supérieure et l'air ambiant peut être caractérisé par un nombre de Nusselt de la forme (Gosse [50]) :

$$N_u = 0{,}14(G_r P_r)^{1/3}$$

où *Gr* et *Pr* sont respectivement le nombre de Grashof et le nombre de Prandtl.
Le coefficient d'échange superficiel étant défini par :

$$h = \frac{N_u \kappa}{D_s}$$

où κ est la conductivité de l'air au voisinage de la source ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
La puissance convectée sera donnée par :

$$P_c = hS\left(T_s - T_a\right)$$

avec S : surface de la plaque rectangulaire

Dans les tableaux 3.1 et 3.2, on présente respectivement les résultats des calculs obtenus pour les écarts de température (ΔT_s = 100 K, ΔT_s = 200 K, ΔT_s = 300 K), pour 4 surfaces de source (*0,25x1,5 m; 0,5x1,5 m; 0,75x1,5 m;1x1,5 m*) et pour les débits (2000 m^3/h, 5000 m^3/h, 8000 m^3/h) par une approximation par une source linéaire et par une approximation par une source ponctuelle.

- **Approximation par une source linéaire (2d) :**

$$Q = 14.10^{-3}.\left(\frac{P_{cv}}{L}\right)^{\frac{1}{3}}.(z - z_{virt}).L$$

z_{virt} : cote de l'origine virtuelle (environ égale à la largeur de la source)
L : Longueur de la source

Pour $z = z_i$, on a :

$$Q_v = 14.10^{-3}.\left(\frac{P_{cv}}{L}\right)^{\frac{1}{3}}.\Delta z.L$$

$$z_i = \Delta z + z_{virt}$$

ΔT_s=100 K				
Dimensions de la source *lxL (m)*	0,25x1,5	0,5x1,5	0,75x1,5	1x1,5
Puissance convectée P_c (W)	261	522	783	1044
z_i pour Q_v = 2000 m^3/h	4,49	3,26	2,53	1,98
z_i pour Q_v = 5000 m^3/h	11,6	8,9	7,46	6,46
z_i pour Q_v = 8000 m^3/h	18,7	14,5	12,4	10,9

ΔT_s=200 K				
Dimensions de la source *lxL (m)*	0,25x1,5	0,5x1,5	0,75x1,5	1x1,5
Puissance convectée P_c (W)	601	1202	1803	2404
z_i pour Q_v = 2000 m^3/h	3,33	2,33	1,74	1,26
z_i pour Q_v = 5000 m^3/h	8,72	6,62	5,5	4,66
z_i pour Q_v = 8000 m^3/h	14,1	10,9	9,2	8,04

ΔT_s=300 K				
Dimensions de la source *lxL (m)*	0,25x1,5	0,5x1,5	0,75x1,5	1x1,5
Puissance convectée P_c (W)	956	1912	2868	3824
z_i pour Q_v = 2000 m^3/h	2,82	1,94	1,38	0,94
z_i pour Q_v = 5000 m^3/h	7,43	5,6	4,58	3,84
z_i pour Q_v = 8000 m^3/h	12,05	9,26	7,77	6,75

Tableau 3.1 : Evaluation de la hauteur de stratification z_i par rapport à la source, en fonction de sa surface et du débit de ventilation pour différents ΔT_s

- **Approximation par une source surfacique :**

$$Q = 5.10^{-3}.P_{cv}^{1/3}(z - z_{virt})^{5/3}$$

z_{virt} : cote de l'origine virtuelle (environ égale à la longueur de la source)

Pour z = z_i, on a :

$$Q_v = 5.10^{-3}.P_{cv}^{1/3}.\Delta z^{5/3}$$
$$z_i = \Delta z + z_{virt}$$

ΔT_s=100 K				
Dimensions de la source *lxL (m)*	0,25x1,5	0,5x1,5	0,75x1,5	1x1,5
Puissance convectée P_c (W)	261	522	783	1044
z_i pour Q_v = 2000 m^3/h	4,05	3,33	2,95	2,7
z_i pour Q_v = 5000 m^3/h	8,15	6,9	6,25	5,78
z_i pour Q_v = 8000 m^3/h	11,25	9,6	8,75	8,2

ΔT_s=200 K				
Dimensions de la source *lxL (m)*	0,25x1,5	0,5x1,5	0,75x1,5	1x1,5
Puissance convectée P_c (W)	601	1202	1803	2404
z_i pour Q_v = 2000 m^3/h	3,2	2,6	2,3	2,06
z_i pour Q_v = 5000 m^3/h	6,63	5,6	5,03	4,66
z_i pour Q_v = 8000 m^3/h	9,3	7,9	7,2	6,7

ΔT_s=300 K				
Dimensions de la source *lxL (m)*	0,25x1,5	0,5x1,5	0,75x1,5	1x1,5
Puissance convectée P_c (W)	956	1912	2868	3824
z_i pour Q_v = 2000 m^3/h	2,78	2,22	1,94	1,74
z_i pour Q_v = 5000 m^3/h	5,92	4,95	4,45	4,12
z_i pour Q_v = 8000 m^3/h	8,33	7,06	6,4	5,95

Tableau 3.2 : Evaluation de la hauteur de stratification z_i par rapport à la source, en fonction de sa surface et du débit de ventilation pour différents ΔT_s

Les résultats indiqués en rouge correspondent à des cas de panaches sans stratification (la hauteur de la cellule étant de 5,6 m). Donc les résultats des tableaux 3.1 et 3.2 montrent pour chaque approximation de la source, tous les cas de panaches sans stratification pour les différents ΔT_s, les différents débits et les différentes configurations de sources.

3.3 Métrologie

Dans ce paragraphe, nous définissons la métrologie retenue pour réaliser les mesures nécessaires à notre travail.

3.3.1 Mesures reliées à la source

Pour assurer le bon fonctionnement de la source de chaleur, il est nécessaire de connaître sa distribution superficielle en température ainsi que la puissance électrique consommée.

a) Mesure de la température de la source

Une sonde à résistance de platine fixée au centre de la source chaude permet uniquement la régulation en température. Cette sonde est reliée directement à la commande de régulation située au niveau de l'alimentation de la source en énergie électrique.
Pour mesurer la distribution en température de la surface chaude de la source, nous utilisons une sonde de contact (thermocouple de type K). Cette sonde est reliée à une petite centrale d'acquisition « Almemo » qui permet, à l'aide d'un ordinateur portable, d'enregistrer la température en fonction du temps.

b) Mesure de la puissance électrique fournie à la source

Pour faire le bilan énergétique global de la cellule il est nécessaire de connaître la puissance électrique fournie à la source. Celle-ci est alimentée en 220 V triphasé par une commande tout ou rien. La puissance électrique fournie à la source est un paramètre très important qui rentre dans le calcul du bilan énergétique dans la cellule d'essai. La puissance maximale qui peut être consommée par la source est obtenue en mesurant directement, à l'aide d'un ampèremètre, le courant qui circule dans les résistances chauffantes avant d'atteindre la température de consigne. En fonctionnement continu la source absorbe 6,85 kW. En intégrant le signal de commande de chauffe de la source et en connaissant la puissance maximale consommée par la source (à 100 % de chauffe), on peut calculer la puissance électrique moyenne fournie à la source en régime permanent.

3.3.2 Mesure de la température d'air dans le panache

L'ancienne métrologie utilisée par Bouzinaoui [45] comportait 25 thermocouples. La nouvelle métrologie comporte 64 thermocouples. 36 thermocouples de type K identiques à l'ancienne configuration expérimentale ont été rajoutés. Ils sont constitués de fils de 0,14 mm de diamètre. L'extrémité des thermocouples est finement soudée et cette soudure constitue la jonction chaude. Le thermocouple est relié à la centrale de mesure par un câble adapté à sa nature. La soudure froide est intégrée au boîtier de compensation de la centrale. Ainsi constitués, ces thermocouples ont un temps de réponse de l'ordre de 1 seconde. On peut espérer, pour ce type de thermocouple, une sensibilité de l'ordre de 0,1°C.

3.3.3 Mesure de la vitesse d'air dans le panache

Pour le choix des sondes de vitesse, nous avons décidé de nous orienter vers des sondes à film chaud omnidirectionnelles de type sphère. Ces sondes nous indique le module de la vitesse quelque soit l'orientation du courant d'air et nous donne également la température par l'intermédiaire d'une thermistance. Le temps de réponse de ces sondes permets de réaliser une mesure simultanée des capteurs à une fréquence de 1 Hz. La précision donnée par le fournisseur est de 0,02 m/s.

3.3.4 Système d'acquisition

Aujourd'hui, le nouveau système de métrologie (voir figure 3.7) nous permet de réaliser une mesure quasi simultanée de 64 thermocouples et de 16 sondes thermoanémométriques :

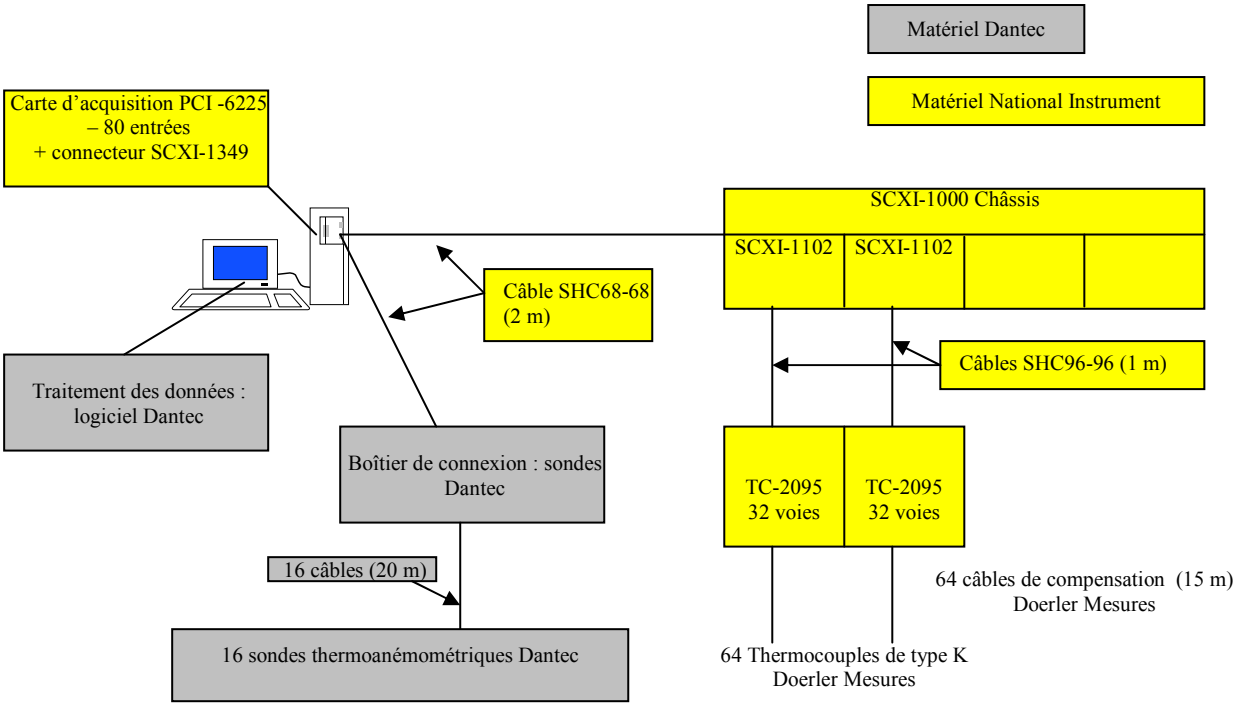


Figure 3.7 : Schéma simplifié du nouveau système de mesure simultanée de 64 thermocouples et de 16 sondes thermoanémométriques

La carte National Instrument permets la conversion analogique-numérique du signal et l'acquisition de 80 entrées. Les thermocouples sont branchés sur les 2 modules TC-2095. L'amplification du signal (mV→V) est assurée par les 2 modules SCXI-1102 présents dans le châssis SCXI-1000. Le matériel National Instrument offre une fréquence d'échantillonnage de 330000/s. Un échantillonnage de 330000/s correspond à un temps de 3 µs entre l'acquisition de deux signaux successifs.
Le logiciel Dantec permet le traitement des données provenant des 80 entrées de la carte National Instrument.

3.3.5 Présentation de la matrice de capteurs

L'étude thermique et dynamique du panache se fera plan par plan suivant l'axe z, les capteurs sont fixés sur un support horizontal, lui même fixé sur le système de déplacement de la cellule aéraulique. Les capteurs de vitesse et de température sont ainsi disposés selon une matrice (voir figure 3.8). Cette matrice est réalisée en carbone de façon a ce qu'elle soit la plus légère et la plus rigide possible. L'axe principal fait 3 cm de diamètre et les barres transversales font 8 mm de diamètre.
Cette matrice est modulable, les barres transversales peuvent être placées tous les 10 cm sur l'axe principal. Les thermocouples peuvent être placés tous les 10 cm sur la matrice. Les sondes de vitesse peuvent être clipsées soit sur l'axe principal, soit sur les barres transversales. Ce système de fixation nous donne une liberté sur la disposition des sondes de vitesse sur la matrice.

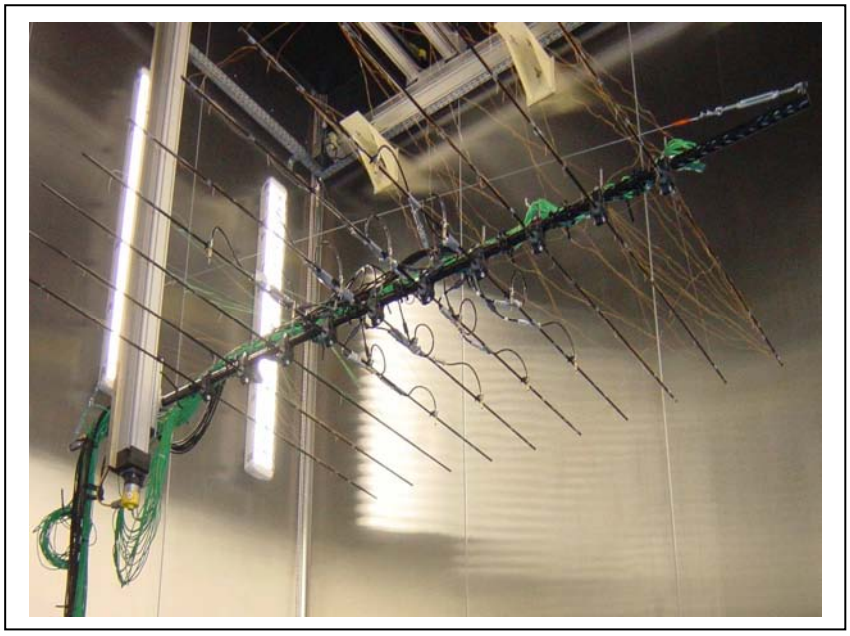


figure 3.8 : matrice de capteurs

3.4 Méthodes

Dans cette partie, nous présentons les différentes méthodes qui nous ont permis d'exploiter les résultats expérimentaux : modèle gaussien elliptique, calcul de débit, calcul d'excès d'enthalpie et les modèles du rayon de panache et du différentiel de température ΔT_c. Puis nous détaillons deux méthodes utilisées pour le calcul d'erreur des résultats expérimentaux : la méthode de Monte-Carlo et la méthode analytique.

3.4.1 Modèle gaussien elliptique

D'après l'étude faite à l'INRS par J.R.Fontaine et P.Hynynen, les données expérimentales de température et de vitesse peuvent être modélisées par une distribution gaussienne elliptique :

$$\Delta F(x, y, z) = \Delta F_c(z) e^{-f(x,y)}$$

Où *F* désigne soit la température *T* soit la composante verticale de vitesse du panache.
f(x,y) est une fonction des variables x et y donnée par :

$$f(x,y) = (x-x_0)^2\left(\frac{\cos^2\theta}{a^2}+\frac{\sin^2\theta}{b^2}\right)+(y-y_0)^2\left(\frac{\sin^2\theta}{a^2}+\frac{\cos^2\theta}{b^2}\right)+(x-x_0)(y-y_0)\sin 2\theta\left(\frac{1}{a^2}-\frac{1}{b^2}\right)$$

Où a, b et θ sont les paramètres du modèle elliptique définis comme l'indique la figure 3.9.

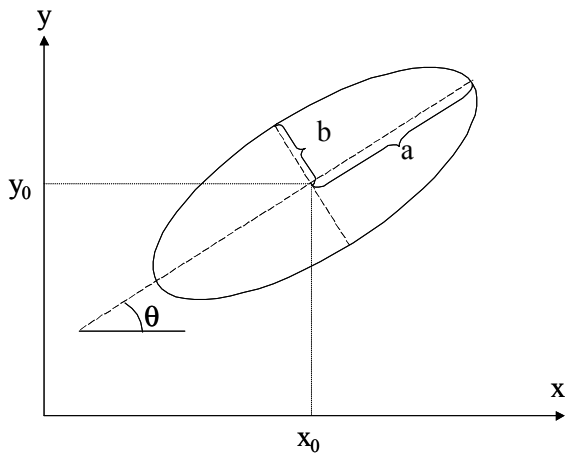


Figure 3.9 : Schématisation du modèle elliptique utilisé

Les profils de température et de vitesse sont donnés par :

$$\Delta T(x,y,z) = \Delta T_c(z) e^{-f(x,y)}$$
$$w(x,y,z) = w_c(z) e^{-f(x,y)}$$

3.4.2 Débit volumique entraîné par un panache elliptique

$$Q = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} w dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} w_c(z) e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^2} e^{-\left(\frac{y}{b}\right)^2} dx dy$$

on pose $X = \frac{x}{a}$ et $Y = \frac{y}{b}$

et $\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-X^2} e^{-Y^2} dX dY = \pi$

donc $Q = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} w_c(z) e^{-X^2} e^{-Y^2} ab dX dY = w_c(z) ab\pi$

3.4.3 Excès d'enthalpie dans un panache elliptique

$$\Phi_z = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} \rho_\infty C_p w \Delta T dx dy = \rho_\infty C_p \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} w_c(z) e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^2} e^{-\left(\frac{y}{b}\right)^2} \Delta T_c(z) e^{-\left(\frac{x}{\lambda_a a}\right)^2} e^{-\left(\frac{y}{\lambda_b b}\right)^2} dx dy$$

λ_a = rayon thermique a/rayon dynamique a
λ_b = rayon thermique b/rayon dynamique b

$$\Phi_z = \rho_\infty C_p w_c(z) \Delta T_c(z) \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{x}{a}\sqrt{\frac{\lambda_a^2+1}{\lambda_a^2}}\right)^2} e^{-\left(\frac{y}{b}\sqrt{\frac{\lambda_b^2+1}{\lambda_b^2}}\right)^2} dx dy$$

on pose $X = \frac{x}{a}\sqrt{\frac{\lambda_a^2+1}{\lambda_a^2}}$ et $Y = \frac{y}{b}\sqrt{\frac{\lambda_b^2+1}{\lambda_b^2}}$

et $\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-X^2}e^{-Y^2}dXdY = \pi$

donc $\Phi_z = \rho_\infty C_p w_c(z)\Delta T_c(z)ab\sqrt{\frac{\lambda_a^{\,2}}{\lambda_a^{\,2}+1}}\sqrt{\frac{\lambda_b^{\,2}}{\lambda_b^{\,2}+1}}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-X^2}e^{-Y^2}dXdY$

$\Phi_z = \rho_\infty C_p w_c(z)\Delta T_c(z)ab\sqrt{\frac{\lambda_a^{\,2}}{\lambda_a^{\,2}+1}}\sqrt{\frac{\lambda_b^{\,2}}{\lambda_b^{\,2}+1}}\pi$

L'excès d'enthalpie à chaque hauteur est constant et égal à la puissance convectée par la source thermique donc $P_c = \Phi_z = \rho_\infty C_p w_c(z)\Delta T_c(z)ab\sqrt{\frac{\lambda_a^{\,2}}{\lambda_a^{\,2}+1}}\sqrt{\frac{\lambda_b^{\,2}}{\lambda_b^{\,2}+1}}\pi$

Pour le panache circulaire, on retrouve la formule classique avec $\lambda = 1$.

3.4.4 Modèle du rayon de panache r(z) et du différentiel de température ΔT_c

Le modèle linéaire du rayon du panache en fonction de la hauteur z permet en principe d'estimer l'origine virtuelle du panache :

$r(z) = p(z - z_v)$
z_v : origine virtuelle
p : pente

d'après la théorie : $p = 6\alpha/5 = 0{,}12$ avec $\alpha = 0{,}1$ pour un panache de source ponctuelle
et $p = 2\alpha/\sqrt{\pi} = 0{,}11$ avec $\alpha = 0{,}1$ pour un panache de source linéaire

Pour tracer le différentiel de température ΔT_c en fonction de la hauteur z, on utilise le modèle de l'équation suivante valable uniquement dans le cas d'une source ponctuelle :

$\Delta T_c(z) = k(z - z_v)^{-\frac{5}{3}}$
k : paramètre

3.4.5 Calcul d'erreur

Dans cette partie, nous présentons une méthode utilisée pour le calcul d'erreur des résultats expérimentaux : la méthode analytique.

a) <u>Méthode analytique</u>

- *Thermique*

Les données expérimentales de température sont modélisées par une distribution gaussienne elliptique :

$\Delta T(x, y, z) = \Delta T_c(z)e^{-f(x,y)}$

avec

$$f(x,y)=(x-x_0)^2\left(\frac{\cos^2\theta}{a^2}+\frac{\sin^2\theta}{b^2}\right)+(y-y_0)^2\left(\frac{\sin^2\theta}{a^2}+\frac{\cos^2\theta}{b^2}\right)+(x-x_0)(y-y_0)\sin 2\theta\left(\frac{1}{a^2}-\frac{1}{b^2}\right)$$

Les paramètres sont : T_a, ΔT_c, x_c, y_c, θ, a, b

Ensuite, on calcule les dérivées partielles de température par rapport à chacun des 7 paramètres (équation 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7) :

$$\frac{\partial T}{\partial T_a}=1 \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \Delta T_c}=e^{-f(x,y)} \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_c}=-T_c e^{-f(x,y)}\left(\frac{\partial f}{\partial x_c}\right) \tag{3.3}$$

avec $\dfrac{\partial f}{\partial x_c}=-2(x-x_c)\left(\dfrac{\cos^2\theta}{a^2}+\dfrac{\sin^2\theta}{b^2}\right)-(y-y_c)\sin 2\theta\left(\dfrac{1}{a^2}-\dfrac{1}{b^2}\right)$

$$\frac{\partial T}{\partial y_c}=-T_c e^{-f(x,y)}\left(\frac{\partial f}{\partial y_c}\right) \tag{3.4}$$

avec $\dfrac{\partial f}{\partial y_c}=-2(y-y_c)\left(\dfrac{\sin^2\theta}{a^2}+\dfrac{\cos^2\theta}{b^2}\right)-(x-x_c)\sin 2\theta\left(\dfrac{1}{a^2}-\dfrac{1}{b^2}\right)$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta}=-T_c e^{-f(x,y)}\left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right) \tag{3.5}$$

avec

$$\frac{\partial f}{\partial \theta}=(x-x_c)^2\left(\frac{-2\sin\theta\cos\theta}{a^2}+\frac{2\sin\theta\cos\theta}{b^2}\right)+(y-y_c)^2\left(\frac{2\sin\theta\cos\theta}{a^2}-\frac{2\sin\theta\cos\theta}{b^2}\right)$$
$$+(x-x_c)(y-y_c)2\sin\theta\cos\theta\left(\frac{1}{a^2}-\frac{1}{b^2}\right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial a}=-T_c e^{-f(x,y)}\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right) \tag{3.6}$$

avec $\dfrac{\partial f}{\partial a}=-2(x-x_c)^2\left(\dfrac{\cos^2\theta}{a^3}\right)-2(y-y_c)^2\left(\dfrac{\sin^2\theta}{a^3}\right)-2(x-x_c)(y-y_c)\left(\dfrac{\sin 2\theta}{a^3}\right)$

$$\frac{\partial T}{\partial b}=-T_c e^{-f(x,y)}\left(\frac{\partial f}{\partial b}\right) \tag{3.7}$$

avec $\frac{\partial f}{\partial b} = -2(x-x_c)^2\left(\frac{\sin^2\theta}{b^3}\right) - 2(y-y_c)^2\left(\frac{\cos^2\theta}{b^3}\right) + 2(x-x_c)(y-y_c)\left(\frac{\sin 2\theta}{b^3}\right)$

On calcule ces 7 fonctions pour les 64 points de mesure

$$X = \begin{vmatrix} \frac{\partial T}{\partial T_a}(1) & \frac{\partial T}{\partial T_c}(1) & \frac{\partial T}{\partial x_c}(1) & \frac{\partial T}{\partial y_c}(1) & \frac{\partial T}{\partial \theta}(1) & \frac{\partial T}{\partial a}(1) & \frac{\partial T}{\partial b}(1) \\ | & | & | & | & | & | & | \\ | & | & | & | & | & | & | \\ | & | & | & | & | & | & | \\ \frac{\partial T}{\partial T_a}(64) & \frac{\partial T}{\partial T_c}(64) & \frac{\partial T}{\partial x_c}(64) & \frac{\partial T}{\partial y_c}(64) & \frac{\partial T}{\partial \theta}(64) & \frac{\partial T}{\partial a}(64) & \frac{\partial T}{\partial b}(64) \end{vmatrix}$$

Enfin, on obtient l'écart type sur chacun des paramètres à partir des équations 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 :

$$\sigma_{Ta}^2 = \sigma_T^2.1 \text{ élèment diagonale de} \left[{}^t XX\right]^{-1} \quad (3.8)$$

$$\sigma_{Tc}^2 = \sigma_T^2.2 \text{ élèment diagonale de} \left[{}^t XX\right]^{-1} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{xc}^2 = \sigma_T^2.3 \text{ élèment diagonale de} \left[{}^t XX\right]^{-1} \quad (3.10)$$

$$\sigma_{yc}^2 = \sigma_T^2.4 \text{ élèment diagonale de} \left[{}^t XX\right]^{-1} \quad (3.11)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \sigma_T^2.5 \text{ élèment diagonale de} \left[{}^t XX\right]^{-1} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{a}^2 = \sigma_T^2.6 \text{ élèment diagonale de} \left[{}^t XX\right]^{-1} \quad (3.13)$$

$$\sigma_{b}^2 = \sigma_T^2.7 \text{ élèment diagonale de} \left[{}^t XX\right]^{-1} \quad (3.14)$$

σ_T = erreur de mesure sur la température

- *Dynamique* :

La méthode pour les champs de vitesse est la même que pour les champs de température et s'applique pour 16 points de mesure.

Les écarts-types des rayons thermiques et dynamiques calculés par cette méthode nous ont permis ensuite de connaître l'incertitude sur les débits et les origines virtuelles :

- *Incertitude sur le débit*

$Q = \pi.a.b.w_c$, $\Delta Q = \pi.(b.w_c.\Delta a + a.w_c.\Delta b + a.b.\Delta w_c)$

- *Incertitude sur l'origine virtuelle*

σ_i : écart-type du rayon thermique ou dynamique obtenu par méthode analytique (i : nombre de plans de mesure).

$$z_v = -\frac{z_0}{p}$$

$$\frac{\Delta z_v}{z_v} = \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta z_0}{z_0}$$

Calcul de la pente p et de l'ordonnée à l'origine z_0 et de leurs incertitudes :

$$s = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\sigma_i^2} \qquad s_x = \sum_{i=1}^{N} \frac{x_i}{\sigma_i^2} \qquad s_y = \sum_{i=1}^{N} \frac{y_i}{\sigma_i^2} \qquad s_{xx} = \sum_{i=1}^{N} \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \qquad s_{xy} = \sum_{i=1}^{N} \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}$$

$$\Delta = s s_{xx} - (s_x)^2$$

$$p = \frac{s s_{xy} - s_x s_y}{\Delta} \qquad \Delta p = \sqrt{\frac{s}{\Delta}}$$

$$z_0 = \frac{s_{xx} s_y - s_x s_{xy}}{\Delta} \qquad \Delta z_0 = \sqrt{\frac{s_{xx}}{\Delta}}$$

Chapitre 4

Qualification

4.1 Introduction

Avant de présenter les résultats expérimentaux du chapitre 5, nous montrons dans ce chapitre les résultats des mesures de température et de vitesse acquises par le système d'acquisition et nous les comparons avec ceux obtenus avec l'ancien système pour un cas de source donné. L'objectif est de qualifier le nouveau système de mesures. Ensuite, nous présentons la distribution superficielle de température des quatre sources rectangulaires afin de les qualifier également.

4.2 Qualification du système de mesure

4.2.1 Ancienne métrologie

- *Température*

Nous avons utilisé 25 thermocouples de type K. Ces thermocouples sont disposés sur un support horizontal en bois, ils sont répartis uniformément tous les 35 cm suivant une grille orthogonale (voir figure 4.1).

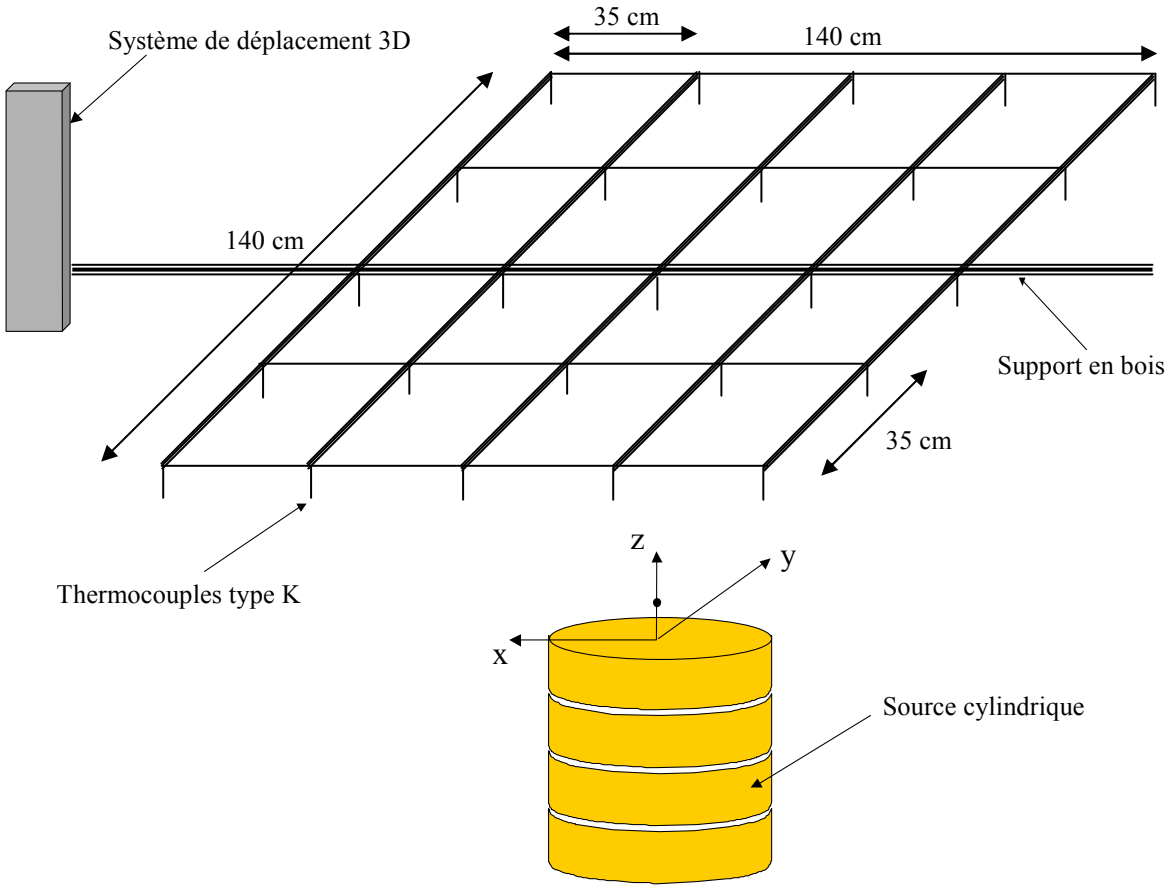


Figure 4.1 : Disposition des thermocouples

- *Vitesse*

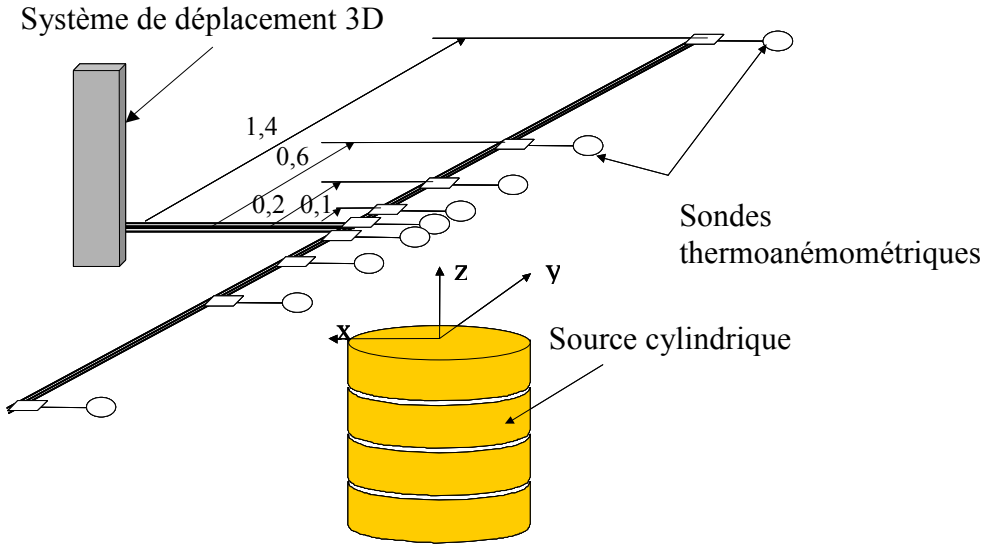


Figure 4.2 : Disposition des sondes thermoanémométriques

Une batterie de 9 unités Vivo-Draught (figure 4.2) a été utilisée par P.Hynynen et A.Bouzinaoui pour mesurer en même temps la vitesse et la température d'air. La mesure de la vitesse d'air est réalisée par une sonde à film chaud omnidirectionnelle, sensible aux faibles vitesses d'air avec un temps de réponse très court permettant de mesurer des fluctuations rapides. La gamme de mesure s'étend de 0,05 à 5 m/s ; des fluctuations avec une fréquence maximale de 10 Hz peuvent être enregistrées. La mesure de température a été réalisée par une petite thermistance capable de mesurer la température avec une incertitude de 0,3 °C.

4.2.2 Nouvelle métrologie

La figure 4.3 illustre la disposition des 64 thermocouples et des 16 sondes thermoanémométriques sur la matrice présentée dans le chapitre 3.

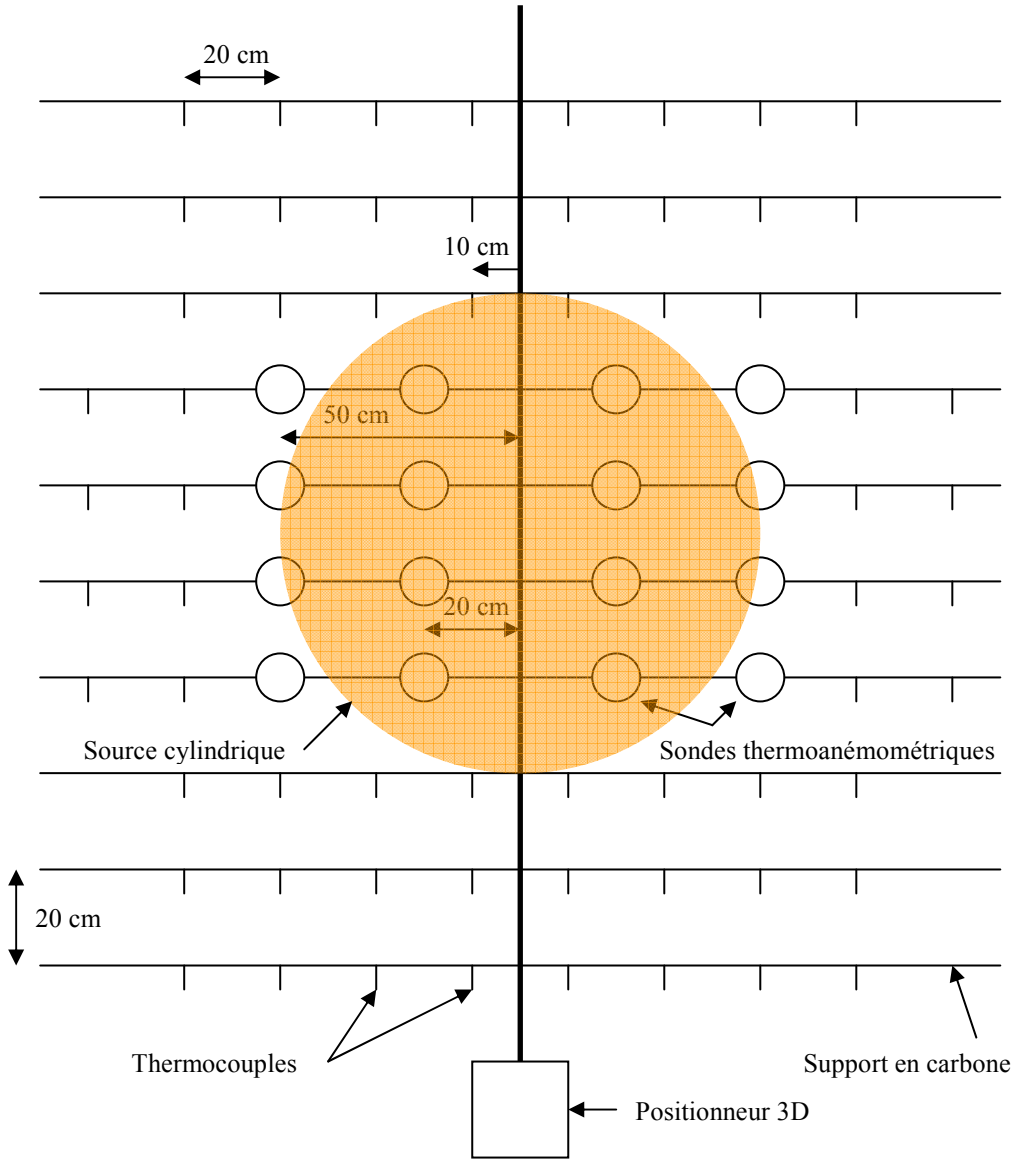


Figure 4.3 : Disposition des thermocouples et des sondes thermoanémométriques (vue de dessus)

4.2.3 Paramètres expérimentaux :

Nous nous sommes placés dans la même configuration expérimentale pour les paramètres d'acquisition des mesures et de la cellule. Nous avons décidé d'étudier un cas parmi les 7 différents cas étudiés par P.Hynynen. Il s'agit d'un cas stable. En effet, le panache obtenu pour le cas 2 est stable au cours du temps pour différentes séries de mesures.

- Paramètres d'acquisition des mesures :

  - Durée d'acquisition : 10 min
  - Fréquence d'échantillonnage des mesures : 10 Hz

- Paramètres de la cellule :

  - Température de soufflage : 20°C
  - Débit de ventilation : 5000 m^3/h (panache en milieu infini : ventilation sans stratification)

- Configuration de la source de chaleur pour le cas 2 :

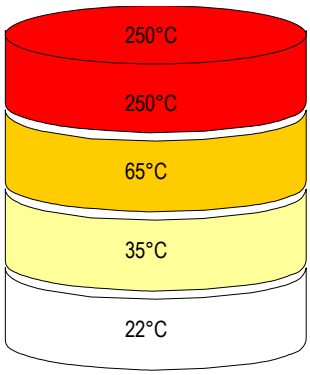


Figure 4.4 : configuration de la source pour le cas 2

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5 (disque)
Cas 2	22	35	65	250	250

Tableau 4.1 : Distribution des températures des zones de la source pour les cas 2 et 3

4.2.4 Résultats expérimentaux

- *Comparaison des champs de température obtenus entre l'ancienne métrologie et la nouvelle métrologie*

Les paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas étudié ont été calculés pour z = 1,25, 1,50, 1,75, 2, 2,25, 2,5, 2,75, 3, 3,25 m. Nous avons regroupé les paramètres (r : rayon thermique, x_0, y_0, ΔT_c) obtenus pour l'ancienne métrologie et la nouvelle métrologie dans le tableau 4.2.

z [m]	Paramètres	Ancienne métrologie	Nouvelle métrologie
1,25	ΔT_c [°C]	17,4	17,6
	r [m]	0,27	0,28
	x_0 [m]	0,06	0,03
	y_0 [m]	-0,044	0,065
1,50	ΔT_c [°C]	14,89	14,95
	r [m]	0,29	0,3
	x_0 [m]	0,06	0,03
	y_0 [m]	-0,042	0,062
1,75	ΔT_c [°C]	12,6	12,75
	r [m]	0,33	0,33
	x_0 [m]	0,06	0,03
	y_0 [m]	-0,034	0,065
2	ΔT_c [°C]	10,83	11,02
	r [m]	0,36	0,36
	x_0 [m]	0,06	0,03
	y_0 [m]	-0,033	0,063
2,25	ΔT_c [°C]	9,36	9,6
	r [m]	0,38	0,39
	x_0 [m]	0,07	0,04
	y_0 [m]	-0,026	0,063
2,50	ΔT_c [°C]	8,45	8,49
	r [m]	0,42	0,43
	x_0 [m]	0,07	0,05
	y_0 [m]	-0,021	0,066
2,75	ΔT_c [°C]	7,42	7,61
	r [m]	0,44	0,46
	x_0 [m]	0,07	0,05
	y_0 [m]	-0,02	0,071
3	ΔT_c [°C]	6,7	6,8
	r [m]	0,48	0,49
	x_0 [m]	0,07	0,06
	y_0 [m]	-0,033	0,078
3,25	ΔT_c [°C]	6,05	6,11
	r [m]	0,5	0,52
	x_0 [m]	0,07	0,07
	y_0 [m]	-0,024	0,081

Tableau 4.2 : Paramètres du modèle gaussien elliptique

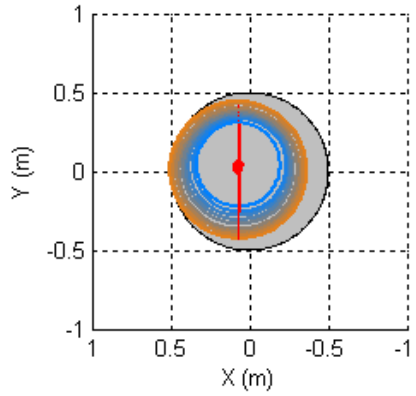
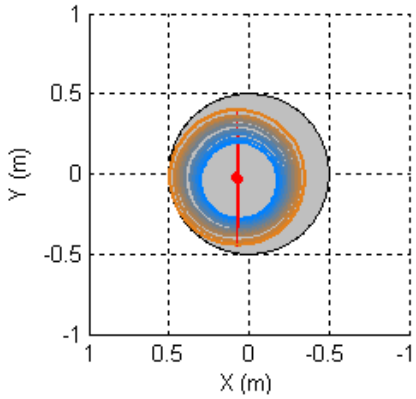
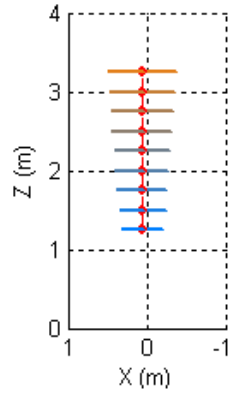
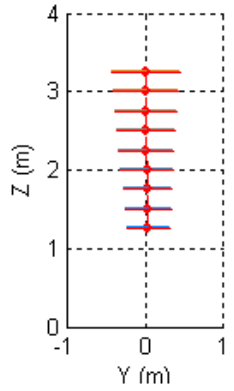
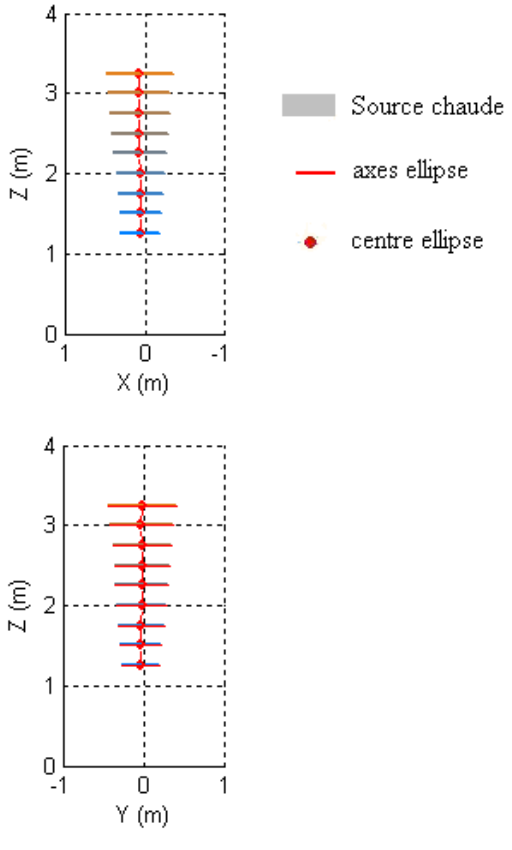
Résultats nouvelle métrologie	Résultats ancienne métrologie
	
Modèles elliptiques gaussiens de distribution de température (isovaleurs ΔTc(z)/e)	
 	
Projection des isothermes ΔTc(z)/e sur les plans (x,z) et (y,z)	

Figure 4.5 : Comparaison des modèles elliptiques (isothermes $\Delta T_c(z)/e$) et des coordonnées x_0 et y_0 du centre entre les deux séries de mesure pour le cas 2 à différentes hauteurs

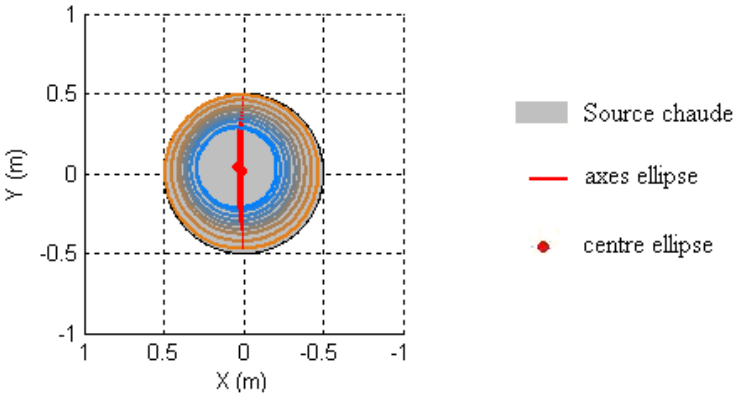
D'après les résultats du tableau 4.2 et de la figure 4.5, on constate des différences entre les paramètres du modèle gaussien de chaque série de mesures. Pour ΔT_c, on observe une légère différence entre les deux séries de mesures. En ce qui concerne le rayon de l'ellipse, les résultats sont assez proches entre les deux séries de mesures, les résultats obtenus avec la nouvelle métrologie sont légèrement supérieurs de 2 à 3 cm. Enfin, on constate que les coordonnées x_0 du centre de l'ellipse entre les deux séries de mesure sont quasiment identiques. Par contre, les coordonnées y_0 obtenues à partir de la nouvelle métrologie sont légèrement supérieures à 0 tandis que celles obtenues à partir de l'ancienne métrologie sont légèrement inférieures à 0.

- *Caractérisation dynamique*

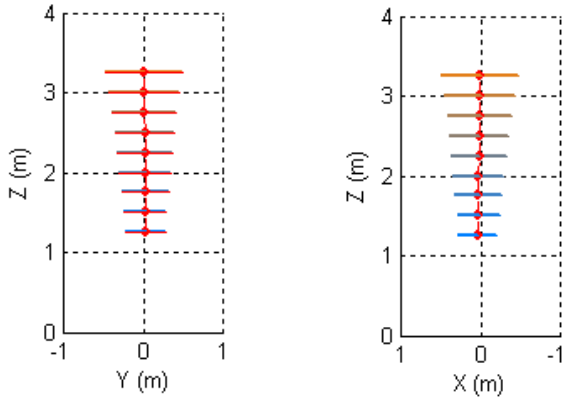
De même que pour la caractérisation thermique du panache, nous avons appliqué le modèle gaussien elliptique pour la caractérisation dynamique du panache. Les paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas étudié ont été calculés pour z = 1,25, 1,50, 1,75, 2, 2,25, 2,5, 2,75, 3, 3,25 m. Nous avons regroupé les paramètres des champs thermiques et dynamiques obtenus par la nouvelle métrologie dans le tableau 4.3.

z [m]	Paramètres dynamiques		Paramètres thermiques	
1,25	w_c	1,5	ΔT_c [°C]	17,6
	r [m]	0,25	r [m]	0,28
	x_0 [m]	0,04	x_0 [m]	0,03
	y_0 [m]	0,035	y_0 [m]	0,065
1,50	w_c	1,45	ΔT_c [°C]	14,95
	r [m]	0,26	r [m]	0,3
	x_0 [m]	0,03	x_0 [m]	0,03
	y_0 [m]	0,03	y_0 [m]	0,062
1,75	w_c	1,29	ΔT_c [°C]	12,75
	r [m]	0,298	r [m]	0,33
	x_0 [m]	0,03	x_0 [m]	0,03
	y_0 [m]	0,03	y_0 [m]	0,065
2	w_c	1,2	ΔT_c [°C]	11,02
	r [m]	0,324	r [m]	0,36
	x_0 [m]	0,03	x_0 [m]	0,03
	y_0 [m]	0,026	y_0 [m]	0,063
2,25	w_c	1,11	ΔT_c [°C]	9,6
	r [m]	0,347	r [m]	0,39
	x_0 [m]	0,02	x_0 [m]	0,04
	y_0 [m]	0,022	y_0 [m]	0,063
2,50	w_c	1,03	ΔT_c [°C]	8,49
	r [m]	0,373	r [m]	0,43
	x_0 [m]	0,02	x_0 [m]	0,05
	y_0 [m]	0,0226	y_0 [m]	0,066
2,75	w_c	0,97	ΔT_c [°C]	7,61
	r [m]	0,40	r [m]	0,46
	x_0 [m]	0,01	x_0 [m]	0,05
	y_0 [m]	0,0204	y_0 [m]	0,071
3	w_c	0,92	ΔT_c [°C]	6,8
	r [m]	0,44	r [m]	0,49
	x_0 [m]	0,01	x_0 [m]	0,06
	y_0 [m]	0,0154	y_0 [m]	0,078
3,25	w_c	0,88	ΔT_c [°C]	6,11
	r [m]	0,48	r [m]	0,52
	x_0 [m]	0,01	x_0 [m]	0,07
	y_0 [m]	0,0092	y_0 [m]	0,081

Tableau 4.3 : Comparaison entre les paramètres thermiques et dynamiques obtenus à partir du modèle gaussien elliptique



Modèles elliptiques gaussiens de distribution de vitesse
(isovaleurs $w_c(z)/e$)



Projection des isovaleurs w_c (z)/e sur les plans (x,z) et (y,z)

Figure 4.6 : Présentation des modèles elliptiques (isovaleurs w_c/e) et des coordonnées x_0 et y_0 du centre pour le cas 2 à différentes hauteurs

D'après le tableau 4.3 et la figure 4.6, on observe que la caractérisation thermique et la caractérisation dynamique du panache pour les même hauteurs de mesure nous donnent des résultats assez similaires. Cette observation était attendue d'après les études précédentes faites par A.Bouzinaoui, cela nous permets donc de qualifier la nouvelle métrologie.
Pour ces deux caractérisations, le rayon du panache croît en fonction de la hauteur. On constate que les rayons dynamiques sont inférieurs aux rayons thermiques pour chaque hauteur z, cet écart se situe entre 4 et 6 cm. On observe également que les coordonnées du centre du panache sont quasiment identiques entre les champs thermiques et dynamiques. La vitesse au centre du panache est de 1,5 m/s pour z = 1,25 m et décroît en fonction de la hauteur jusqu'à 0,88 m/s pour z = 3,25 m. Enfin, on constate que la vitesse au centre du panache est de 1,45 m/s pour z = 1,5 m, ce résultat est en accord avec celui obtenu par P.Hynynen au cours de ces mesures dynamiques faites avec des sondes Vivo pour la même configuration expérimentale.

4.2.5 Conclusion

D'après les caractérisations thermiques et dynamiques obtenues avec le nouveau matériel, on peut constater que les résultats sont quasiment identiques avec ceux obtenus précédemment pour les mêmes configurations expérimentales. On peut donc affirmer que le nouveau matériel est qualifié et opérationnel.

4.3 Qualification de la source rectangulaire

L'objectif est de réaliser des mesures de température par contact sur les différentes zones de la source rectangulaire afin de tester et de qualifier l'homogénéité de la distribution de température sur les parois de la source rectangulaire.

4.3.1 Configuration expérimentale

- *Température de consigne des 4 modules*

La température de consigne a été fixée à 200°C sur les 4 modules rectangulaires (voir figure 4.7).

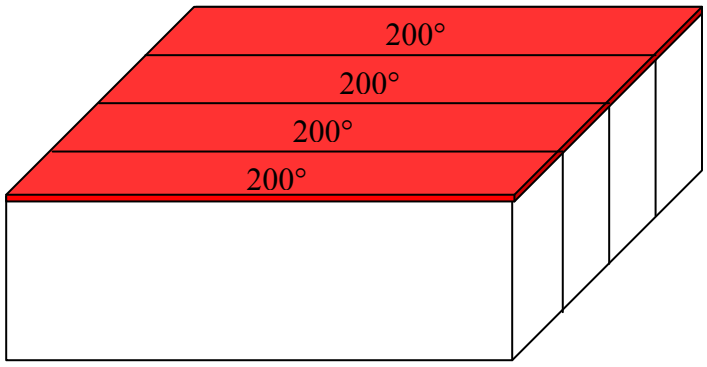


Figure 4.7 : température de consigne des 4 modules rectangulaires

- *Mesures de température : sondes de contact*

La répartition de la température superficielle de la source a été mesurée avec une sonde de contact (thermocouple de type K)

4.3.2 Résultats

Après 2 heures de mise en chauffe de la source, nous avons réalisé l'acquisition des températures en 59 points différents sur la surface supérieure, 9 points sur une des surfaces longitudinales, 12 points sur une des surfaces latérales. Le temps d'acquisition sur chacun des points de mesure est d'une minute. Ces points de mesure sont répartis comme l'indique la figure (4.8).
A partir des températures moyennes mesurées et d'un programme développé sur Matlab, nous avons obtenu, par extrapolation, la répartition graphique de la température de la source (figure 4.8).
Au niveau de la sonde de température PT100 (sonde de régulation) située au centre de la plaque, nous avons exactement 200 °C, ce qui prouve bien que la régulation est efficace.

Cependant, pour la surface supérieure, nous pouvons remarquer l'existence d'une zone chaude où les températures atteignent 215 °C. Hormis cette zone chaude, les températures de la surface supérieure se situent entre 195°C et 205°C et sont proches de la température de consigne T = 200°C.
On remarque également qu'il existe un transfert de chaleur par conduction sur les parois latérales où les températures se situent entre 30 et 50°C et entre 30 et 75°C respectivement sur la surface latérale longueur et sur la surface latérale largeur.

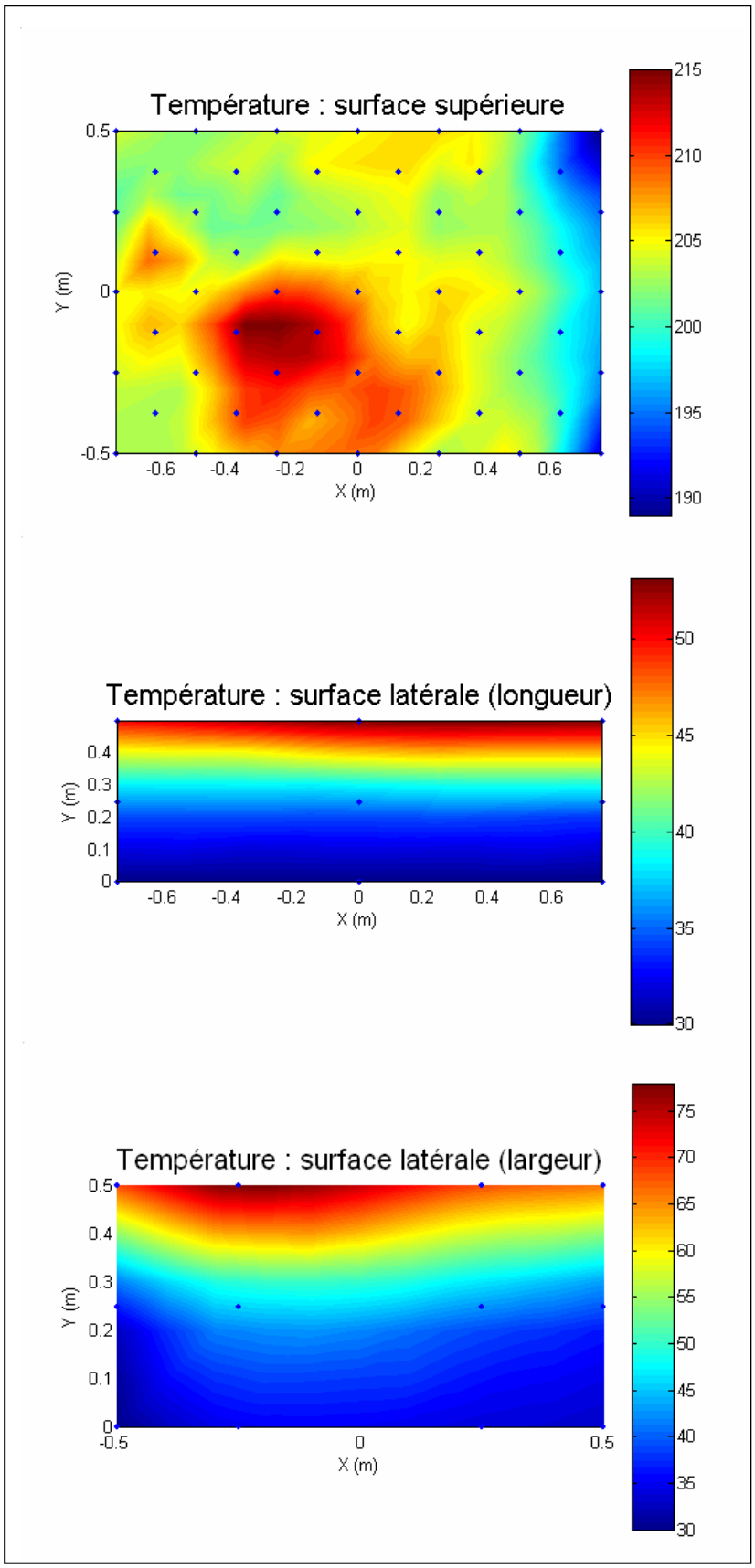


Figure 4.8 : Températures de surfaces de la source rectangulaire
Distribution de température sur la surface supérieure de la source rectangulaire et sur les parois latérales selon un plan.

Chapitre 5

Résultats expérimentaux

5.1 Source cylindrique

5.1.1 Introduction

Cette partie présente une étude expérimentale basée sur des mesures de vitesse et de température d'un panache développé au-dessus d'une source cylindrique de dimensions finies. Cinq configurations différentes de source ont été testées. Dans le premier cas, seul le disque supérieur a été chauffé. Puis, pour les quatre autres cas, on a maintenu le disque supérieur chaud et on a chauffé successivement de haut en bas les 4 zones latérales du cylindre jusqu'à ce que le cylindre soit entièrement chaud. Les températures de surface ont été choisies de manière à conserver la même puissance convectée par la source pour les cinq configurations.
Ainsi, l'objectif de cette étude est d'observer peu à peu l'effet de la troisième dimension sur le développement du panache au-dessus d'une source cylindrique à partir d'un cas 2D (le cas 1 : disque chauffé) et de plusieurs cas 3D. Nous avons donc réalisé des séries de mesure de température et de vitesse pour les cinq cas étudiés. Ces mesures ont permis de déduire le rayon du panache ainsi que son débit à chaque hauteur au-dessus de la source.

5.1.2 Configuration expérimentale

La disposition des thermocouples et des sondes thermoanémométriques sur la matrice est celle de la figure 4.3.

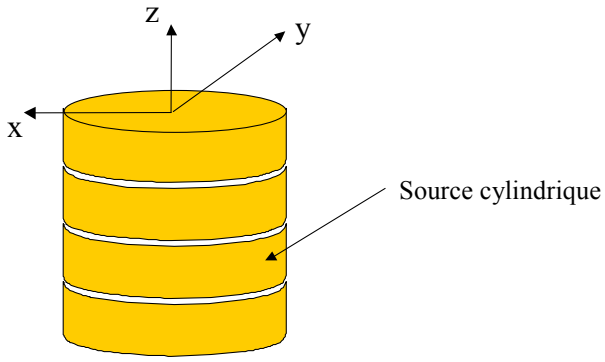
- Paramètres d'acquisition des mesures :

  - Durée d'acquisition : 10 min
  - Fréquence d'échantillonnage des mesures : 1 Hz

- Paramètres de la cellule :

  - Température de soufflage : 20°C
  - Débit de ventilation : 5000 m^3/h (panache en milieu infini : ventilation sans stratification)

- Repérage :



• Configuration de la source de chaleur pour les cas 1, 2, 3, 4 et 5 :

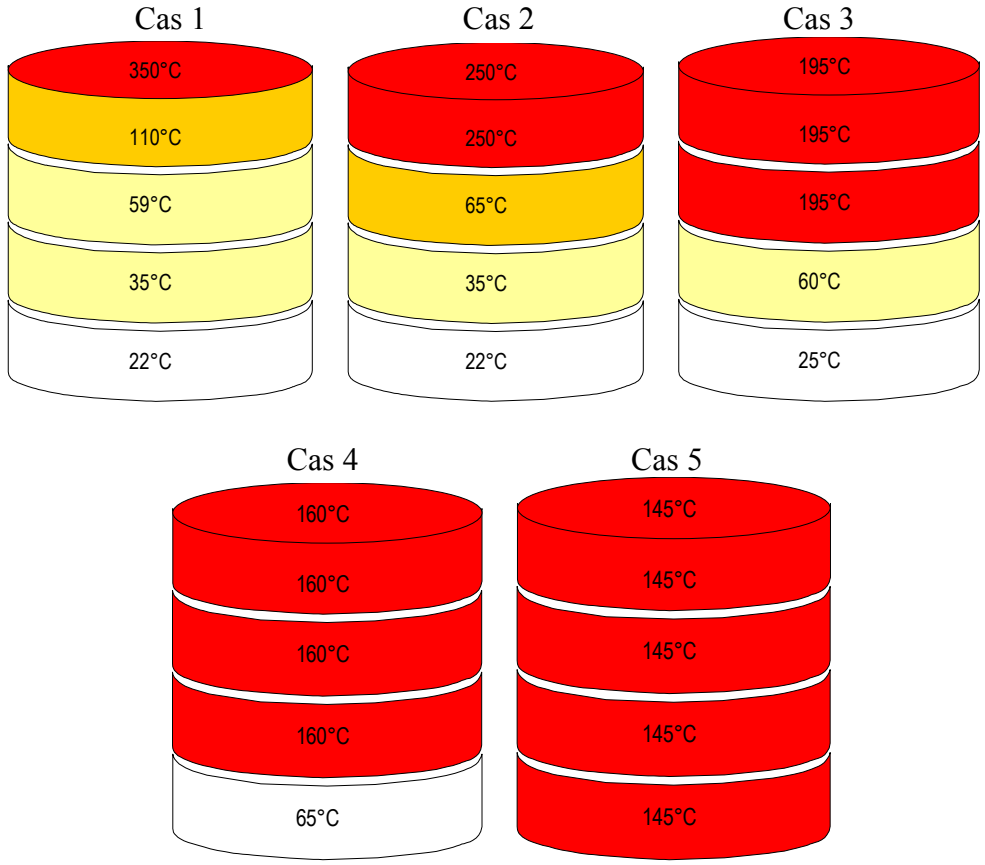


figure 5.1 : configuration de la source pour les cas 1, 2, 3, 4, 5

• Puissances

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
Pt (W)	5100	5000	5300	5160	5220
Pc + Pr (W)	5100	5100	5500	5300	5400

Tableau 5.1 : bilan de puissances pour les 5 configurations

La puissance électrique P_t fournie à la source est normalement égale, d'une part, à la somme des puissances convectée P_C et rayonnée P_R par la source et d'autre part, à la puissance P_{tra} emportée par l'air traversant la cellule (si on considère que les murs de la cellule sont bien isolés par rapport à l'extérieur). Cela permet d'écrire le bilan énergétique global dans la cellule :

$$P_t = P_R + P_C = P_{tra} \tag{5.1}$$

La puissance emportée par l'air qui traverse la cellule peut être calculée par :

$P_{tra} = Q_v \rho C_p (T_R - T_V)$

où

ρ est la masse volumique de l'air ($kg.m^{-3}$),

C_p est la chaleur massique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$),

T_R est la température de reprise (°C).

T_v est la température de soufflage (°C)

L'égalité (5.1) est sensiblement respectée dans les résultats présentés dans le tableau (5.1).

5.1.3 Comparaison des résultats expérimentaux obtenus à partir du modèle gaussien elliptique pour les 5 cas étudiés.

Dans cette partie, nous allons comparé les paramètres du modèle gaussien elliptique appliqué aux champs de température et de vitesse pour les cinq séries de mesures.

- *Température*

z [m]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,25	0,02	0,049	0,247	0,247	19,89
1,5	0,02	0,05	0,265	0,265	17
1,75	0,03	0,049	0,283	0,283	14,94
2	0,03	0,048	0,308	0,308	12,76
2,25	0,03	0,047	0,332	0,332	11,14
2,5	0,04	0,047	0,362	0,362	9,71
2,75	0,04	0,045	0,394	0,394	8,6
3	0,05	0,049	0,420	0,420	7,7
3,25	0,06	0,049	0,447	0,447	6,83

Tableau 5.2 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 1

z [m]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,25	0,03	0,065	0,28	0,28	17,6
1,5	0,03	0,062	0,3	0,3	14,95
1,75	0,03	0,065	0,33	0,33	12,75
2	0,03	0,063	0,36	0,36	11,02
2,25	0,04	0,063	0,39	0,39	9,6
2,5	0,05	0,066	0,43	0,43	8,49
2,75	0,05	0,071	0,46	0,46	7,61
3	0,06	0,078	0,49	0,49	6,8
3,25	0,07	0,081	0,52	0,52	6,11

Tableau 5.3 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 2

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,25	93,85	0,062	0,123	0,35	0,33	12,6
1,5	94,02	0,069	0,123	0,38	0,36	10,6
1,75	94,3	0,073	0,124	0,42	0,39	9
2	94,53	0,081	0,128	0,45	0,42	7,7
2,25	94,25	0,088	0,124	0,48	0,45	6,8
2,5	94,76	0,095	0,134	0,49	0,48	5,8
2,75	94,71	0,14	0,105	0,53	0,54	5
3	95,16	0,107	0,142	0,53	0,56	4,5
3,25	94,31	0,115	0,151	0,56	0,59	3,8

Tableau 5.4 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 3

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,25	98,6	0,106	0,256	0,46	0,35	10,6
1,5	97,1	0,096	0,217	0,48	0,4	8,6
1,75	95,6	0,089	0,258	0,55	0,42	7,5
2	95,3	0,102	0,24	0,56	0,46	6,7
2,25	95,3	0,109	0,26	0,63	0,51	5,8
2,5	91,6	0,064	0,197	0,57	0,5	4,9
2,75	93,4	0,122	0,2	0,64	0,59	4,5
3	93,3	0,128	0,18	0,62	0,6	3,9

Tableau 5.5 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 4

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,25	100,72	0,13	0,134	0,39	0,41	9,1
1,5	99,29	0,107	0,104	0,42	0,42	7,8
1,75	96,03	0,097	0,079	0,45	0,41	7,1
2	98,66	0,149	0,117	0,5	0,49	6
2,25	96,83	0,124	0,087	0,51	0,48	5,3
2,5	98,09	0,172	0,131	0,57	0,58	4,6
2,75	97,12	0,145	0,082	0,57	0,57	4
3	95,91	0,13	0,067	0,59	0,58	3,5
3,25	96,83	0,178	0,135	0,62	0,65	2,9

Tableau 5.6 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 5

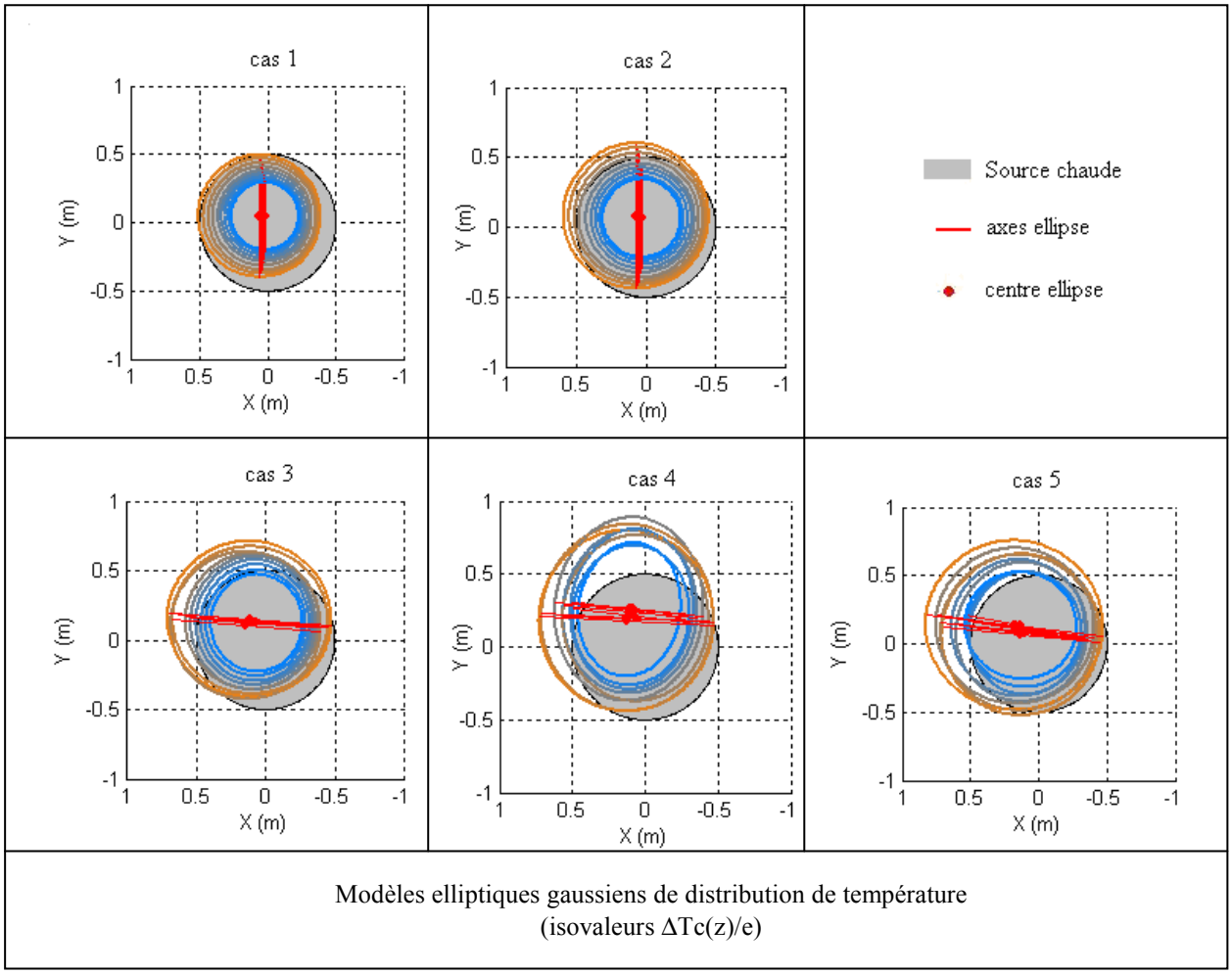


Figure 5.2 : Comparaison des modèles elliptiques (isothermes $\Delta T_c(z)/e$) entre les cinq séries de mesure à z = 1,25, 1,50, 1,75, 2,25 ,2,75 et 3,25 m

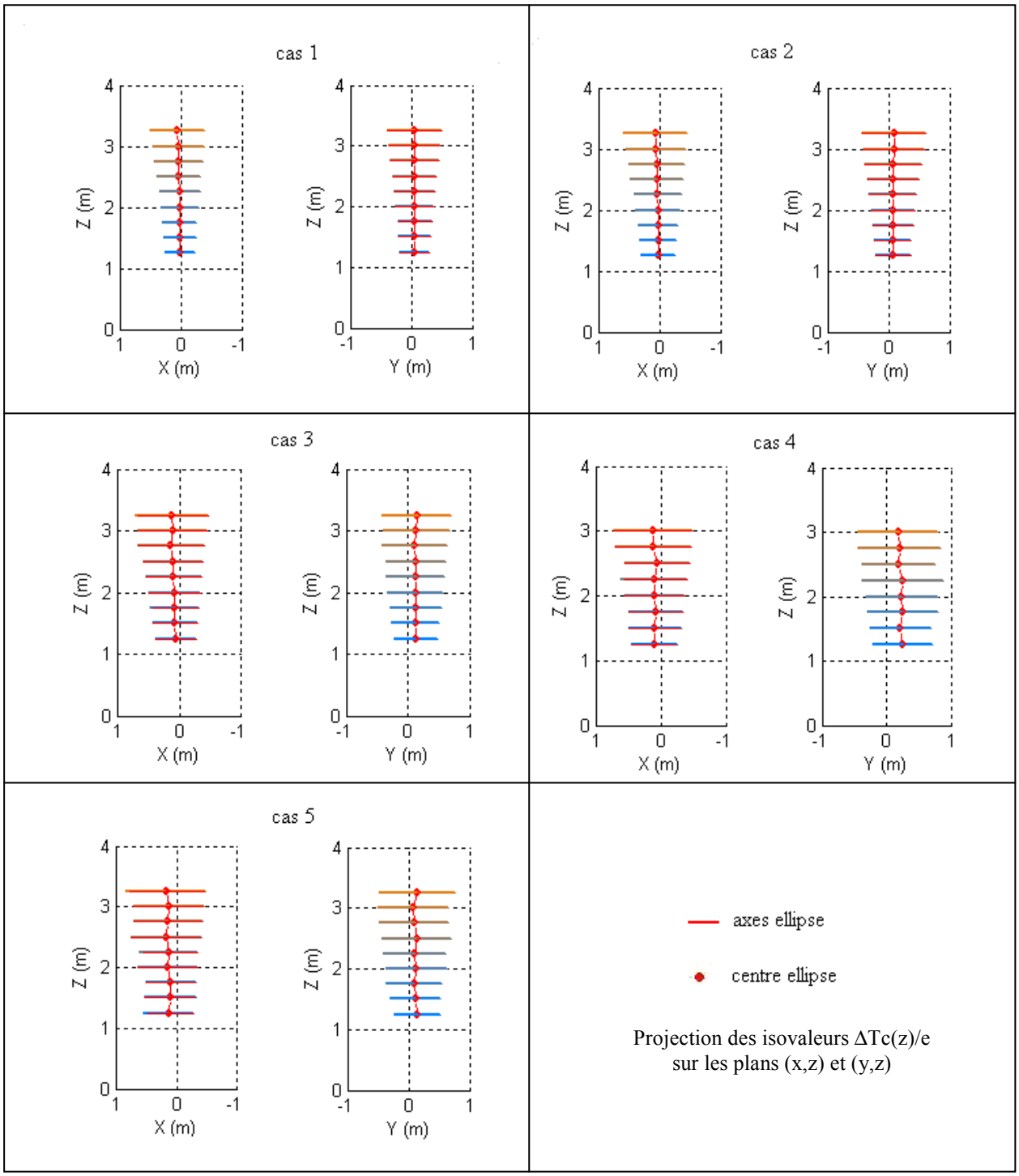


Figure 5.3 : Comparaison des coordonnées x_0 et y_0 du centre entre les cinq séries de mesure à différentes hauteurs

D'après les tableaux 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 et les figures 5.2 et 5.3, on peut tout d'abord constater que les panaches des différents cas sont stables d'un point de vue spatial. Ensuite, on peut observer que les formes des panaches obtenus pour les cas 1 et 2 sont axisymétriques. Quant aux panaches obtenus pour les cas 3, 4, 5, il sont de formes elliptiques. On peut également observer que les coordonnées du centre du panache sont excentrées par rapport au centre de la source cylindrique pour les cas 3, 4, 5. On peut supposer que l'excentricité et la forme elliptique du panache obtenue pour les cas 3, 4, 5 sont dues à la dissymétrie du soufflage à l'intérieur de la cellule. Les panaches développés pour les configurations de

source des cas 1 et 2 sont axisymétriques et quasiment centrés et sont donc moins sensibles à cette dissymétrie du soufflage.
Les rayons thermiques obtenus pour les cinq cas étudiés ont tendance à croître au fur et mesure que les zones latérales du cylindre sont chauffées. Cette constatation était prévisible et logique. A noter que les résultats obtenus pour le cas 4 sont égaux ou légèrement supérieurs à ceux du cas 5, ceci est du probablement à l'incertitude des mesures et à la configuration de source assez proche entre les deux cas.
Enfin, plus les différentes parois latérales du cylindre sont chauffées, plus l'écart de température entre le centre du panache et l'extérieur est faible. Ce résultat était attendu car les températures des parois sont de plus en plus faibles au fur et à mesure qu'on augmente le nombre de surfaces latérales chauffées.

- *Vitesse*

z [m]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,25	0,03	0,0309	0,239	0,239	1,52	980
1,5	0,03	0,0307	0,258	0,258	1,44	1084
1,75	0,03	0,0298	0,278	0,278	1,38	1206
2	0,03	0,0272	0,306	0,306	1,27	1345
2,25	0,03	0,0249	0,331	0,331	1,19	1474
2,5	0,03	0,0227	0,359	0,359	1,14	1662
2,75	0,03	0,0234	0,388	0,388	1,07	1831
3	0,03	0,0237	0,409	0,409	1,01	1911
3,25	0,03	0,0206	0,452	0,452	0,97	2241

Tableau 5.7 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 1

z [m]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,25	0,03	0,0436	0,277	0,277	1,3	1128
1,5	0,03	0,0421	0,305	0,305	1,23	1294
1,75	0,03	0,0411	0,327	0,327	1,19	1439
2	0,02	0,0382	0,364	0,364	1,11	1663
2,25	0,02	0,0384	0,385	0,385	1,06	1777
2,5	0,02	0,0378	0,419	0,419	1,01	2005
2,75	0,01	0,0453	0,45	0,45	0,96	2199
3	0,02	0,05	0,511	0,511	0,96	2835
3,25	0,02	0,0552	0,523	0,523	0,87	2691

Tableau 5.8 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 2

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,25	92,93	0,069	0,117	0,4	0,35	0,92	1457
1,5	93,51	0,066	0,109	0,44	0,37	0,94	1730
1,75	93,62	0,061	0,103	0,47	0,39	0,95	1970
2	94,14	0,063	0,097	0,51	0,41	0,95	2246
2,25	92,99	0,064	0,084	0,54	0,44	0,95	2552
2,5	93,96	0,059	0,086	0,58	0,49	0,92	2957
2,75	93,28	0,057	0,083	0,61	0,53	0,9	3290
3	93,85	0,045	0,086	0,63	0,56	0,89	3551
3,25	91,96	0,046	0,091	0,67	0,6	0,86	3910

Tableau 5.9 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 3

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,25	96,7	0,101	0,243	0,59	0,38	0,86	2180
1,5	96,1	0,079	0,210	0,61	0,43	0,83	2462
1,75	95,6	0,074	0,254	0,74	0,43	0,84	3023
2	95,4	0,08	0,223	0,73	0,47	0,85	3298
2,25	95,1	0,078	0,239	0,83	0,5	0,83	3895
2,5	89,6	0,044	0,161	0,8	0,54	0,84	4104
2,75	93	0,072	0,155	0,81	0,59	0,83	4486
3	92	0,072	0,124	0,81	0,63	0,82	4732
3,25	93,7	0,085	0,07	0,87	0,71	0,8	5588

Tableau 5.10 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 4

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,25	98,26	0,103	0,076	0,49	0,38	0,8	1685
1,5	96,6	0,085	0,047	0,52	0,41	0,82	1977
1,75	93,39	0,082	0,021	0,55	0,42	0,86	2247
2	97,23	0,104	0,037	0,61	0,44	0,84	2550
2,25	94,31	0,088	0,006	0,63	0,47	0,85	2846
2,5	96,6	0,093	0,034	0,7	0,51	0,84	3391
2,75	93,22	0,09	-0,015	0,68	0,55	0,84	3553
3	91,62	0,082	-0,029	0,72	0,57	0,83	3852
3,25	93,22	0,089	0,015	0,82	0,64	0,79	4689

Tableau 5.11 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour le cas 5

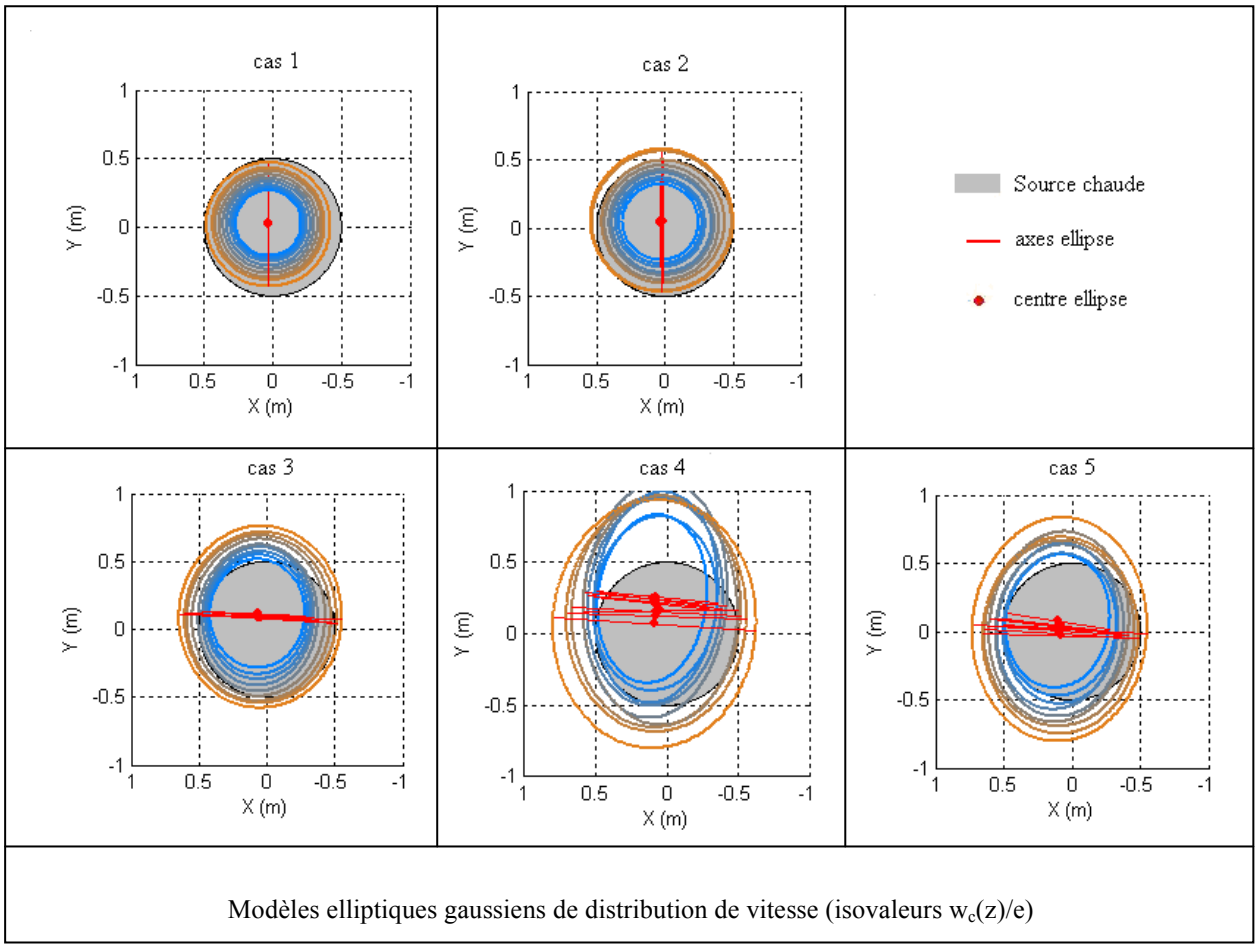


Figure 5.4 : Comparaison des modèles elliptiques (isovaleurs $w_c(z)/e$) entre les cinq séries de mesure à z = 1,25, 1,50, 1,75, 2,25 ,2,75 et 3,25 m

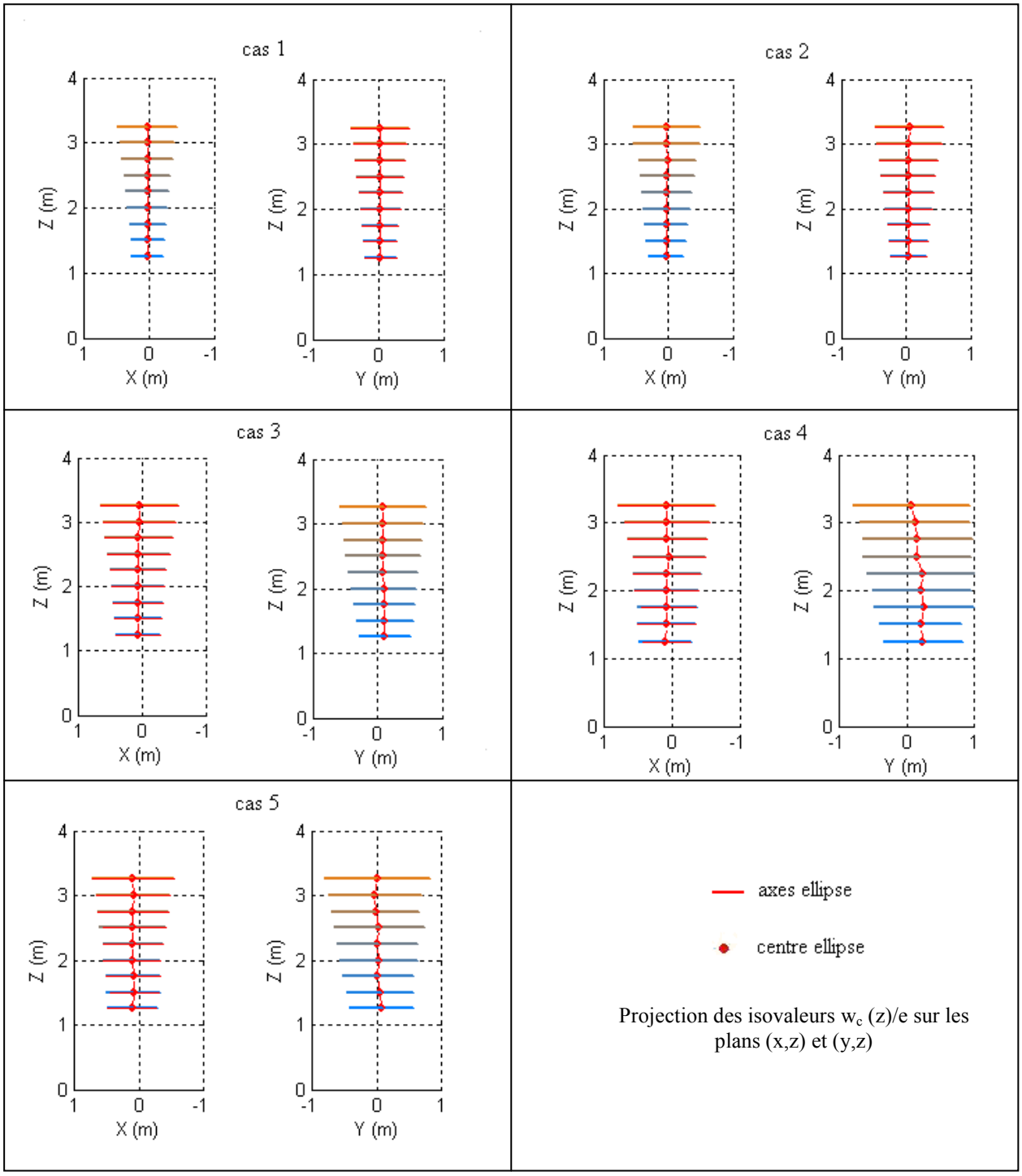


Figure 5.5 : Comparaison des coordonnées x_0 et y_0 du centre entre les cinq séries de mesure à différentes hauteurs

D'après les tableaux 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 et les figures 5.4 et 5.5, on peut constater que l'évolution des paramètres du modèle gaussien elliptique appliqué au champ de vitesse est similaire à celle du champ des températures. Ainsi, on observe de la même manière que pour les champs de température les remarques suivantes :

- L'excentricité et le caractère elliptique du panache pour les cas 3, 4, 5

- Les rayons dynamiques croissent au fur et à mesure que les différentes parois du cylindre sont chauffées
- La stabilité spatiale du panache

Enfin la vitesse au centre du panache décroît au fur et à mesure que les différentes parois du cylindre sont chauffées. Toutefois l'évolution de la vitesse au centre du panache en fonction de la hauteur z n'est pas la même que ΔT_c pour les cas 3, 4 et 5. En effet, on observe une légère augmentation de la vitesse en zone proche puis la vitesse devient constante et enfin elle diminue.

5.1.4 Estimation de l'origine virtuelle

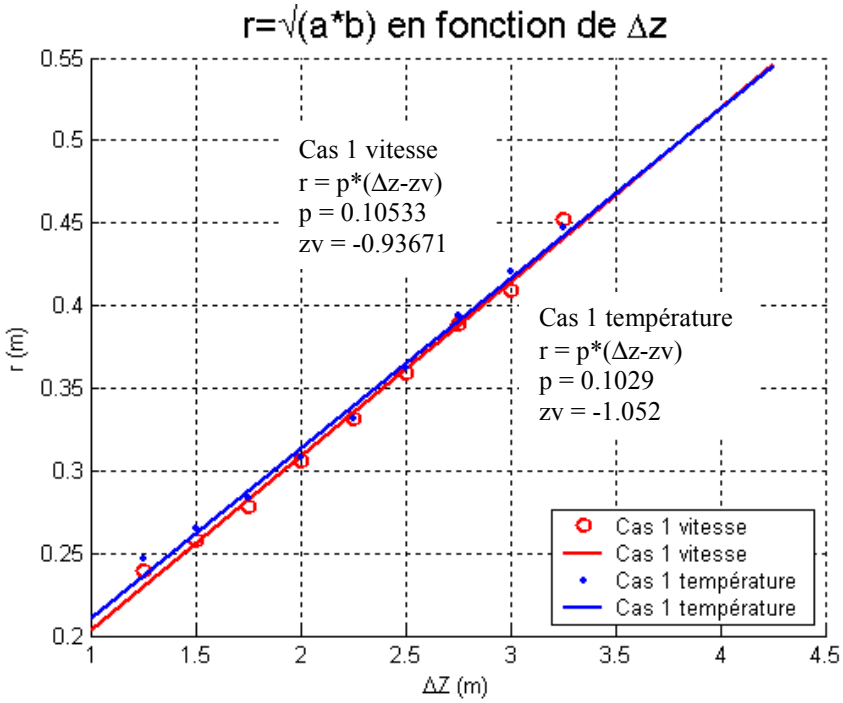


Figure 5.6 : Evolution des rayons thermiques et dynamiques en fonction de z - Comparaison des origine virtuelles : cas 1

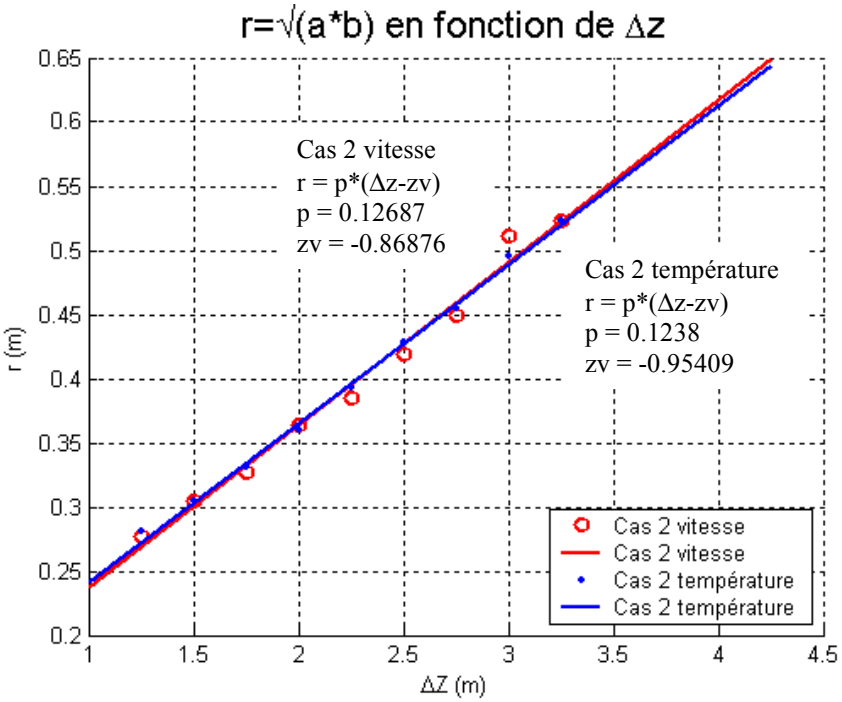


Figure 5.7 : Evolution des rayons thermiques et dynamiques en fonction de z - Comparaison des origine virtuelles : cas 2

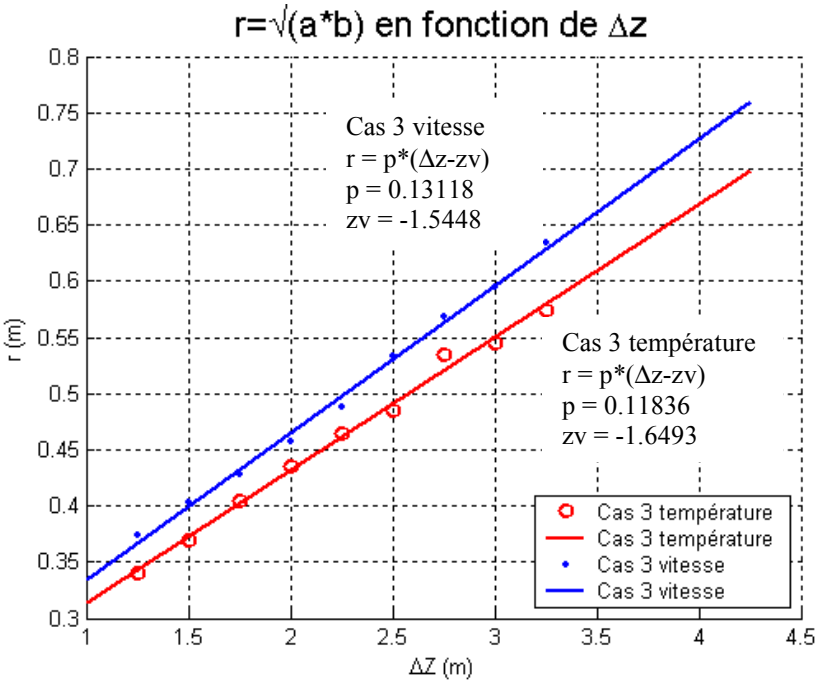


Figure 5.8 : Evolution des rayons thermiques et dynamiques en fonction de z - Comparaison des origine virtuelles : cas 3

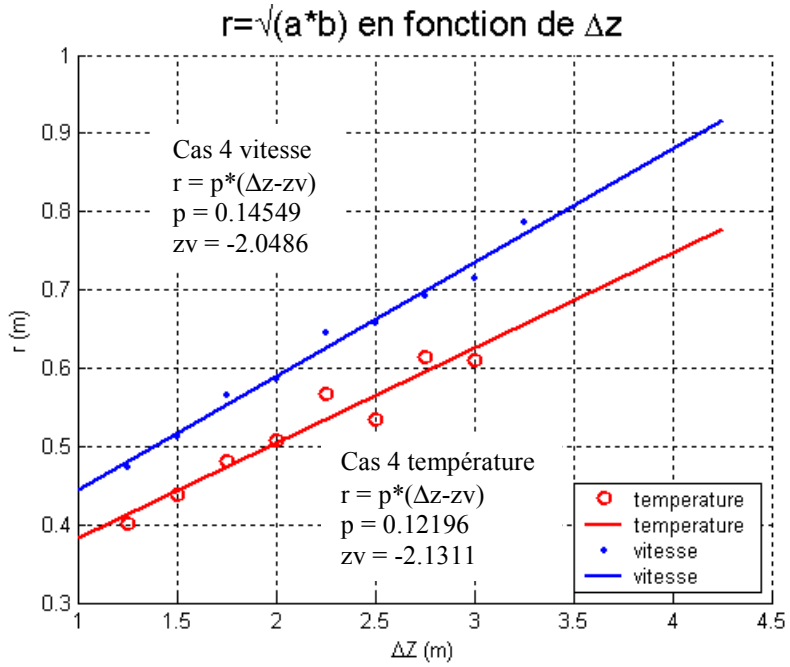


Figure 5.9 : Evolution des rayons thermiques et dynamiques en fonction de z - Comparaison des origine virtuelles : cas 4

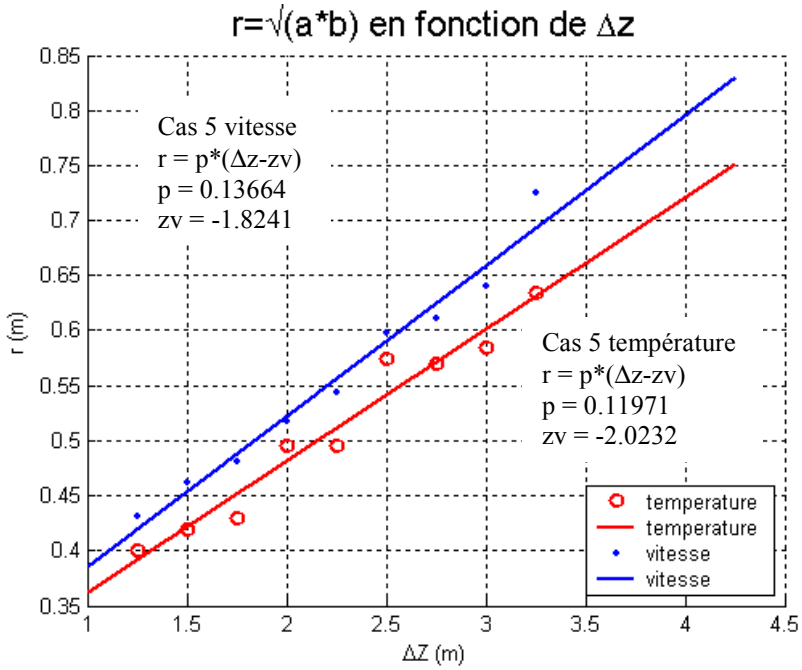


Figure 5.10 : Evolution des rayons thermiques et dynamiques en fonction de z - Comparaison des origine virtuelles : cas 5

Les figures 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 et 5.10 illustrent l'évolution des rayons thermiques et dynamiques en fonction de Δz pour les cinq séries de mesures. D'après ces figures, nous avons estimé et comparé les paramètres et les origines virtuelles obtenus à partir des modèles présentés dans le chapitre 3 pour chaque série de mesures.

		Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5	
		T	V	T	V	T	V	T	V	T	V
$r(z) = p(z - z_v)$	p	0,1	0,1	0,124	0,127	0,118	0,131	0,122	0,145	0,119	0,136
	$z_v(m)$	-1,05	-0,94	-0,95	-0,87	-1,65	-1,54	-2,13	-2,05	-2,02	-1,82

Tableau 5.12 : tableau récapitulatif des paramètres obtenus par les modèles $r(z) = p(z - z_v)$ pour les champs de température et de vitesse des 5 cas étudiés

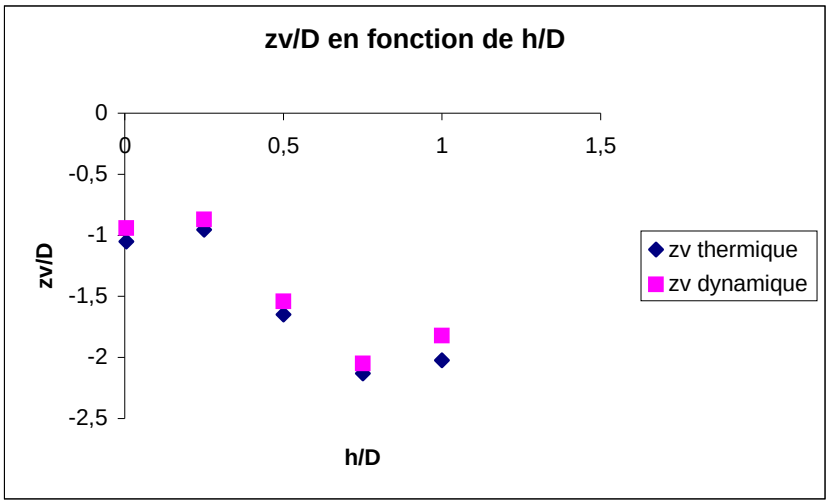


Figure 5.11 : z_v /D en fonction de hauteur de chauffe/D obtenus avec zv thermique et zv dynamique

D'après les figures 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 et 5.10, on peut observer que les rayons thermiques et dynamiques sont quasiment identiques pour les configurations de source 1 et 2. Il n'en est pas de même pour les cas 3, 4, 5 où les rayons dynamiques sont supérieurs aux rayons thermiques. Le tableau 5.12 récapitule les paramètres obtenus par les modèles $r(z) = p(z - z_v)$ pour les champs de température et de vitesse des 5 cas étudiés. D'après ce tableau, on peut constater que le paramètre a obtenu pour les cas 1, 2, 3, 4, 5 est en accord avec la théorie des panaches en zone lointaine (p = 0,12). En ce qui concerne l'origine virtuelle, les résultats pour les cas 1 et 2 confirment la théorie des panaches en zone lointaine pour les disques chauffants où z_v est égal à –1D (D :Diamètre de la source thermique). Pour les cinq cas, on peut remarquer que les origine virtuelles obtenues d'après les rayons thermiques et dynamiques sont différentes. D'après la figure 5.11, on remarque également que les origines virtuelles thermiques et dynamiques ont tendance à diminuer au fur et à mesure qu'on chauffe entièrement le cylindre du haut vers le bas. Il ne se dégage pas de relation claire entre l'origine virtuelle et la hauteur de chauffe. Cependant, en considérant les deux premiers cas équivalents à une source d'une hauteur de chauffe de 0,25 cm et en admettant une origine virtuelle égale à –2,5 m pour le dernier cas, on obtient l'équation suivante :

$$\frac{z_v}{D} = -2\frac{h}{D} - 0{,}5$$

En tenant compte des hypothèses précédentes, cette équation donne la position de l'origine virtuelle pour une source cylindrique en fonction de son diamètre et de sa hauteur de chauffe.

Ainsi, d'après le tableau 5.11 et les figures 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 et 5.10, on peut supposer que les cas 3, 4, 5 vérifient la théorie des panaches en zone lointaine.

5.1.5 Estimation du débit d'air emporté par le panache

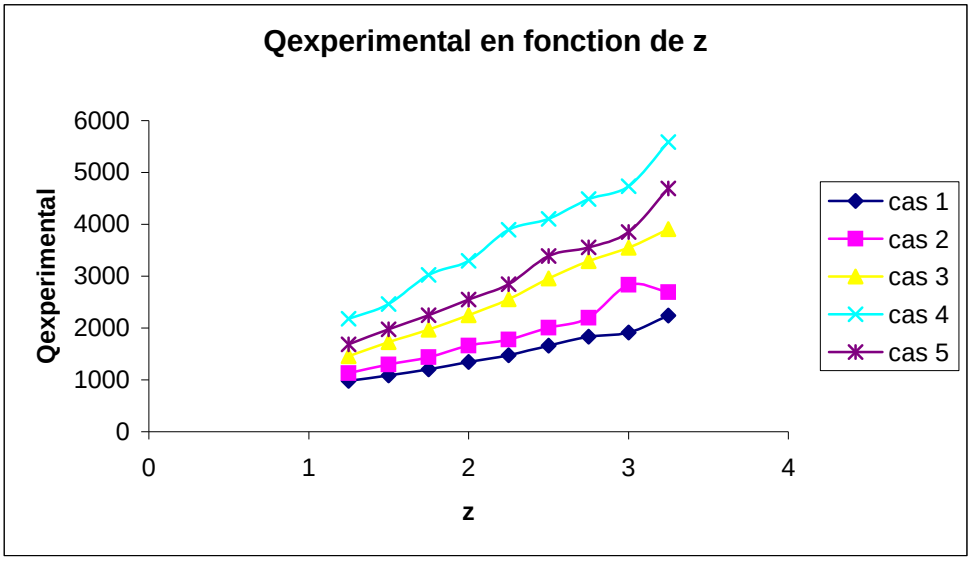


figure 5.12 : Evolution du débit d'air emporté par le panache en fonction de z pour les cinq cas étudiés

La figure 5.12 illustre l'évolution du débit d'air emporté par le panache en fonction de z pour les cinq cas étudiés. L'estimation du débit a été calculée à partir de la vitesse au centre du panache (paragraphe 3.4.2).
D'après cette figure, excepté le cas 4, on peut constater que plus le cylindre est entièrement chauffé, plus le débit d'air emporté par le panache est important. On peut donc supposer que la 3eme dimension a une influence sur le débit d'air emporté par le panache.

5.1.6 ΔT_c, w_c, Q en fonction de $z - z_v$

Dans cette partie, nous présentons les courbes d'évolution de la température et de la vitesse au centre du panache ainsi que le débit en fonction de $z - z_v$ pour les cinq cas étudiés. L'objectif est de vérifier si les panaches obtenus pour les 5 cas étudiés vérifient la théorie de l'origine virtuelle des panaches en zone développée.

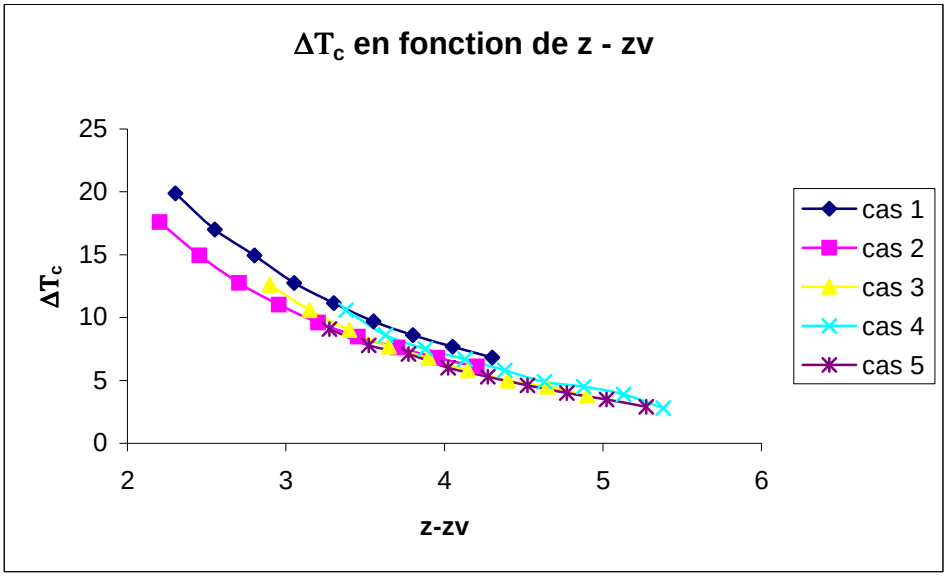


figure 5.13 : Evolution de la température au centre du panache en fonction de z-z_v pour les cinq cas étudiés

La figure 5.13 illustre l'évolution de la température au centre du panache en fonction de z-z_v pour les cinq cas étudiés. L'origine virtuelle est celle obtenue à partir de l'évolution des rayons thermiques en fonction de z.
On peut remarquer que les courbes des ΔT_c obtenues à partir de géométries de sources différentes sont assez proches et ont un peu près la même tendance.

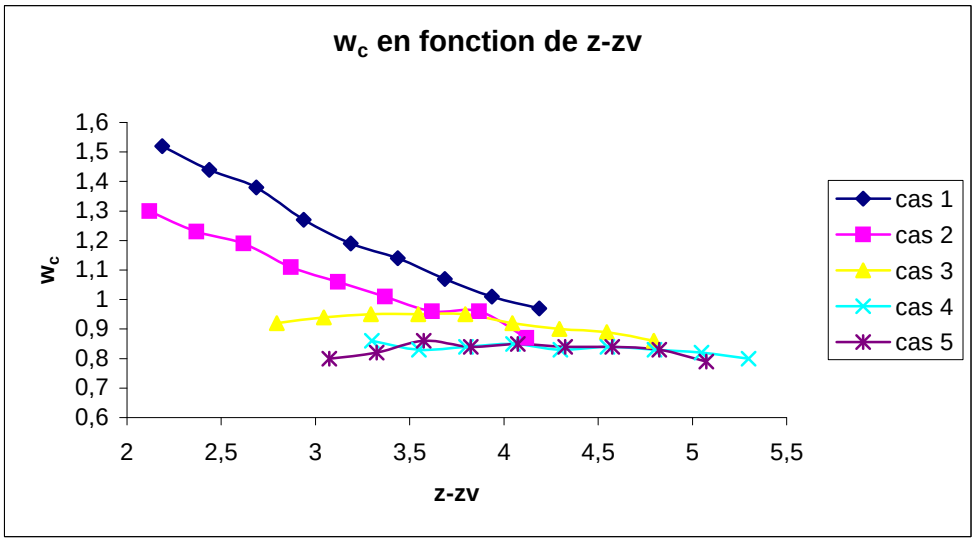


figure 5.14 : Evolution de la vitesse au centre du panache en fonction de z-z_v pour les cinq cas étudiés

La figure 5.14 illustre l'évolution de la vitesse au centre du panache en fonction de z-z_v pour les cinq cas étudiés. L'origine virtuelle est celle obtenue à partir de l'évolution des rayons dynamiques en fonction de z.
D'après cette figure, on peut constater que les courbes obtenues pour les 5 cas ont un peu près la même tendance à partir de z-z_v = 3. Ainsi les résultats obtenus pour la vitesse au centre du panache en fonction de z-z_v sont similaires à ceux obtenus pour la température au centre du panache où la tendance était aussi globalement la même pour les cas étudiés. On a montré

précédemment que la cote des origines virtuelles diminuait au fur et à mesure qu'on chauffait entièrement le cylindre. Donc, la zone de panache développé est de plus en plus basse respectivement pour les cas 1 à 5. Ceci explique peut être la différence de tendance entre les courbes obtenues pour les cas 3, 4 et 5 et celles obtenues pour les cas 1 et 2 lorsque $z\text{-}z_v < 3$ où le commencement des courbes se situe probablement en zone proche.

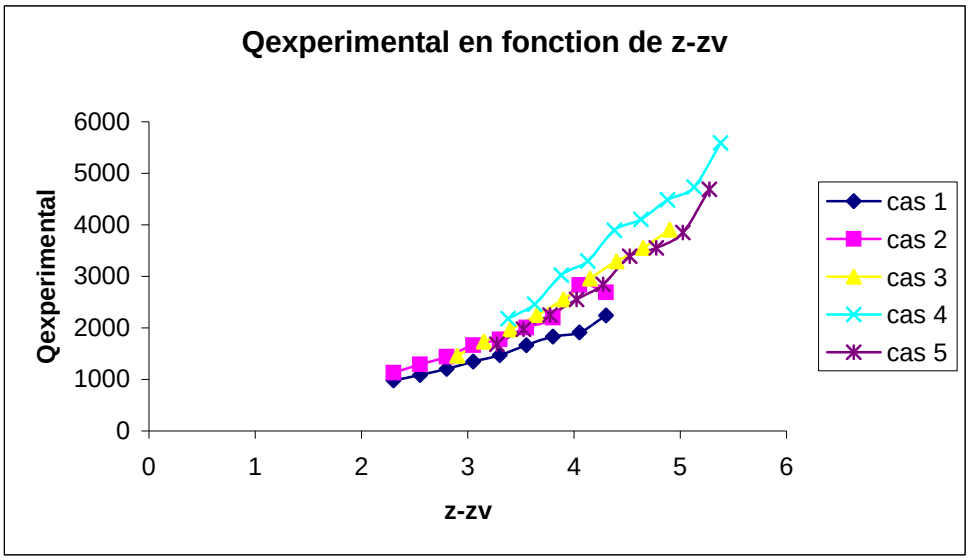


figure 5.15 : Evolution du débit d'air emporté par le panache en fonction de $z\text{-}z_v$ pour les cinq cas étudiés

La figure 5.15 illustre l'évolution du débit d'air emporté par le panache en fonction de $z\text{-}z_v$ pour les cinq cas étudiés. L'origine virtuelle est celle obtenue à partir de l'évolution des rayons thermiques en fonction de z.
D'après cette figure, on peut constater que les courbes obtenues des débits obtenus à partir de géométries de sources différentes sont assez proches et ont un peu près la même tendance pour les 5 cas. Le débit obtenu pour le cas 1 est légèrement inférieur à ces 4 courbes. Quant au débit obtenu pour le cas 4, il est légèrement supérieur aux quatre autre cas.
D'après les figures 5.13, 5.14 et 5.15, on peut supposer que la théorie des panaches en zone lointaine est vérifiée pour les 5 cas.

5.1.7 Comparaison entre les débits théoriques et les débits expérimentaux d'air emportés par le panache

Dans cette partie, nous présentons les résultats des débits expérimentaux et les débits théoriques calculés à partir de l'équation $Q(z) = K_Q P_c^{1/3} (z - z_v)^{5/3}$ avec $K_Q = 0{,}005$.

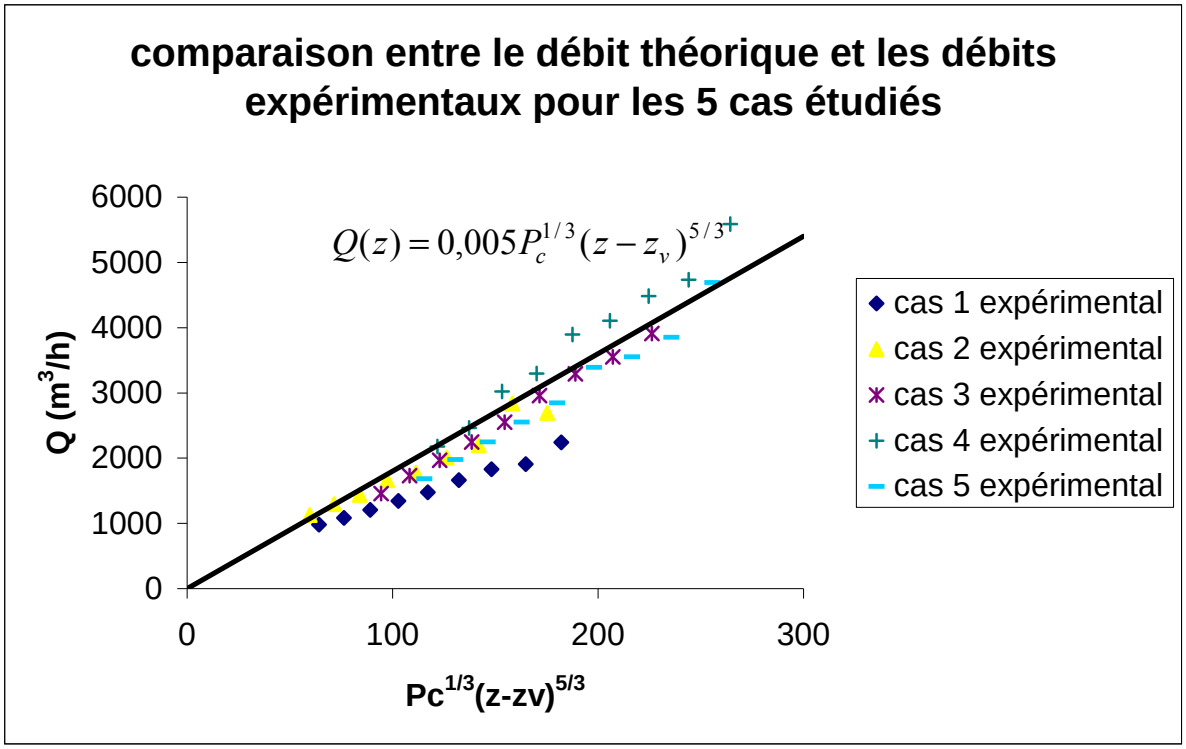


Figure 5.16 : Comparaison entre les débits expérimentaux et théoriques pour les 5 cas étudiés

D'après la figure 5.16, nous remarquons que les débits du panache mesurés et ceux calculés par la relation de Skaret [2] ou par la loi générale sont assez proches pour les cas 2, 3, 4 et 5. Le débit expérimental obtenu pour le cas 1 est légèrement décalé par rapport à la droite théorique du débit. Ces résultats confirment la supposition faite dans le paragraphe précèdent : les panaches obtenus pour les cinq cas étudiés confirment la théorie de l'origine virtuelles des panaches en zone développée.

	Relation de Skaret	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
K_Q	0,005	0,00348	0,0046	0,0047	0,0055	0,0046

Tableau 5.13 : Comparaison entre le coefficient K_Q théorique obtenu par la relation de skaret [2] et les coefficients expérimentaux K_Q obtenus par la méthode des moindres carrés

Le tableau ci-dessus présente une comparaison entre le coefficient K_Q théorique obtenu par la relation de skaret [2] et les coefficients expérimentaux K_Q obtenus par la méthode des moindres carrés. Hormis le cas 1, les résultats expérimentaux sont assez proches de la relation de skaret [2]. Le coefficient moyen K_Q expérimental obtenu pour les 5 cas est égal à 0,0047, l'erreur est de 6%. Cette erreur est certainement reliée aux incertitudes inévitables des mesures.

5.1.8 Evaluation de l'excès d'enthalpie du panache

En utilisant les valeurs de λ, r, w_c et ΔT_c trouvées expérimentalement, nous avons calculé à chaque hauteur z au-dessus de la source et pour chaque cas l'excès d'enthalpie Φ_z donné par la relation théorique suivante :

$$\Phi_z = \rho_\infty C_p \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1} \Delta T_c w_c \pi r^2$$

Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau 5.14, nous avons calculé la moyenne dans chacun des cas.

Enthalpie (W)					
z	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
1,25	3288	3342	2765	3269	2310
1,5	3102	3257	2764	2994	2324
1,75	3034	3089	2670	3206	2403
2	2889	3086	2606	3125	2305
2,25	2765	2872	2615	3195	2273
2,5	2716	2866	2584	2844	2351
2,75	2651	2817	2479	2855	2141
3	2477	3245	2408	2610	2031
3,25	2577	2768	2239		2049
Enthalpie moyenne	2830	3040	2570	3010	2250
λ	1	1	0,9	0,85	0,9

Tableau 5.14 : Excès d'enthalpie du panache calculé à chaque hauteur

Les enthalpies calculées pour chaque hauteur sont assez constantes et sont quasiment égales pour les 5 cas, ces résultats vérifient donc les hypothèses émises.

5.1.9 Influence de la géométrie de la source sur les paramètres Q, ΔT_c, w_c

Afin d'étudier l'influence de la géométrie de la source sur le développement du panache, nous avons effectué pour chaque paramètres Q, ΔT_c, w_c, le rapport entre celui du cas étudié et celui d'un cas référence. Ensuite, nous avons normalisé le rapport précèdent par le rapport des puissances convectées (cas étudié/cas référence) de façon à s'affranchir de ce paramètre qui n'est pas le même pour les différents cas étudiés. Le cas référence est le même et a été choisi arbitrairement.

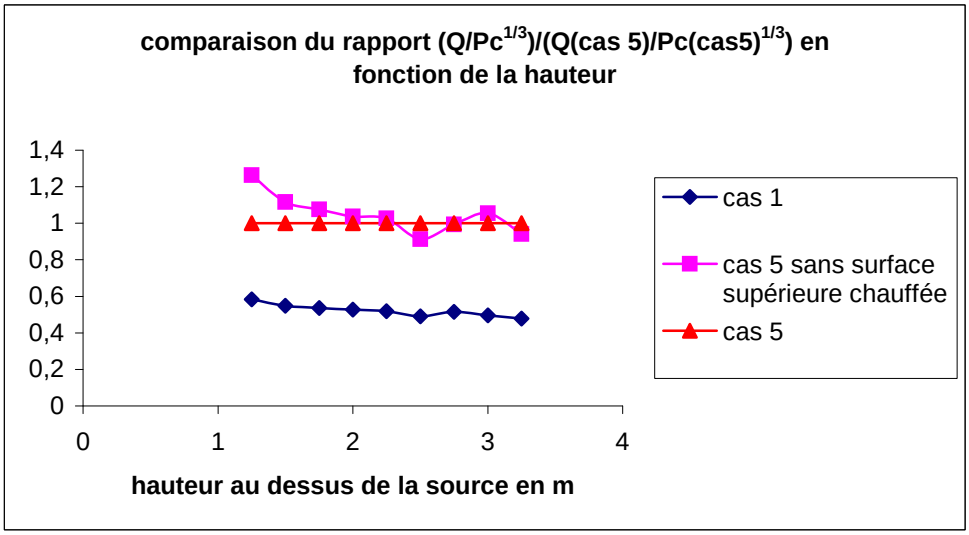


figure 5.17 : comparaison du rapport débit/puissance convectée entre un cas étudié et le cas référence pour plusieurs cas de sources rectangulaires

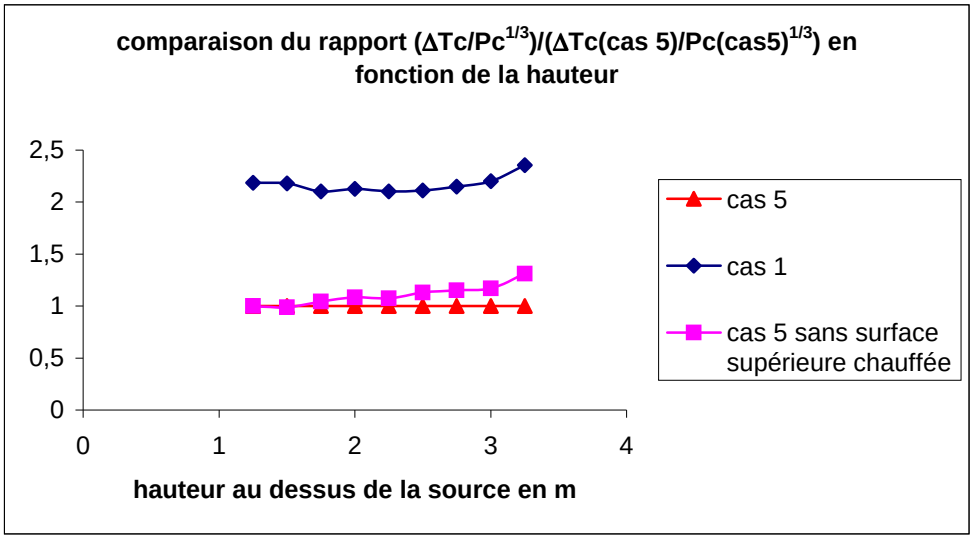


figure 5.18 : comparaison du rapport ΔT_c /puissance convectée entre un cas étudié et le cas référence pour plusieurs cas de sources rectangulaires

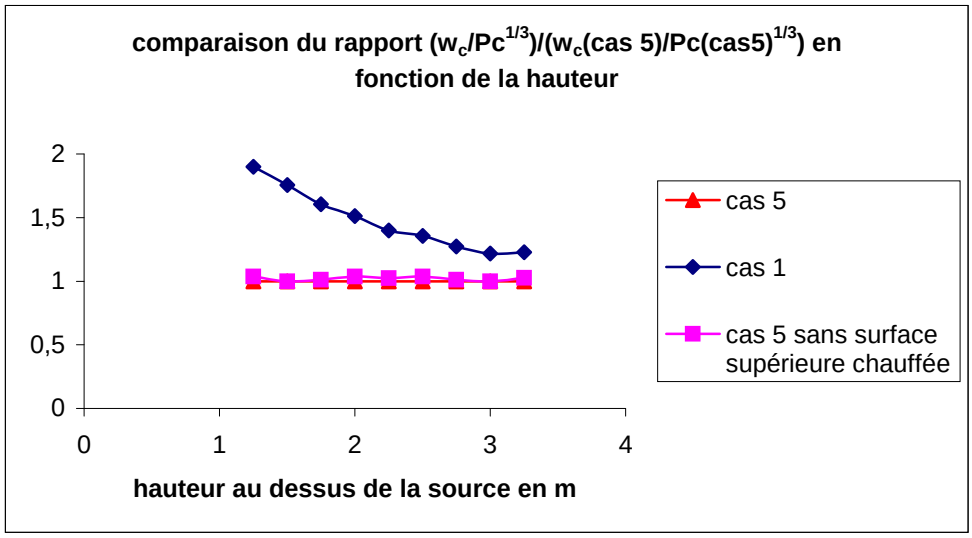


figure 5.19 : comparaison du rapport w_c /puissance convectée entre un cas étudié et le cas référence pour plusieurs cas de sources rectangulaires

Les figures ci-dessus présente l'évolution du rapport débit/puissance convectée, ΔT_c /puissance convectée, w_c /puissance convectée entre un cas étudié et le cas référence pour plusieurs cas de sources cylindriques. Seul le disque chauffe dans le cas 1, tandis que pour le cas 5, le cylindre est entièrement chauffé. Le cas référence choisi est le cas 5. D'après ces figures, on constate que le rapport étudié en fonction de la hauteur est proche de 1 pour le cas 5 sans surface supérieure chauffée ce qui montre que la surface supérieure du cylindre n'a pas beaucoup d'influence sur le débit , ΔT_c et w_c lorsque le cylindre est entièrement chauffé. Par contre, le rapport avec le cas 1 où seule la surface supérieure du cylindre chauffe est très éloigné de 1. Ainsi, on peut supposer que les parois latérales du cylindre influent sur les paramètres débit, ΔT_c, w_c du panache.
Q, ΔT_c, w_c sont dépendants de l'origine virtuelle d'après les lois théoriques. Or, nous avons vu que l'origine virtuelle était fonction de la hauteur de chauffe dans le cas de la source cylindrique. Ainsi, la troisième dimension ou la hauteur de chauffe d'une source thermique a

des conséquences sur la position de l'origine virtuelle et sur l'évolution des paramètres débit, ΔT_c, w_c du panache.

5.1.10 Erreur de mesure

Dans cette partie, nous présentons les erreurs de mesure obtenues sur les rayons thermiques, les rayons dynamiques, le débit et l'origine virtuelle à partir de la méthode analytique présentée dans le paragraphe 3.4.5 a).

- *Erreur de mesure : rayon thermique*

D'après l'étude de répétitivité décrite en annexes, nous avons fixé une imprécision sur la mesure de température égale à 0,4°C.

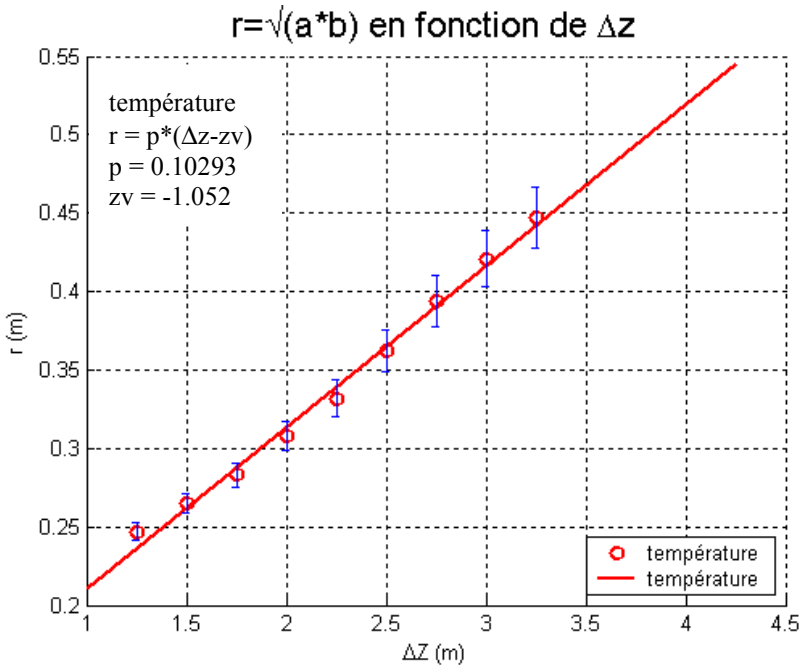


Figure 5.20 : Evolution des rayons thermiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 1

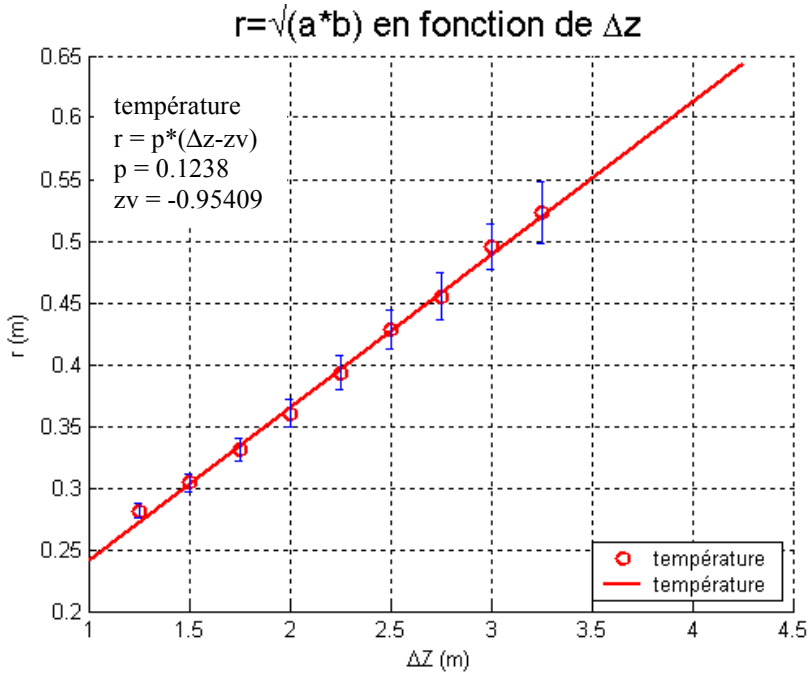


Figure 5.21 : Evolution des rayons thermiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 2

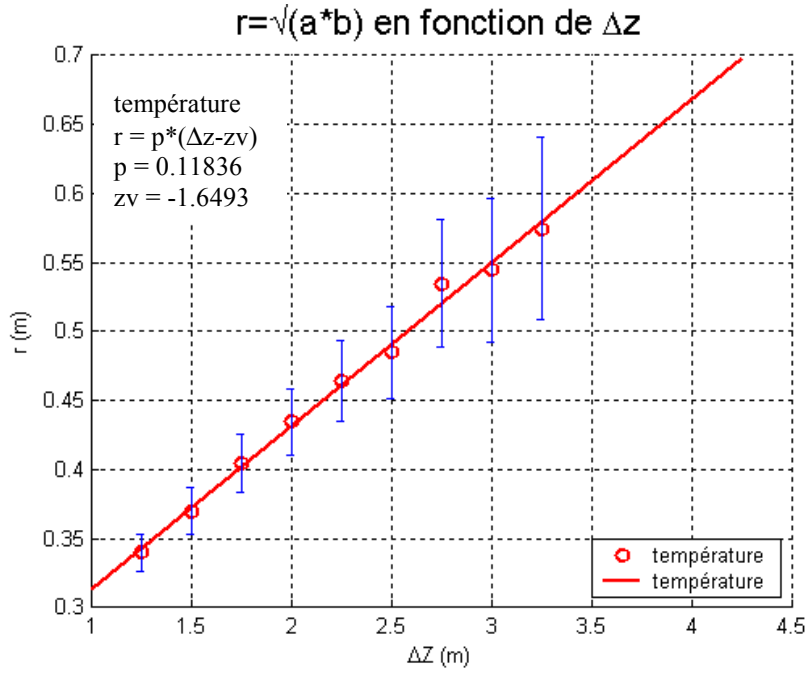


Figure 5.22 : Evolution des rayons thermiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 3

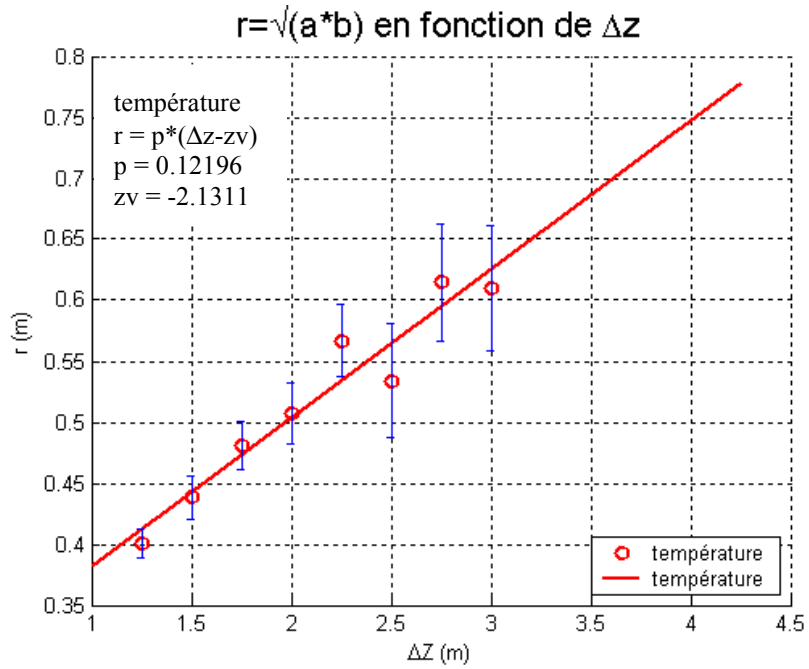


Figure 5.23 : Evolution des rayons thermiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 4

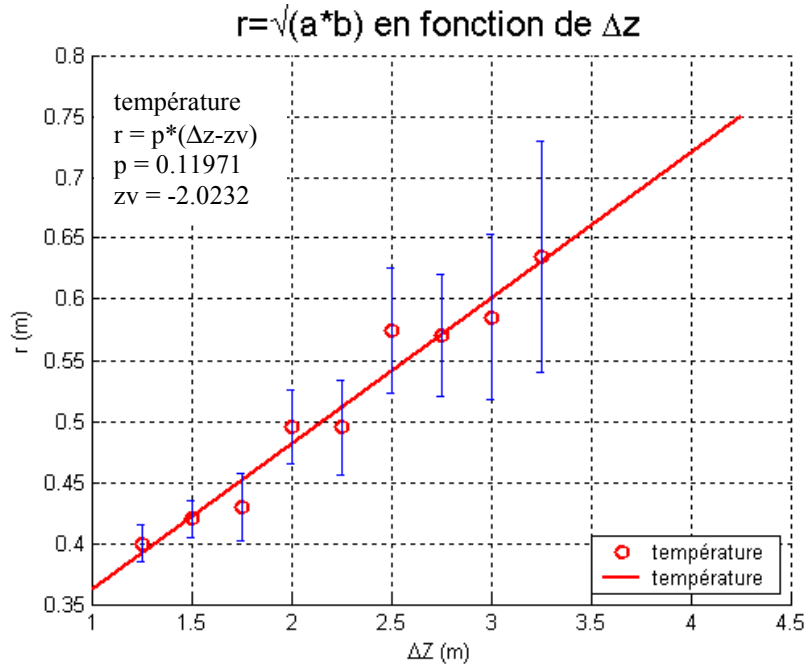


Figure 5.24 : Evolution des rayons thermiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 5

Les figures 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 illustrent le rayon thermique et son incertitude calculées à partir de la méthode analytique en fonction de z. Les barres d'erreurs indiquées sur les figures pour chaque hauteur z représente deux fois l'écart-type obtenu sur les rayons thermiques a et b. On peut observer que ces barres d'erreur sont de plus en plus grandes au fur et à mesure que z augmente. Ces barres d'erreurs sont comprises entre 1 cm et 5 cm pour les cas 1 et 2 et entre 2 et 10 cm pour les cas 3, 4, 5.

➢ *Erreur de mesure : dynamique*

La méthode est la même que pour la partie thermique. Ici, nous avons fixé l'erreur sur la mesure de vitesse égale à 0,02 m/s d'après l'étude de répétitivité.

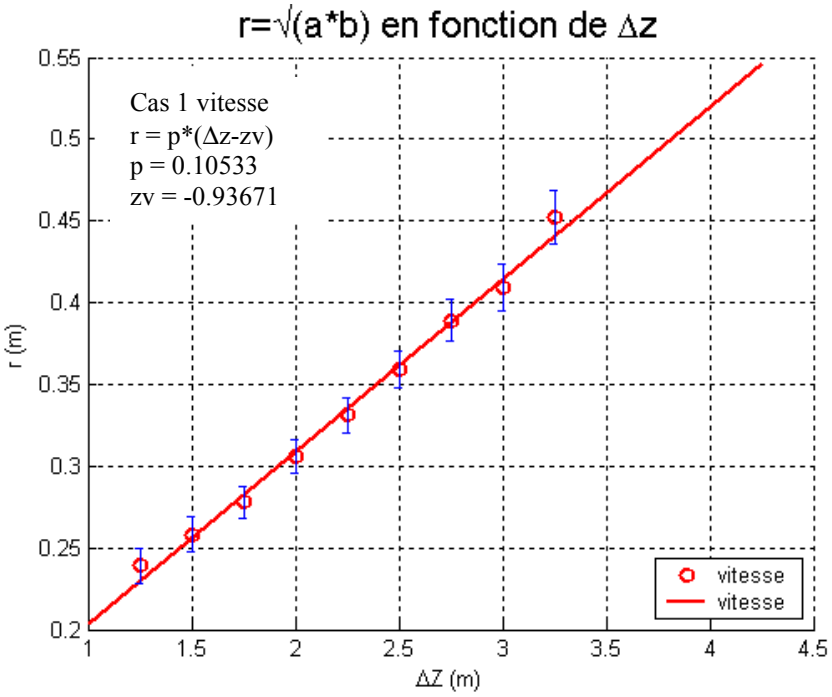


Figure 5.25 : Evolution des rayons dynamiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 1

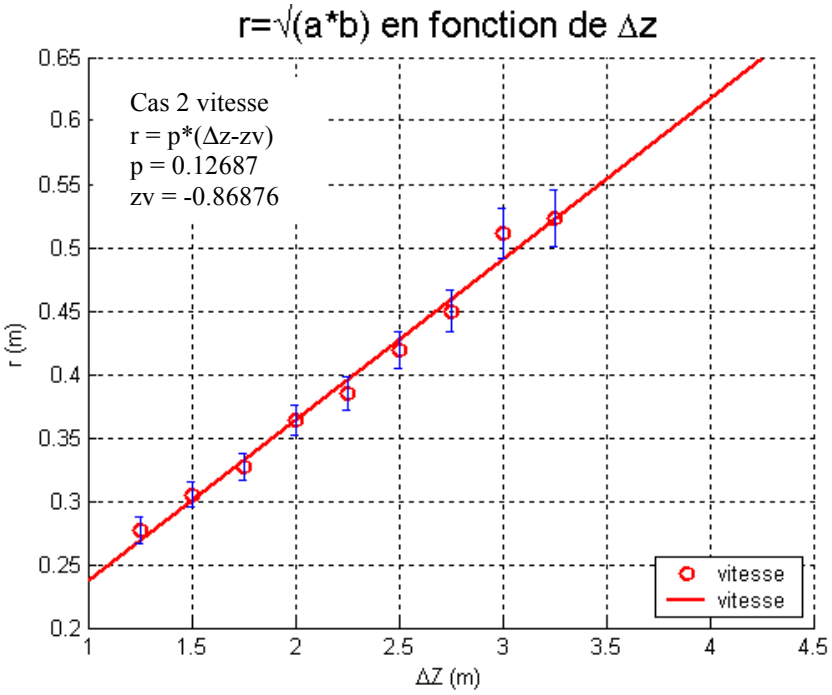


Figure 5.26 : Evolution des rayons dynamiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 2

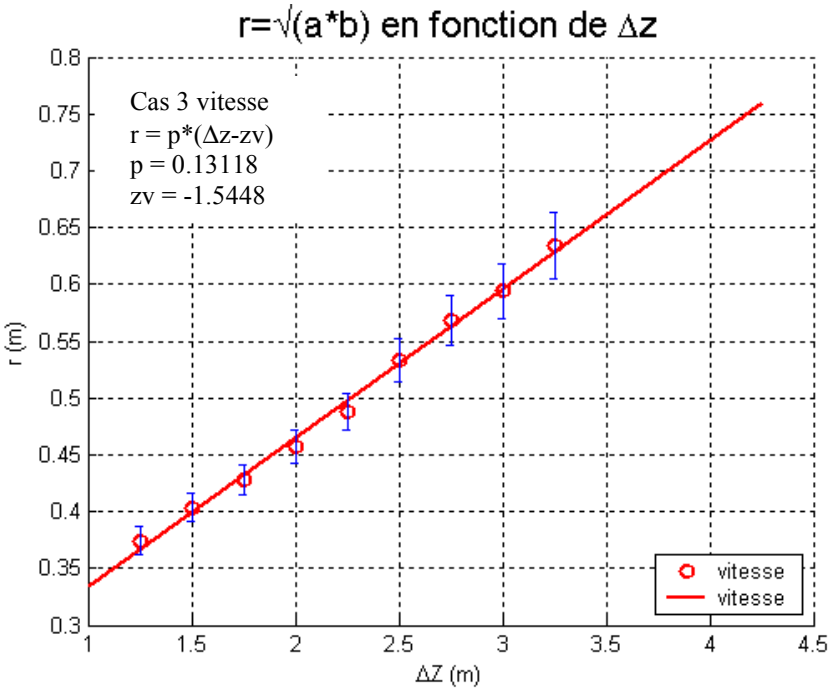


Figure 5.27 : Evolution des rayons dynamiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 3

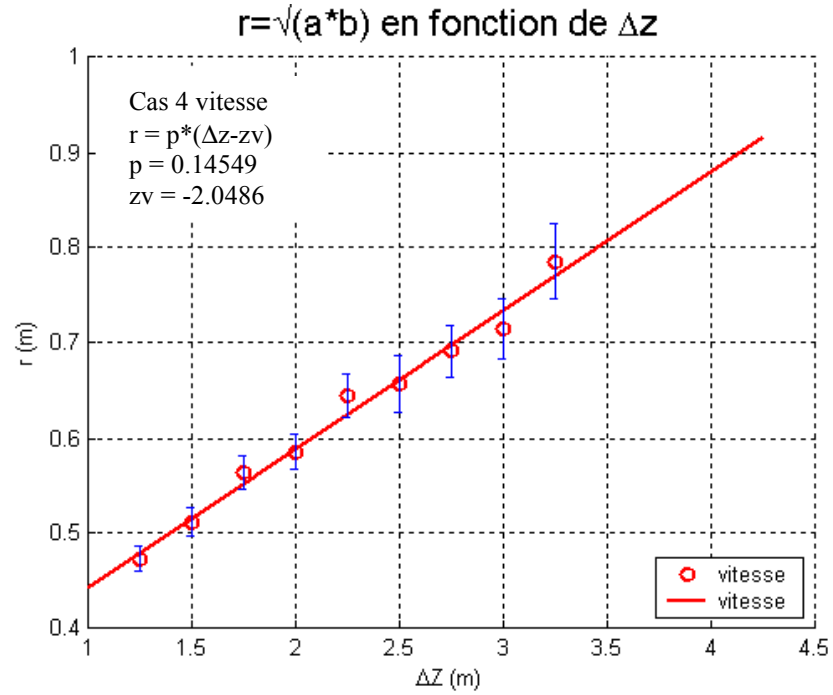


Figure 5.28 : Evolution des rayons dynamiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 4

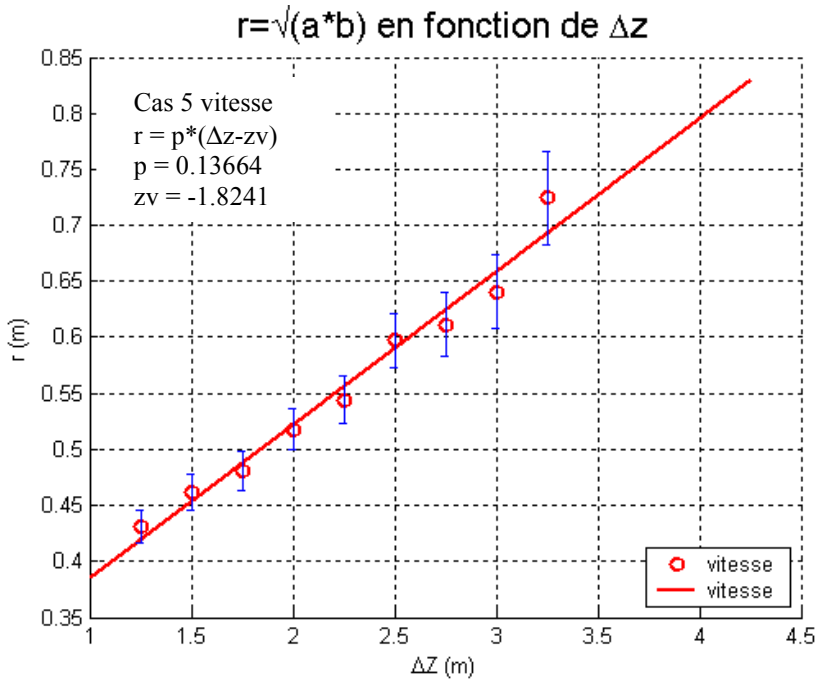


Figure 5.29 : Evolution des rayons dynamiques - Comparaison des origine virtuelles : cas 5

Les figures 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29 illustrent le rayon dynamique et son incertitude calculées à partir de la méthode analytique en fonction de z. De même que pour les champs de température, les barres d'erreurs indiquées sur les figures pour chaque hauteur z représente deux fois l'écart-type obtenu sur les rayons dynamiques a et b. On peut observer que ces barres d'erreur sont plus en plus grandes au fur et à mesure que z augmente. Ces barres d'erreurs sont comprises entre 2 cm et 10 cm.

➢ *Incertitude sur le débit*

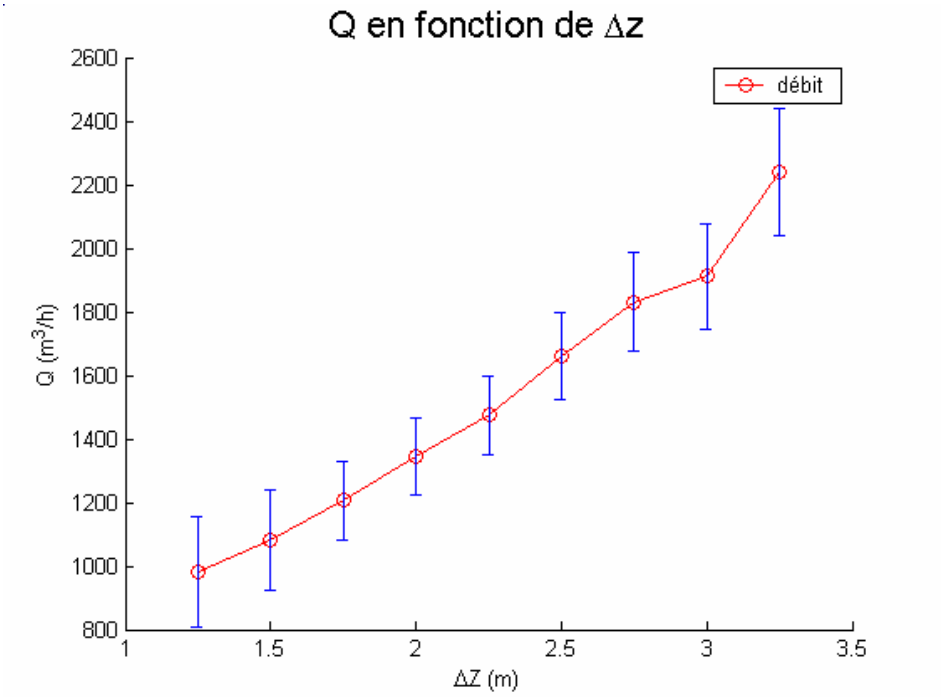


figure 5.30 : débit expérimental en fonction de Δz - incertitude pour le cas 1

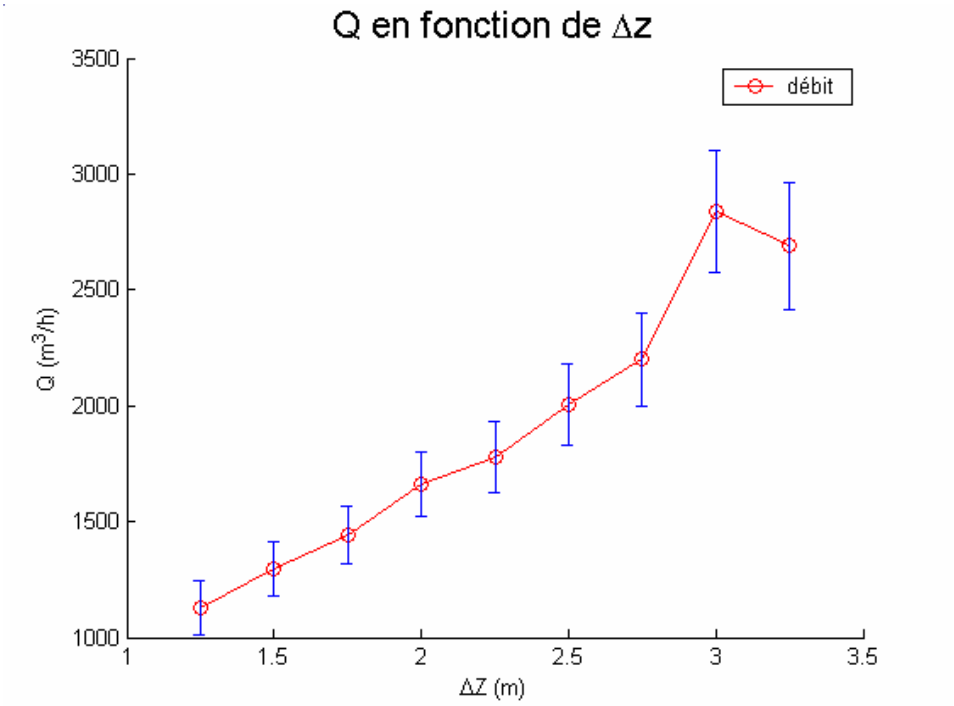


figure 5.31 : débit expérimental en fonction de Δz - incertitude pour le cas 2

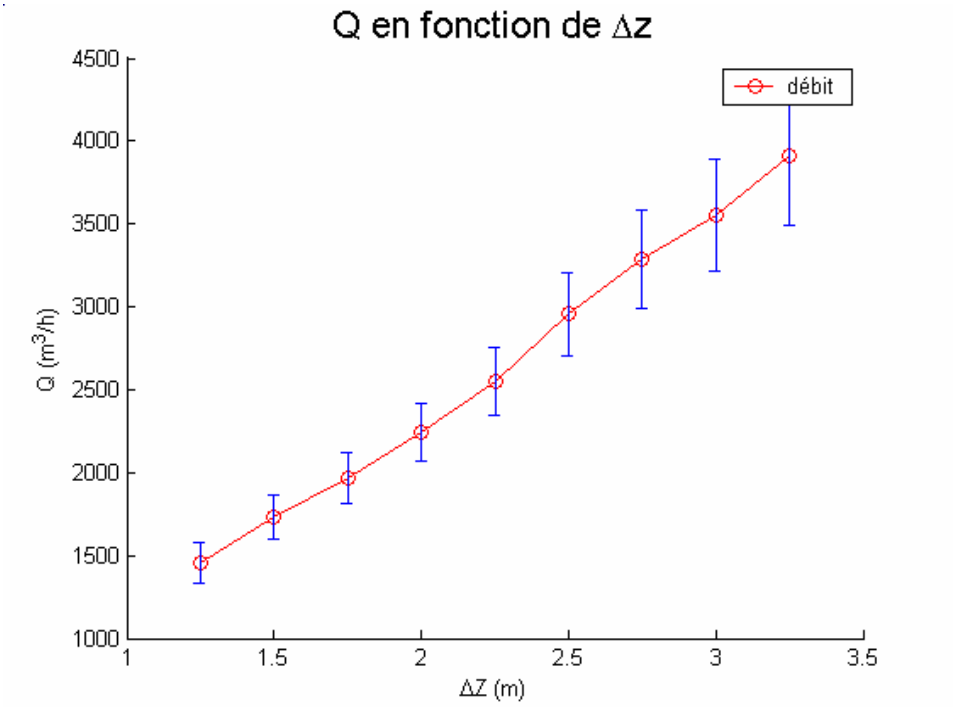


figure 5.32 : débit expérimental en fonction de Δz - incertitude pour le cas 3

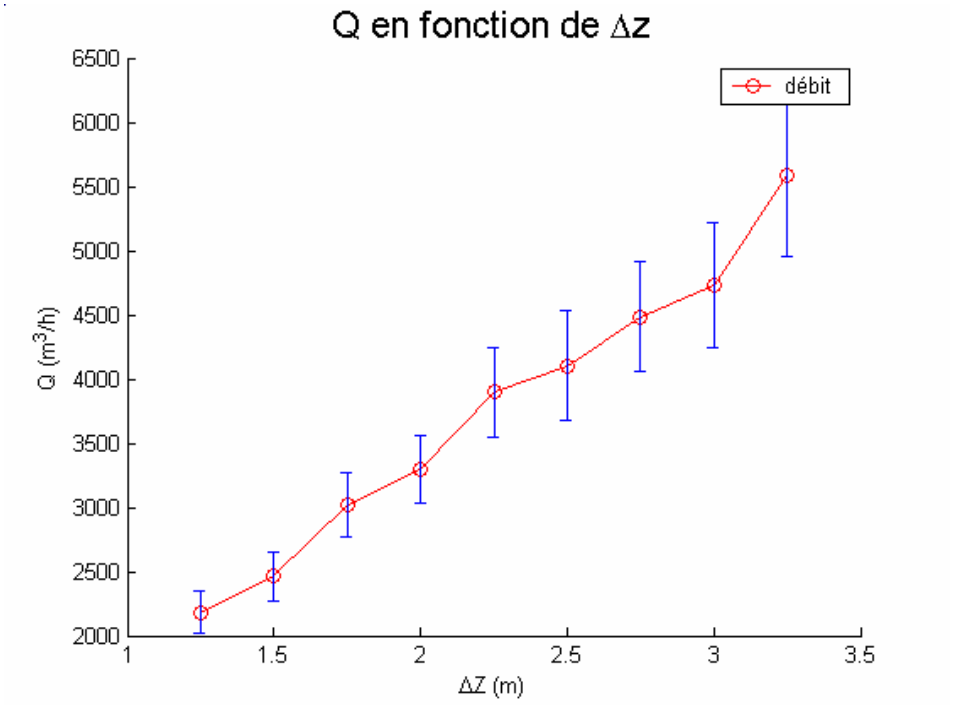


figure 5.33 : débit expérimental en fonction de Δz - incertitude pour le cas 4

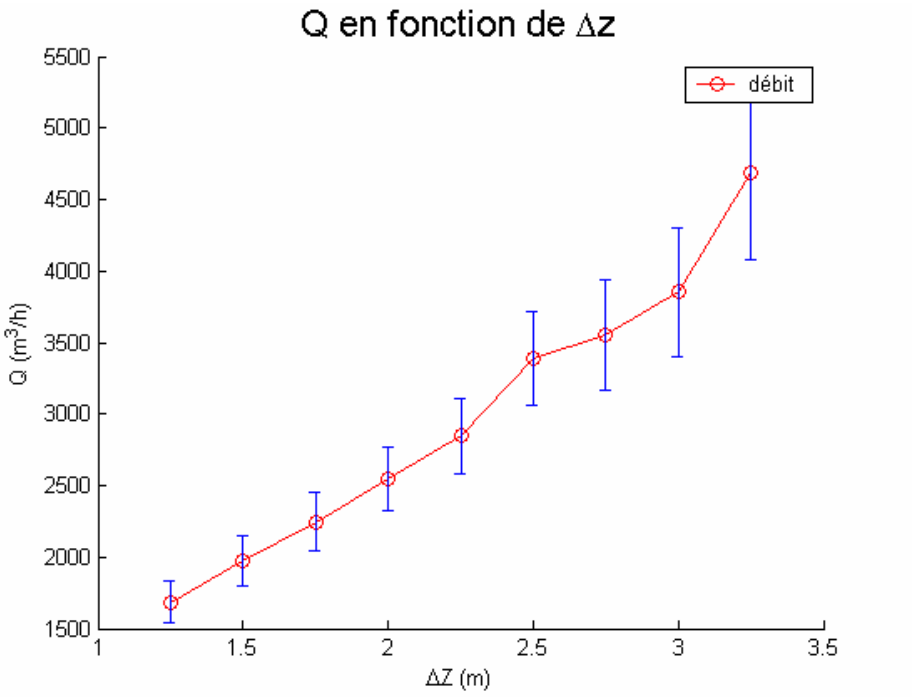


figure 5.34 : débit expérimental en fonction de Δz - incertitude pour le cas 5

Les figures 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34 illustrent le débit expérimental en fonction de Δz avec les barres d'incertitudes pour chaque plan de mesure et pour chaque configuration de source. D'après ces figures, on peut observer que les barres d'incertitudes croissent en fonction de Δz. L'incertitude relative sur les débits se situe environ entre 10% et 25% suivant la hauteur et la configuration de source.

- *Incertitude sur l'origine virtuelle*

Les origines virtuelles thermiques et dynamiques ont été calculées jusqu'à présent sans prendre en compte les erreurs de mesures de température et de vitesse. Ces erreurs de mesure ont une influence sur la valeur des rayons thermiques et dynamiques et donc sur l'origine virtuelle. L'objectif de cette partie est de prendre en compte les erreurs de mesures de température et de vitesse dans le calcul de la pente p, l'ordonnée à l'origine z_0, l'origine virtuelle et de connaître leurs incertitudes correspondantes.

Thermique :

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
p (m)	0,096	0,119	0,121	0,127	0,118
z_0 (m)	0,122	0,128	0,19	0,251	0,246
Δp (m)	0,0058	0,0065	0,0159	0,0152	0,0196
Δz_0 (m)	0,0106	0,0117	0,028	0,0263	0,033
z_v (m)	-1,26	-1,074	-1,57	-1,97	-2,09
$\Delta z_v/z_v$ (%)	14,8	14,7	28,1	22,4	30,1

Tableau 5.15 : tableau récapitulatif des résultats sur la pente p, l'ordonnée à l'origine z_0 et leurs incertitudes, l'origine virtuelle et son incertitude pour les cas 1, 2, 3, 4 et 5

D'après le tableau 5.15, on constate que les incertitudes sur l'origine virtuelle ont plutôt tendance à augmenter (excepté le cas 4) au fur et à mesure qu'on chauffe entièrement le cylindre. Dans le calcul d'incertitude de l'origine virtuelle, la part d'incertitude est plus grande pour l'ordonnée à l'origine que pour la pente pour chacune des configurations de sources. L'erreur faite sur l'origine virtuelle est plus importante pour les cas 3, 4 et 5 où le panache est elliptique et plus excentré que pour les cas 1 et 2, ceci implique également une erreur conséquente pour le débit. En effet, la formule pour le débit $Q(z) = K_Q P_c^{1/3} (z - z_v)^{5/3}$ est fonction de z_v à la puissance 5/3.

Dynamique :

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
p (m)	0,104	0,123	0,128	0,149	0,131
z_0 (m)	0,101	0,119	0,211	0,3	0,261
Δp (m)	0,0066	0,0075	0,0094	0,0117	0,00015
Δz_0 (m)	0,0143	0,015	0,019	0,0225	0,0242
z_v (m)	-0,97	-0,97	-1,65	-2,01	-1,99
Δz_v (%)	20,5	18,9	16,3	15,3	9,4

Tableau 5.16 : tableau récapitulatif des résultats sur la pente p, l'ordonnée à l'origine z_0 et leurs incertitudes, l'origine virtuelle et son incertitude pour les cas 1, 2, 3, 4 et 5

D'après le tableau 5.16, on constate que les incertitudes sur l'origine virtuelle pour les cas 3, 4 et 5 sont moins élevées que celles obtenues d'après les résultats thermiques.

5.1.11 Conclusion

Les différents résultats expérimentaux présentés dans les paragraphes précédents ont permis d'observer l'effet de la troisième dimension sur le développement du panache au dessus d'une source cylindrique.

Voici les principales observations :

- Le panache devient elliptique et excentré par rapport au centre de la source
- L'écart de température entre le centre du panache et l'extérieur ΔT_c diminue
- La vitesse au centre du panache w_c diminue
- w_c en fonction de z augmente, devient constant puis diminue
- Les rayons thermiques et dynamiques sont différents de quelques cm
- les origines virtuelles thermiques et dynamiques on tendance à diminuer au fur et à mesure qu'on chauffe entièrement le cylindre du haut vers le bas. En tenant compte des hypothèses décrites dans le paragraphe 5.1.4, l'équation suivante donne la position de l'origine virtuelle pour une source cylindrique en fonction de son diamètre et de sa hauteur de chauffe :

$$\boxed{\frac{z_v}{D} = -2\frac{h}{D} - 0{,}5}$$

- la troisième dimension ou la hauteur de chauffe d'une source thermique a des conséquences sur la position de l'origine virtuelle et sur l'évolution des paramètres débit, ΔT_c, w_c du panache.
- Le débit d'air emporté par le panache augmente
- L'effet de la troisième dimension sur le développement du panache au-dessus d'une source cylindrique ne contredit pas la théorie de l'origine virtuelle des panaches.
- L'effet de la troisième dimension de la source thermique cylindrique ne provoque pas d'instabilités sur le développement du panache

5.2 Source rectangulaire

5.2.1 Introduction

Cette partie présente une étude expérimentale basée sur des mesures de vitesse et de température d'un panache développé au-dessus d'une source rectangulaire modulable de dimensions finies. Plusieurs configurations de source rectangulaire ont été testées à partir de 4 modules rectangulaires de dimensions 0,25 x 1,5 m de base et 0,5 m de hauteur, seule la surface supérieure de la source a été chauffée.
Ainsi, l'objectif de cette étude est d'analyser l'influence de la géométrie de la source sur le développement du panache avec des rapports Longueur/largeur différents : 1,66, 2, 3 et 6. Nous avons donc réalisé des séries de mesure de température et de vitesse pour les cas étudiés. Ces mesures ont permis de déduire le rayon du panache ainsi que son débit à chaque hauteur au-dessus de la source.

5.2.2 Configuration expérimentale

La disposition des thermocouples et des sondes thermoanémométriques sur la matrice est présentée sur la figure suivante :

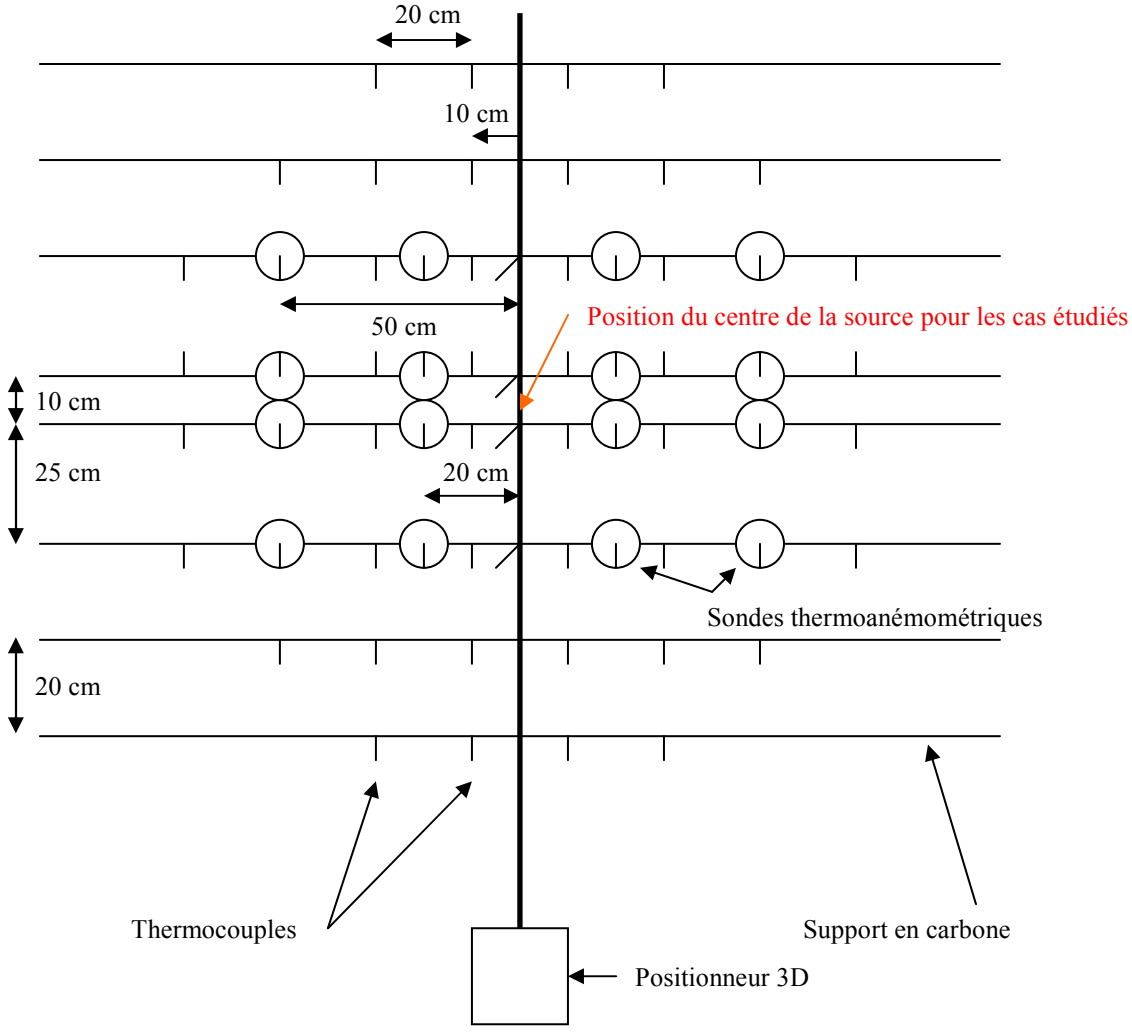


Figure 5.35 : Disposition des thermocouples et des sondes thermoanémométriques (vue de dessus) pour les cas étudiés

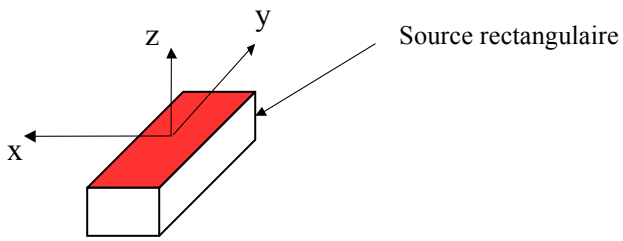
- Paramètres d'acquisition des mesures :

  - Durée d'acquisition : 10 min
  - Fréquence d'échantillonnage des mesures : 1 Hz

- Paramètres de la cellule :

  - Température de soufflage : 20°C
  - Débit de ventilation : 5000 m^3/h (panache en milieu infini : ventilation sans stratification)

- Repérage :



- Configuration de la source de chaleur :

- 1 source rectangulaire :

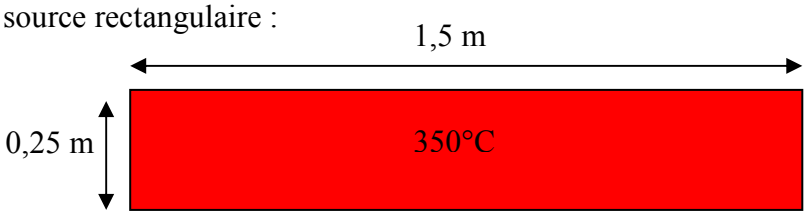


figure 5.36 : configuration d'une source rectangulaire (vue de dessus)

- 2 sources rectangulaires :

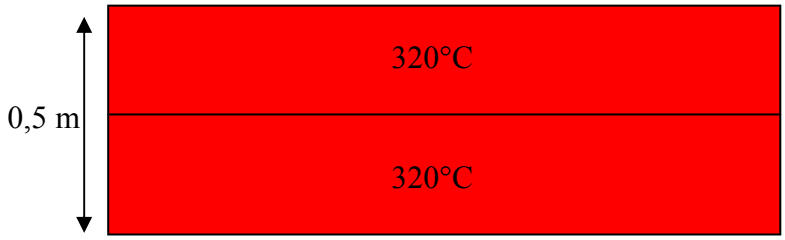


figure 5.37 : configuration des 2 sources rectangulaires (vue de dessus)

- 3 sources rectangulaires :

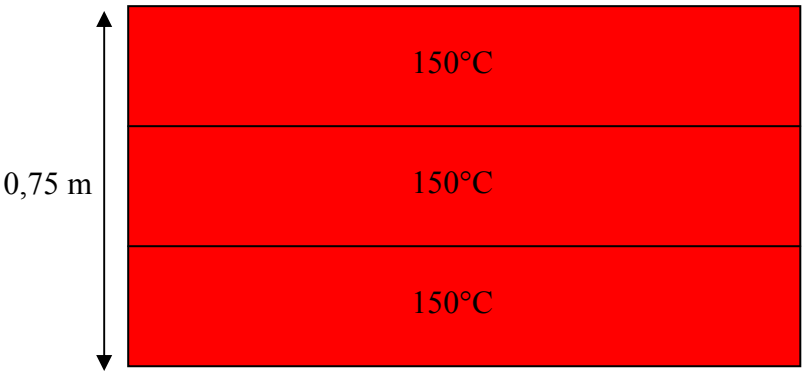


figure 5.38 : configuration des 3 sources rectangulaires (vue de dessus)

- 4 sources rectangulaires :

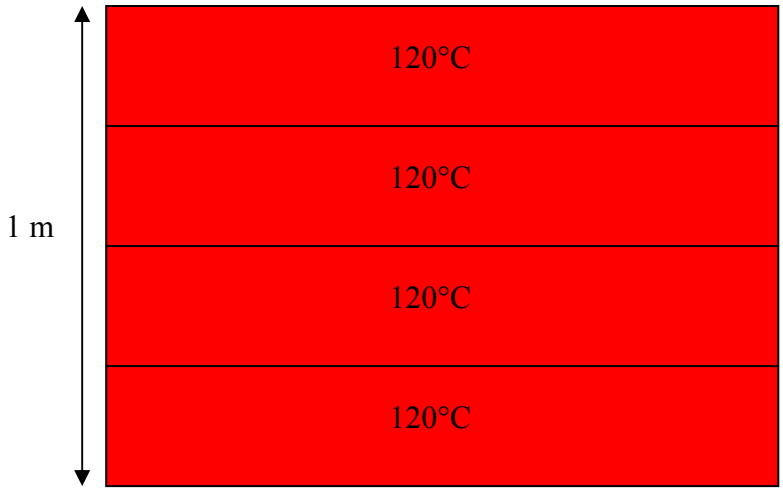


figure 5.39 : configuration des 4 sources rectangulaires (vue de dessus)

• Puissances :

	1 source rectangulaire	2 sources rectangulaires	3 sources rectangulaires	4 sources rectangulaires
Pt (W)	3800	5200	2700	2500
Pc + Pr (W)	4000	5360	2800	2800

Tableau 5.17 : bilan de puissances pour les 4 configurations

Les résultats du tableau 5.17 vérifient pour chacune des 4 configurations que la puissance électrique P_t fournie à la source est sensiblement égale à la somme des puissances convectée P_C et rayonnée P_R par la source.
Les températures de surface pour chacune des configurations de source ont été fixées de manière à ce qu'il n'y ait pas de stratification à l'intérieur de la cellule (voir paragraphe 3.2.1).

5.2.3 Comparaison des résultats expérimentaux obtenus à partir du modèle gaussien elliptique pour les 4 cas étudiés.

Dans cette partie, nous allons comparé les paramètres du modèle gaussien elliptique appliqué aux champs de température et de vitesse pour les quatre séries de mesures.

- *Température*

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,25	87,7	0,101	0,052	0,52	0,27	8,3
1,5	88,4	0,11	0,05	0,5	0,31	7,5
1,75	88,4	0,114	0,045	0,5	0,36	6,8
2	89	0,121	0,043	0,52	0,41	6,2
2,25	89,1	0,127	0,038	0,54	0,45	5,6
2,5	89,8	0,133	0,039	0,55	0,48	5,2
2,75	89,3	0,144	0,037	0,56	0,52	4,8
3	89,2	0,151	0,031	0,58	0,56	4,5
3,2	89	0,156	0,026	0,6	0,57	4,2
3,45	89,3	0,166	0,03	0,59	0,57	3,6
3,7	89,6	0,178	0,035	0,61	0,6	3,2

Tableau 5.18 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour 1 source rectangulaire

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,25	89,1	0,086	0,035	0,43	0,29	11,5
1,5	88,7	0,083	0,027	0,44	0,33	10
1,75	89,1	0,095	0,02	0,45	0,38	8,8
2	89,7	0,085	0,019	0,47	0,43	7,9
2,25	89,7	0,083	0,016	0,48	0,46	7,1
2,5	89,5	0,1	0,015	0,5	0,49	6,4
2,75	90,1	0,108	0,018	0,51	0,53	5,9
3	90,1	0,11	0,017	0,52	0,55	5,3
3,2	90,3	0,115	0,006	0,51	0,54	5,3
3,45	90,6	0,119	0,008	0,52	0,57	4,7
3,7	90,6	0,131	0,009	0,54	0,60	4,1

Tableau 5.19 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour 2 sources rectangulaires

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,7	89,1	0,055	0,022	0,36	0,3	7,1
1,95	89,6	0,062	0,014	0,38	0,34	6,2
2,2	89,1	0,076	0,014	0,4	0,38	5,5
2,45	89,4	0,082	0,004	0,43	0,42	4,9
2,7	89	0,093	0,093	0,46	0,46	4,5
2,95	88,2	0,103	-0,008	0,48	0,48	4,1
3,2	89,3	0,109	-0,027	0,52	0,53	3,7
3,45	89,2	0,112	-0,03	0,54	0,56	3,4
3,7	89,2	0,131	-0,031	0,57	0,59	3,2

Tableau 5.20 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour 3 sources rectangulaires

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,7	90,1	0,07	0,014	0,35	0,3	6,8
1,95	89,5	0,081	0,013	0,36	0,33	6,1
2,2	90,3	0,077	0,009	0,37	0,34	5,6
2,45	89,4	0,093	0,008	0,4	0,38	5
2,7	90,9	0,086	0,004	0,42	0,39	4,6
2,95	90	0,107	0,002	0,45	0,43	4,3
3,2	91	0,099	0	0,48	0,46	3,8
3,45	90,6	0,111	-0,008	0,51	0,49	3,5
3,7	90,6	0,123	-0,005	0,53	0,52	3,3

Tableau 5.21 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour 4 sources rectangulaires

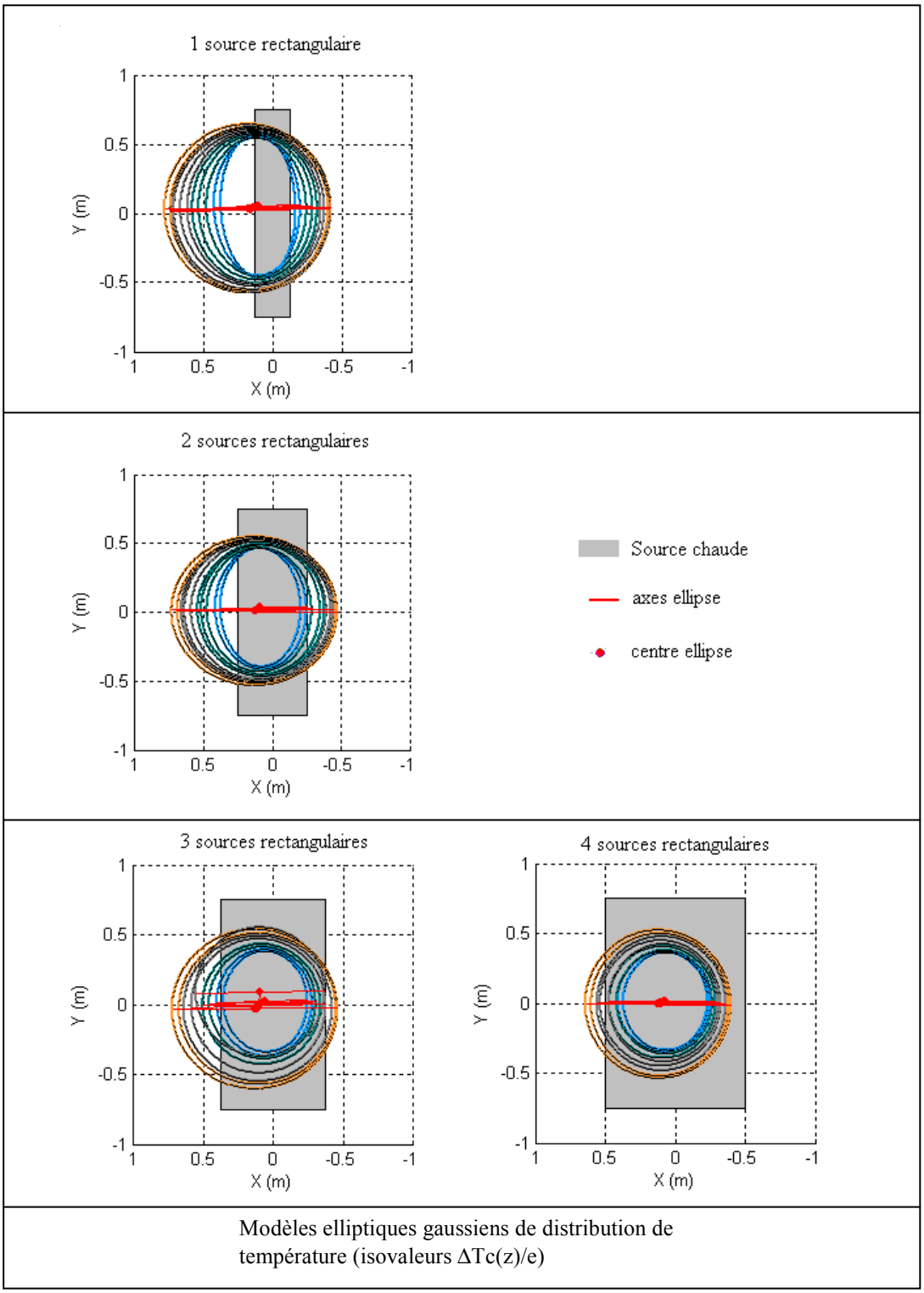


Figure 5.40 : modèles elliptiques (isothermes $\Delta T_c(z)/e$) obtenus pour 1, 2, 3 et 4 sources rectangulaires

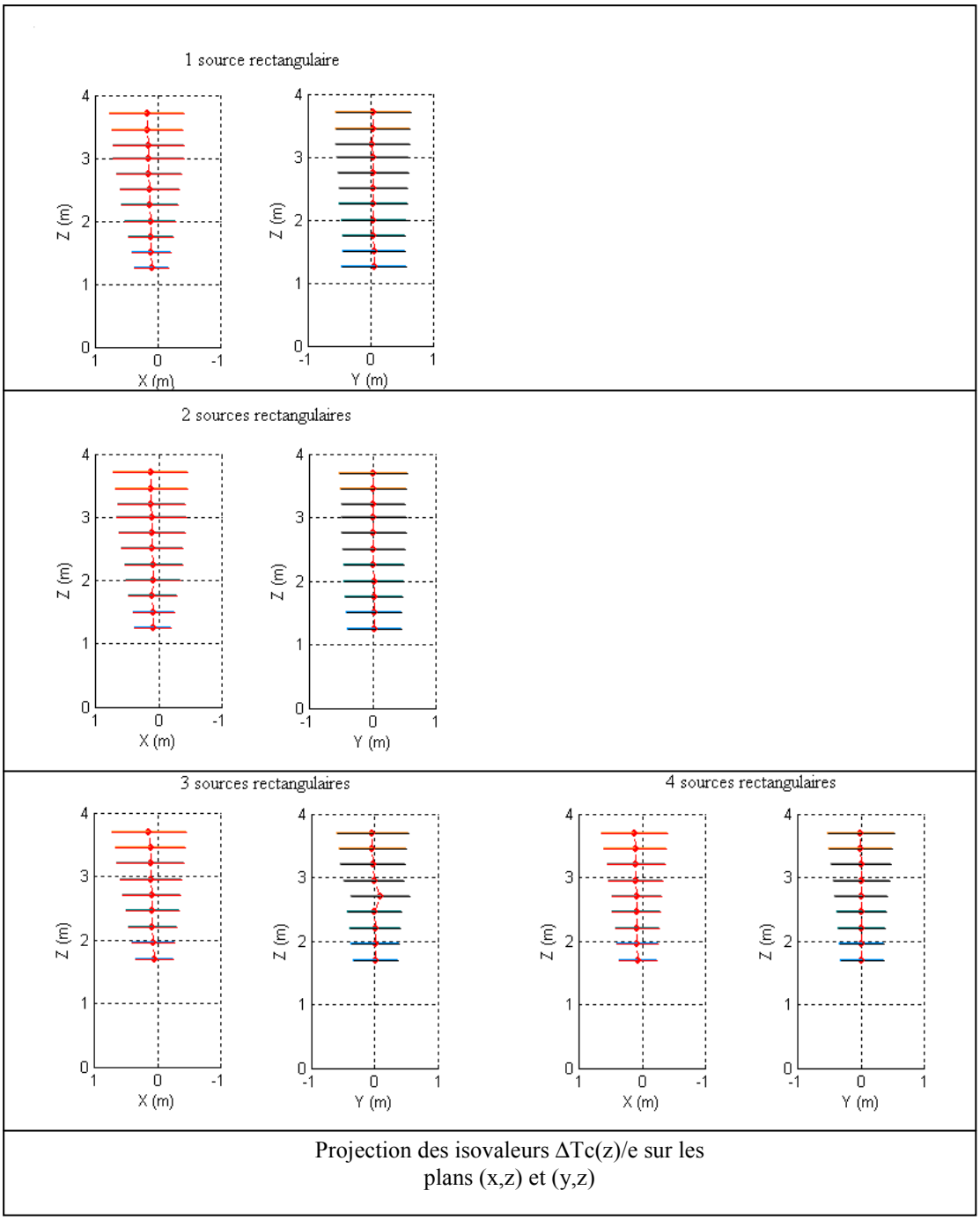


Figure 5.41 : projection des isothermes $\Delta T_c(z)/e$ sur les plans (x, z) et (y, z) obtenus pour 1, 2, 3 et 4 sources rectangulaires

D'après les tableaux 5.18 à 5.21 et les figure 5.40 et 5.41, on peut tout d'abord constater que les panaches obtenus sont stables d'un point de vue spatial. Ensuite, on peut observer que la forme du panache obtenu est elliptique en zone proche puis devient axisymétrique pour les 4 configurations à partir d'une certaine hauteur z. Plus la géométrie de la source tend vers le carré, plus le panache est axisymétrique.
En ce qui concerne l'orientation des isothermes, elle est la même que celle de la source thermique.
D'après la figure 5.40, on peut observer que les coordonnée x et y du centre du panache sont quasiment constantes quelque soit la géométrie de la source. Dans le cas 1 source, la position

du centre du panache est très excentrée par rapport à celle de la source puis devient de plus en plus centrée lorsqu'on augmente le nombre de sources.
Enfin, on peut remarquer également que le rayon thermique a évolue peu par rapport au rayon thermique b pour 1 et 2 sources rectangulaires. Contrairement aux configurations 3 et 4 sources où les rayons a et b évoluent en fonction de z en thermique et en dynamique.

- *Vitesse*

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m³/h]
1,25	87,8	0,087	-0,009	0,68	0,32	0,71	1747
1,5	88,1	0,1	-0,008	0,63	0,34	0,77	1865
1,75	87,9	0,106	-0,006	0,61	0,36	0,8	1987
2	87,5	0,105	-0,003	0,61	0,39	0,81	2179
2,25	87,5	0,107	-0,006	0,61	0,43	0,81	2403
2,5	88	0,106	-0,006	0,62	0,46	0,81	2613
2,75	87,4	0,114	-0,008	0,62	0,5	0,81	2840
3	87,4	0,117	-0,01	0,63	0,53	0,8	3021
3,2	87,8	0,112	-0,024	0,65	0,55	0,8	3235
3,45	88,2	0,097	-0,028	0,68	0,56	0,79	3402
3,7	87,9	0,1	-0,033	0,7	0,59	0,77	3597

Tableau 5.22 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour 1 source rectangulaire

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m³/h]
1,25	86,6	0,073	-0,043	0,67	0,31	0,86	2020
1,5	86,1	0,072	-0,039	0,65	0,34	0,89	2224
1,75	85,6	0,075	-0,031	0,62	0,37	0,92	2387
2	85,6	0,062	-0,03	0,62	0,42	0,92	2709
2,25	85,5	0,054	-0,032	0,64	0,45	0,91	2964
2,5	85,7	0,061	-0,03	0,64	0,48	0,92	3196
2,75	86,1	0,069	-0,03	0,64	0,53	0,92	3529
3	86,7	0,067	-0,029	0,64	0,56	0,92	3729
3,2	87,3	0,059	-0,033	0,62	0,55	0,97	3741
3,45	88,2	0,055	-0,034	0,63	0,59	0,95	3994
3,7	88,1	0,053	-0,039	0,65	0,63	0,92	4261

Tableau 5.23 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour 2 sources rectangulaires

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m³/h]
1,7	88	0,057	0,003	0,43	0,33	0,85	1364
1,95	88	0,052	-0,011	0,46	0,37	0,83	1598
2,2	88,2	0,059	-0,017	0,48	0,41	0,82	1825
2,45	87,7	0,047	-0,034	0,53	0,43	0,79	2036
2,7	87,3	0,051	-0,039	0,55	0,46	0,79	2260
2,95	86,2	0,051	-0,04	0,56	0,48	0,79	2402
3,2	86,6	0,049	-0,064	0,6	0,52	0,77	2717
3,45	86,3	0,039	-0,074	0,62	0,54	0,77	2916
3,7	86	0,054	-0,076	0,64	0,58	0,76	3191

Tableau 5.24 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour 3 sources rectangulaires

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,7	90,3	0,063	-0,011	0,46	0,36	0,76	1423
1,95	89,4	0,074	-0,008	0,47	0,39	0,77	1596
2,2	89,8	0,062	-0,02	0,48	0,4	0,78	1694
2,45	89,6	0,071	-0,017	0,5	0,43	0,78	1897
2,7	89,9	0,051	-0,027	0,52	0,44	0,79	2044
2,95	90,1	0,065	-0,028	0,54	0,46	0,78	2191
3,2	90	0,041	-0,036	0,57	0,48	0,78	2414
3,45	90,1	0,049	-0,046	0,6	0,51	0,77	2665
3,7	89,6	0,047	-0,045	0,62	0,52	0,77	2808

Tableau 5.25 : Paramètres du modèle gaussien elliptique pour 4 sources rectangulaires

D'après les tableaux 5.22 à 5.25 et les figure 5.42 et 5.43, on peut constater que l'évolution des paramètres du modèle gaussien elliptique appliqué au champ de vitesse est similaire à celle appliqué au champ de température. Ainsi, on observe de la même manière que pour les champs de température les remarques suivantes :

- L'excentricité du panache
- Le panache qui est elliptique en zone proche devient axisymétrique lorsque z augmente
- Le rayon dynamique b suivant la largeur de la source évolue et celui suivant la longueur de la source reste quasiment constant pour 1 et 2 sources
- La stabilité spatiale du panache

Toutefois, d'après les figures 5.42 et 5.43, on peut remarquer que les champs thermiques et dynamiques ne se superposent pas pour une même hauteur. En effet, les rayons dynamiques sont un peu supérieurs aux rayons thermiques. De plus, la forme elliptique du panache est plus marquée pour les champs de vitesse. Enfin, la vitesse au centre croit légèrement puis devient constante sauf dans le cas 3 sources rectangulaires.

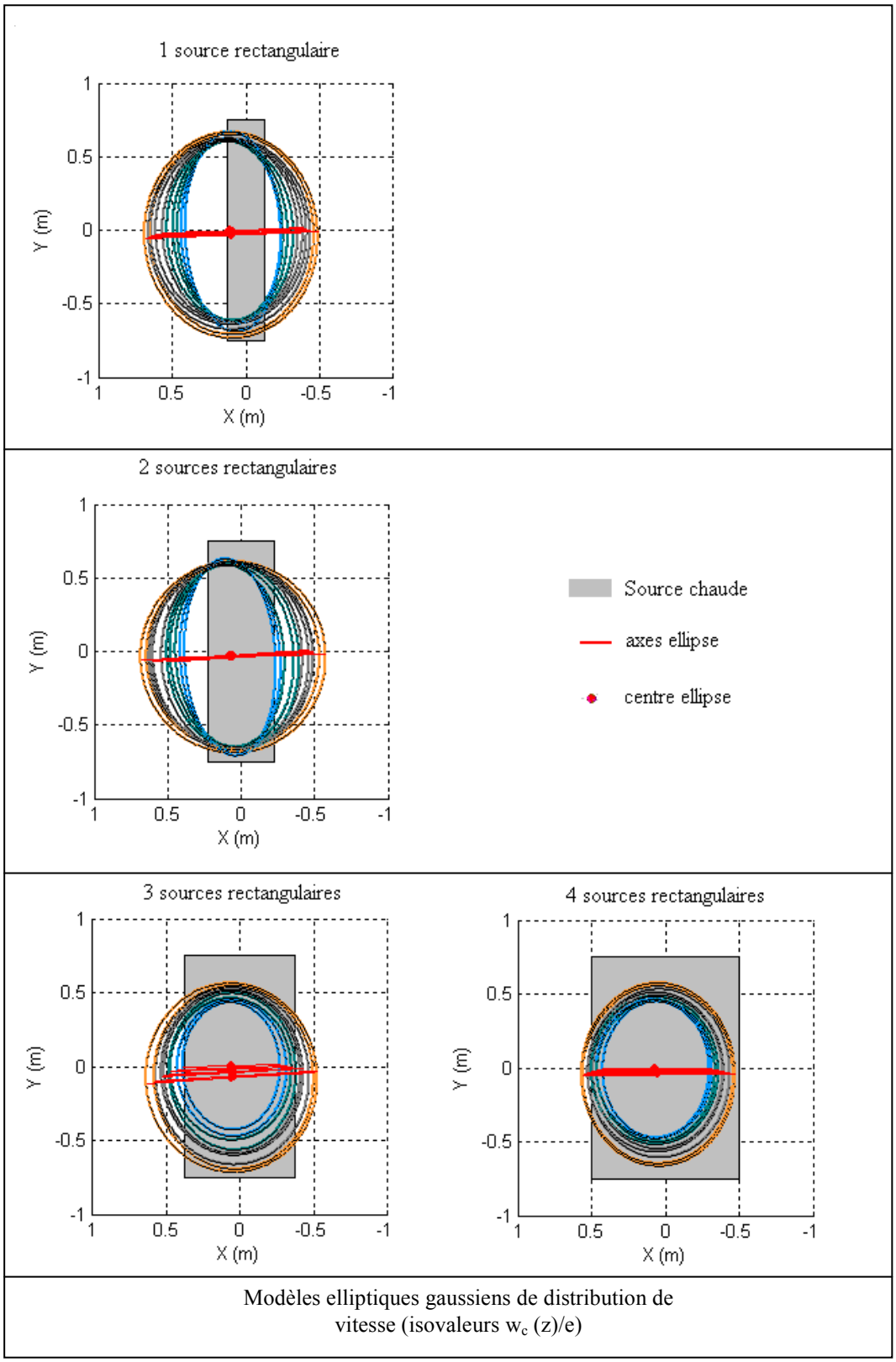


Figure 5.42 : modèles elliptiques (isovitesses $w_c(z)/e$) obtenus pour 1, 2, 3 et 4 sources rectangulaires

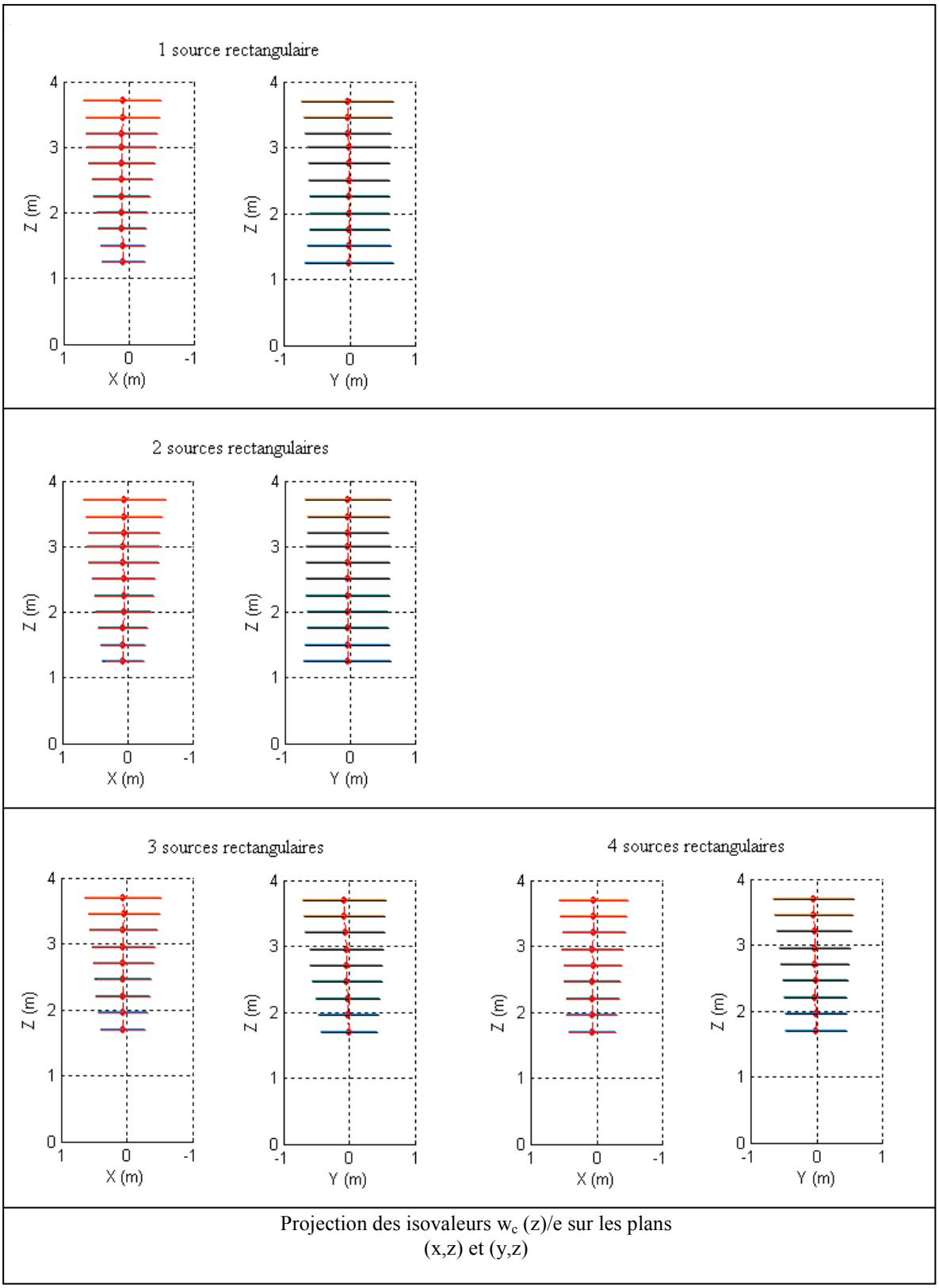


Figure 5.43 : projection des isovitesses $w_c(z)/e$ sur les plans (x, z) et (y, z) obtenus pour 1, 2, 3 et 4 sources rectangulaires

5.2.4 Estimation de l'origine virtuelle

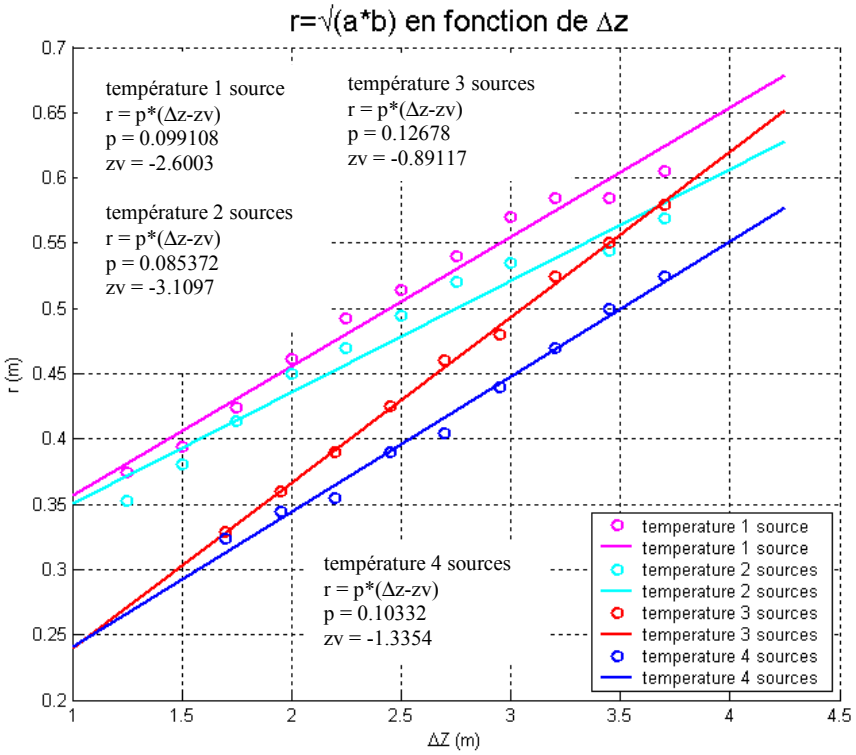


Figure 5.44 : Evolution des rayons thermiques en fonction de z - Comparaison des origine virtuelles

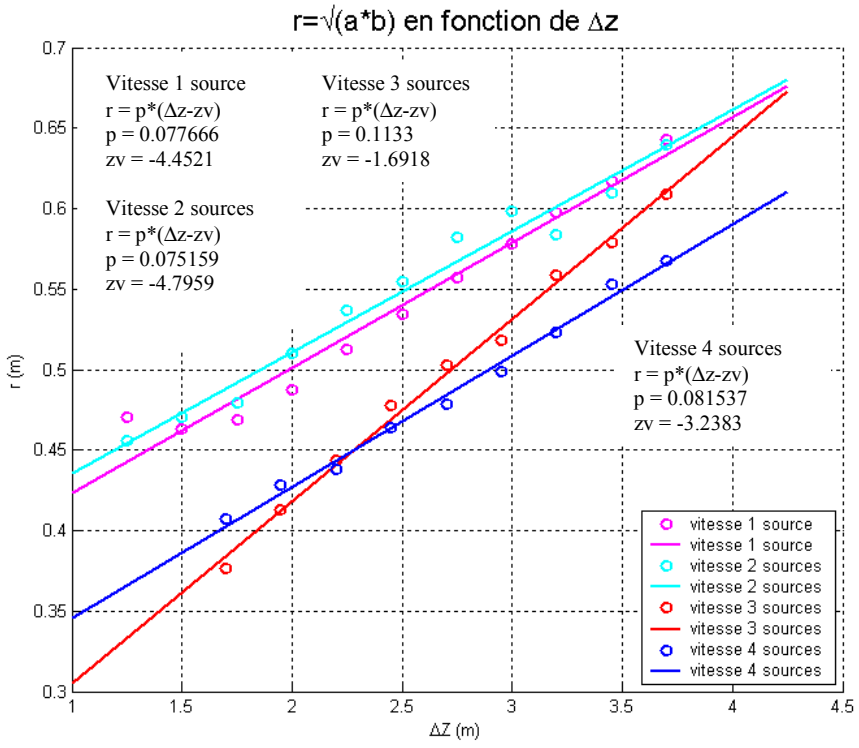


Figure 5.45 : Evolution des rayons dynamiques en fonction de z - Comparaison des origine virtuelles

Les figures 5.44 et 5.45 illustrent respectivement l'évolution des rayons thermiques et dynamiques en fonction de Δz (hauteur entre les points de mesure et la surface chauffante de la source) pour 1, 2, 3 et 4 sources. D'après ces résultats, on peut remarquer que les cotes des origines virtuelles thermiques et dynamiques obtenues pour une et deux sources rectangulaires sont très éloignées de la surface chauffante. D'après la théorie, la cote de l'origine virtuelle d'un panache développé au-dessus d'une source est de l'ordre des dimensions de la source. On peut donc émettre une réserve sur les résultats obtenus pour 1 et 2 sources. En effet, on a z_v thermique qui est égal à -2,6 et -3,1 respectivement pour 1 et 2 sources tandis que les dimensions de la source sont respectivement 0,25 x 1,5 et 0,5 x 1,5 m. De plus, les coefficients directeurs obtenus à partir des rayons dynamiques pour 1 et 2 sources sont aussi très éloignés de la théorie (p = 0,11).
Les origines virtuelles thermiques et dynamiques ainsi que les coefficients directeurs obtenus pour 3 et 4 sources sont corrects et assez cohérents avec la théorie. En effet, pour une même puissance convectée, les cotes des origines virtuelles obtenues pour 4 sources sont plus basses que pour 3 sources. Ce résultat était attendu : les dimensions de la source sont plus grandes pour 4 sources, les rayons thermiques et dynamiques du panache ainsi développé sont supérieurs à ceux obtenus pour 3 sources ce qui entraîne une cote de l'origine virtuelle plus basse.
L'évolution des rayons thermiques et dynamiques a et b pour 1 et 2 sources peuvent expliquer les cotes des origines virtuelles. En effet, si on observe les figures 5.38 et 5.40, on peut remarquer que les rayons thermiques et dynamiques a sont quasiment constant en fonction de z, ce qui entraîne une cote de l'origine virtuelle basse pour 1 et 2 sources. Ainsi, nous avons décidé de prendre en compte que les rayons thermiques et dynamiques b qui évoluent en fonction de z pour calculer de nouvelles origines virtuelles pour 1 et 2 sources. Les résultats sont présentés sur les figures 5.46 et 5.47.

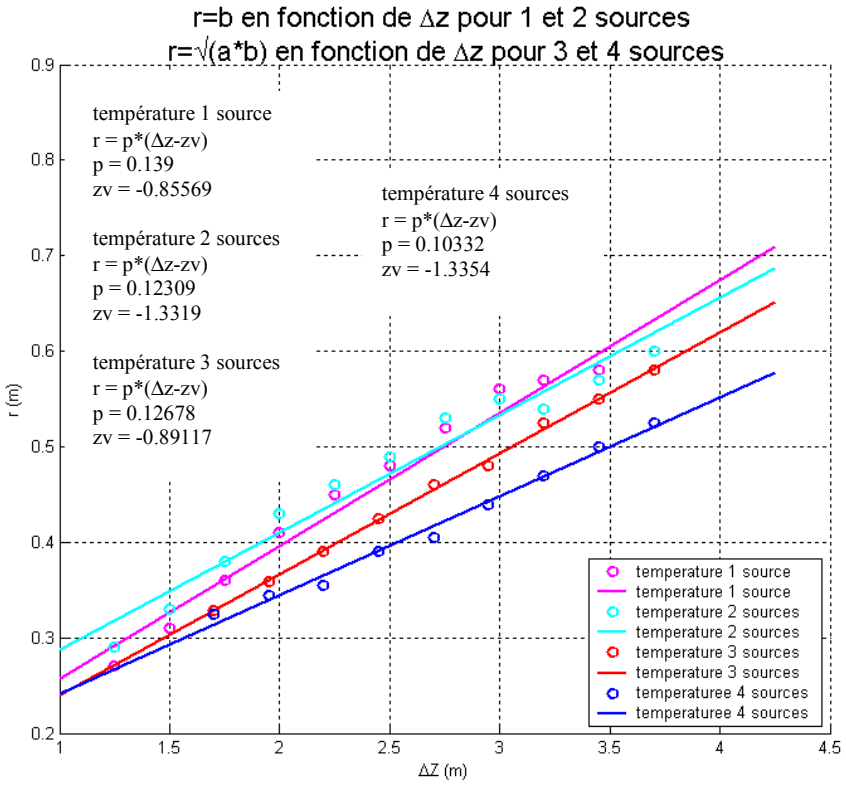


Figure 5.46 : Evolution des rayons thermiques en fonction de z (r = b pour 1 et 2 sources et r = √ab pour 3 et 4 sources) - Comparaison des origine virtuelles

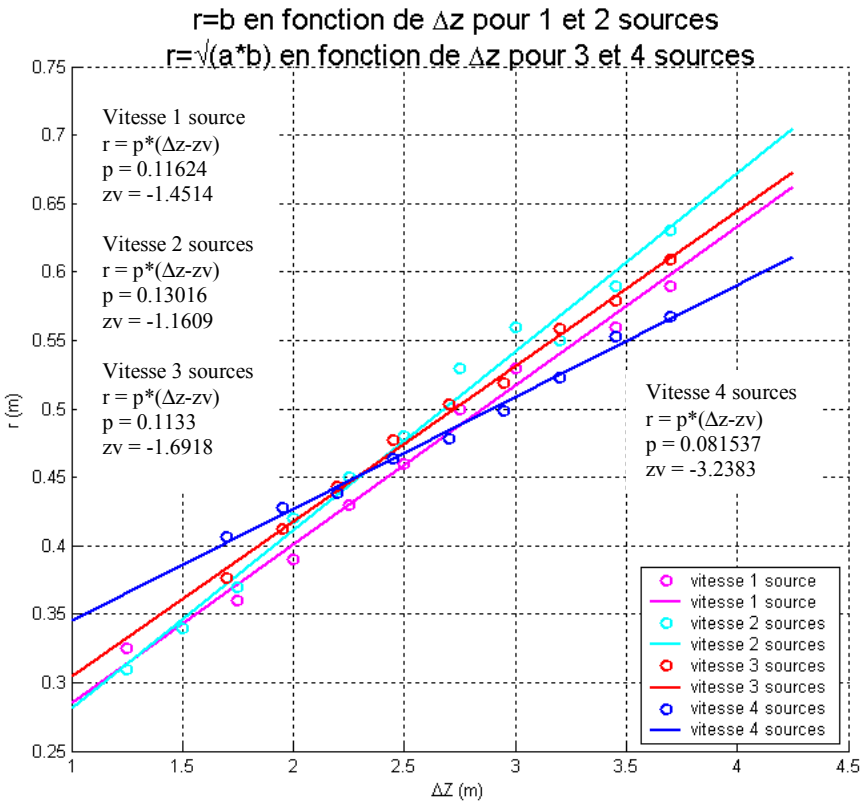


Figure 5.47 : Evolution des rayons dynamiques en fonction de z (r = b pour 1 et 2 sources et r = √ab pour 3 et 4 sources) - Comparaison des origine virtuelles

Température					
		1 source rectangulaire	2 sources rectangulaires	3 sources rectangulaires	4 sources rectangulaires
$r(z) = p(z - z_v)$	p	0,139	0,123	0,13	0,10
	$z_v(m)$	-0,86	-1,33	-0,89	-1,33
Vitesse					
$r(z) = p(z - z_v)$	p	0,116	0,13	0,11	0,082
	$z_v(m)$	-1,45	-1,16	-1,69	-3,24

Tableau 5.26 : tableau récapitulatif des paramètres obtenus par les modèles $r(z) = p(z - z_v)$ pour les champs de température et de vitesse avec (r = b pour 1 et 2 sources et r = √ab pour 3 et 4 sources)

D'après les figures 5.46 et 5.47 et le tableau 5.26, on peut constater que le fait de prendre en compte uniquement le paramètre b pour calculer les origines virtuelles thermiques et dynamiques pour 1 et 2 sources donne des résultats plus cohérents que ceux obtenus précédemment. En effet, les nouvelles origines virtuelles thermiques et dynamiques sont cette fois-ci de l'ordre des dimensions de la source.
Si on compare les origines virtuelles thermiques et dynamiques, les résultats sont différents en raison de la différence observée entre les rayons thermiques et dynamiques.
Les coefficients directeurs obtenus pour 1 et 2 sources sont un peu élevés par rapport à la théorie (p = 0,11). Les points de mesure les plus proches de la source sont peut être situés en zone proche où la théorie des panaches ne s'applique pas, ceci peut expliquer ces résultats. C'est pourquoi nous avons calculé de nouvelles origines virtuelles à partir de points de

mesure situés à z = 2m pour 1 et 2 sources, ces résultats sont présentés sur les figures 5.48 et 5.49.

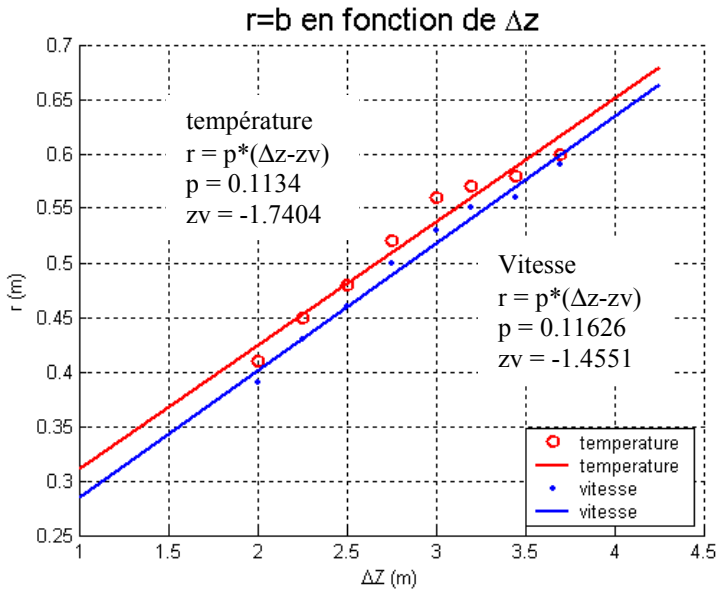


Figure 5.48 : Evolution des rayons thermiques et dynamiques en fonction de z > 2m - Comparaison des origine virtuelles : 1 source

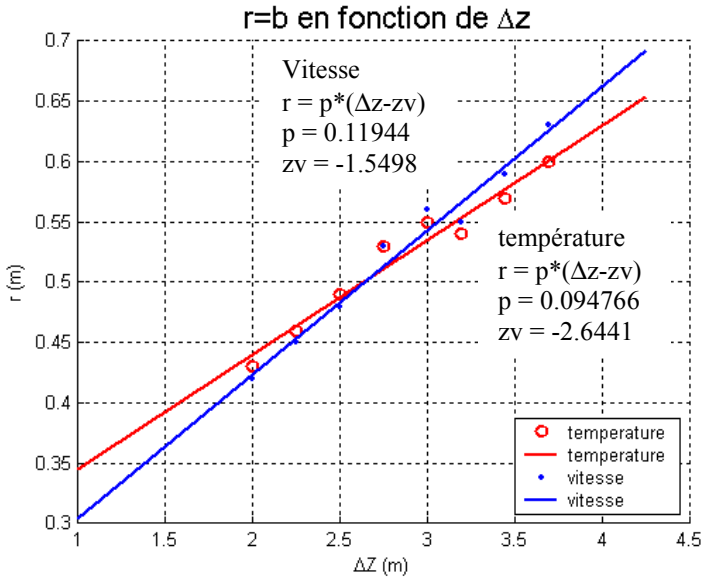


Figure 5.49 : Evolution des rayons thermiques et dynamiques en fonction de z > 2m - Comparaison des origine virtuelles : 2 sources

Température					
		1 source	2 sources	1 source > 2m	2 sources > 2m
$r(z) = p(z - z_v)$	p	0,139	0,123	0,113	0,095
	$z_v(m)$	-0,86	-1,33	-1,74	-2,65
Vitesse					
$r(z) = p(z - z_v)$	p	0,116	0,129	0,116	0,12
	$z_v(m)$	-1,45	-1,19	-1,45	-1,55

Tableau 5.27 : tableau récapitulatif des paramètres obtenus par les modèles $r(z) = p(z - z_v)$ pour les champs de température et de vitesse pour 1 et 2 sources et 1 et 2 sources (z > 2m)

D'après les figures 5.48 et 5.49 et le tableau 5.27, les nouveaux résultats confirment l'hypothèse émise précédemment. En effet, en ne prenant en compte que les points de mesure situés au-dessus de z = 2m, on peut constater que les coefficients directeurs obtenus en thermique et en dynamique sont plus en accord avec la théorie.

D'après les résultats des tableaux 5.26 et 5.27, les origines virtuelles thermiques et dynamiques obtenues à partir de l'évolution des rayons des ellipses en fonction de z pour les 4 configurations de source ne permettent pas d'établir des relations entre la géométrie de la source et la position de l'origine virtuelle.

5.2.5 Evaluation de l'excès d'enthalpie du panache

En utilisant les valeurs de λ_a, λ_b, r, w_c et ΔT_c trouvées expérimentalement, nous avons calculé à chaque hauteur z l'excès d'enthalpie Φ_z pour le panache de chaque configuration de source rectangulaire à partir de la relation théorique suivante :

$$\Phi_z = \rho_\infty C_p \sqrt{\frac{\lambda_a^2}{\lambda_a^2 + 1}} \sqrt{\frac{\lambda_b^2}{\lambda_b^2 + 1}} \Delta T_c w_c \pi r^2$$

	1 source	2 sources	3 sources	4 sources
z	Enthalpie (W)			
1,7			1450	1450
1,95	2150	3180	1480	1460
2,2	2140	3130	1500	1420
2,45	2160	3040	1495	1420
2,7	2170	3100	1520	1410
2,95	2165	2940	1475	1410
3,2	2160	2950	1510	1370
3,45	1950	2790	1485	1400
3,7	1830	2600	1530	1390
Enthalpie moyenne	2090	2970	1495	1410
λ_a	0,9	0,8	0,8	0,8
λ_b	1	1	1	1

Tableau 5.28 : Excès d'enthalpie du panache calculé à chaque hauteur

D'après le tableau 5.28, les enthalpies calculées pour la source rectangulaire sont en bon accord avec les puissances convectées déterminées par le bilan énergétique : P_c = 2000W (1 source), P_c = 3000W (2 sources), P_c = 1000W (3 sources), P_c = 1000W (4 sources).

5.2.6 Vérification du modèle théorique

Dans cette partie, nous vérifions le modèle linéaire pour les 4 configurations de source rectangulaire à partir de la formule du débit.

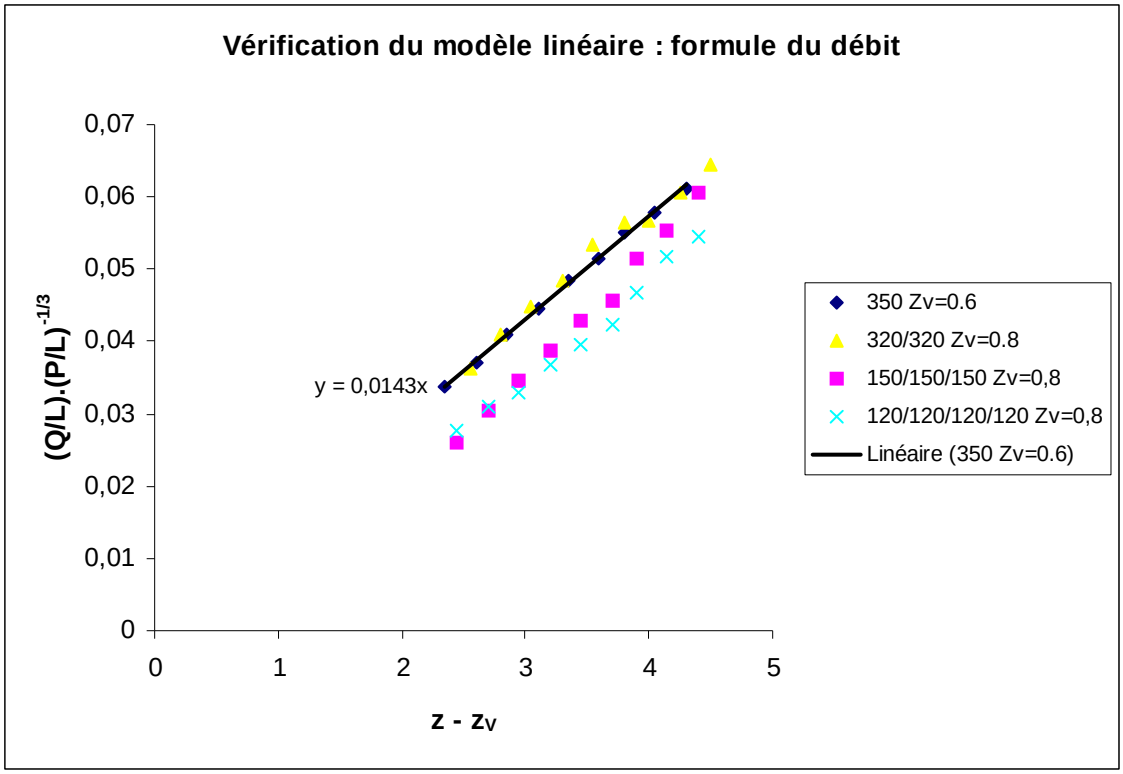


figure 5.50 : vérification du modèle linéaire à partir de la formule du débit

$$Q = 14.10^{-3}.\left(\frac{P_{cv}}{L}\right)^{1/3}.(z - z_v).L$$

Les résultats de la figure 5.50 permettent de vérifier le coefficient théorique $K_Q = 14.10^{-3}$ de la formule du débit pour les 4 configurations. Les origines virtuelles obtenues à partir des rayons thermiques et dynamiques ne donnent pas des résultats satisfaisants sur la vérification du modèle théorique. Par conséquent, les origines virtuelles de chaque configuration ont été volontairement fixées de manière à ce que les courbes coïncident. Les nouvelles origines virtuelles ainsi obtenues sont cohérentes et sont de l'ordre des dimensions de la source. Le coefficient théorique K_Q du cas 1 source est égal à $14{,}3.10^{-3}$, cette valeur est proche de la valeur théorique. D'après la figure, on constate que les cas 1 et 2 sources vérifient le modèle linéaire tandis que les résultats des cas 3 et 4 sources sont éloignés du modèle théorique. On peut supposer que les cas 3 et 4 sources sont proches du modèle ponctuel. Les résultats de la figure suivante permettent de vérifier si ces cas vérifient le modèle ponctuel.

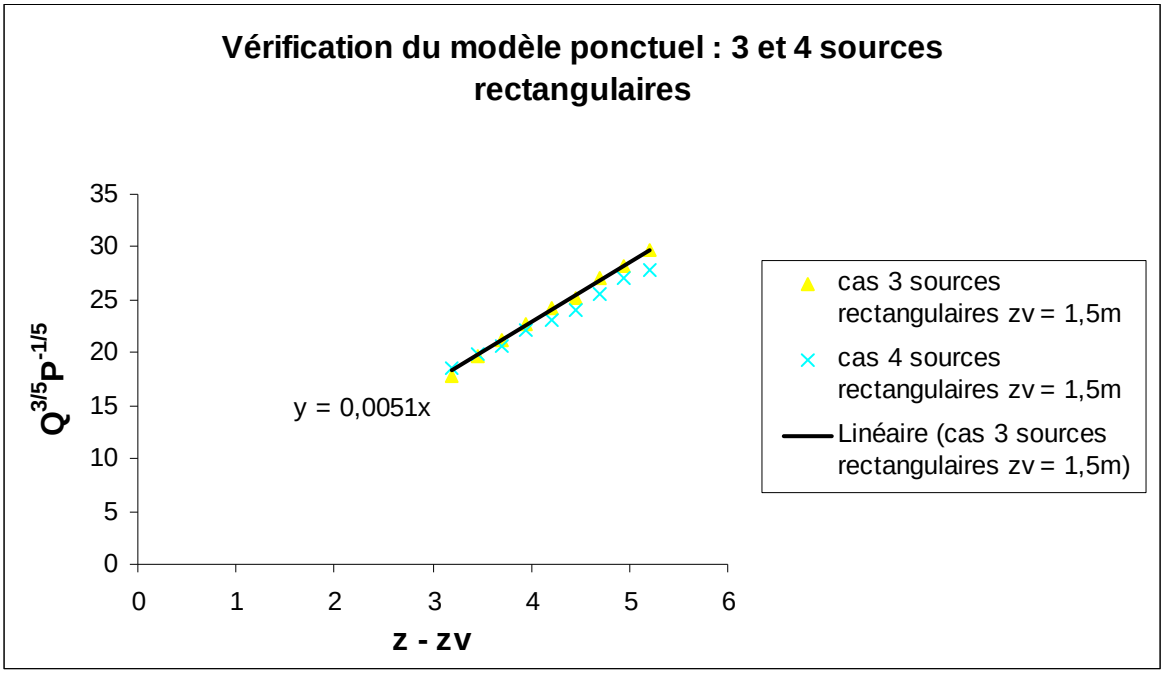


figure 5.51 : vérification du modèle ponctuel à partir de la formule du débit $Q(z) = 0{,}005.P_c^{1/3}(z - z_v)^{5/3}$ *: 3 et 4 sources rectangulaires*

De même que précédemment, les origines virtuelles des cas 3 et 4 sources rectangulaires ont été volontairement fixées de l'ordre des dimensions de la source et de manière à ce que les courbes coïncident. Les origines virtuelles ainsi obtenues sont cohérentes.
D'après les résultats de la figure 5.51, on constate que le coefficient théorique K_Q du cas 3 sources est égal à 0,0051, cette valeur est proche de la valeur théorique K_Q = 0,005. Les courbes des cas 3 et 4 sources rectangulaires sont proches. Donc, on peut conclure que les cas 3 et 4 sources rectangulaires vérifient le modèle de la source ponctuelle.
D'après nos résultats expérimentaux, on peut donc supposer qu'à partir d'une source présentant un rapport d'aspect (Longueur/largeur) inférieur à 3, le modèle de la source ponctuelle peut s'appliquer.

5.2.7 Erreur de mesure

Dans cette partie, nous présentons les erreurs de mesure obtenues sur les rayons thermiques, les rayons dynamiques, le débit et l'origine virtuelle à partir de la méthode analytique présentée dans le paragraphe 3.4.5 a).

- *Erreur de mesure : rayon thermique*

D'après l'étude de répétitivité décrite en annexes, nous avons fixé une imprécision sur la mesure de température égale à 0,4°C.

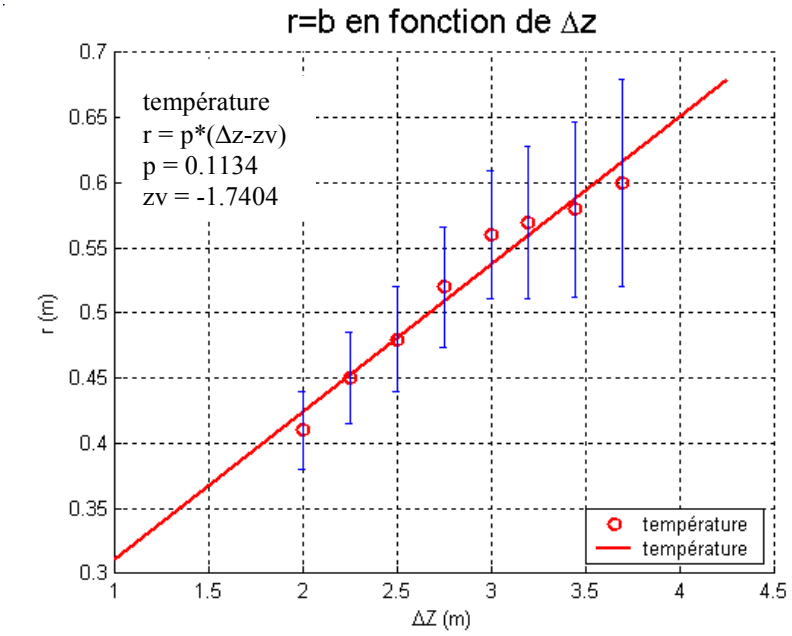


Figure 5.52 : Erreur de mesure sur le rayon thermique en fonction de z : cas 1 source

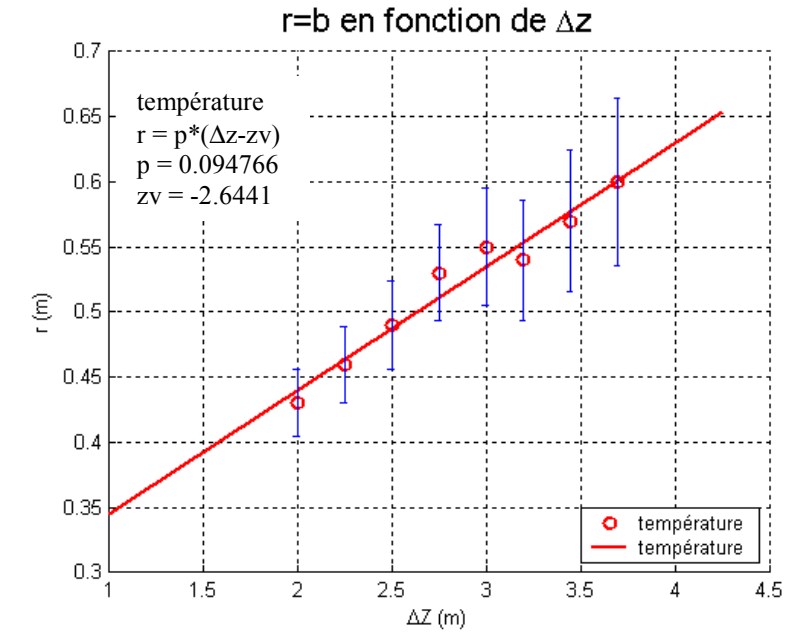


Figure 5.53 : Erreur de mesure sur le rayon thermique en fonction de z : cas 2 sources

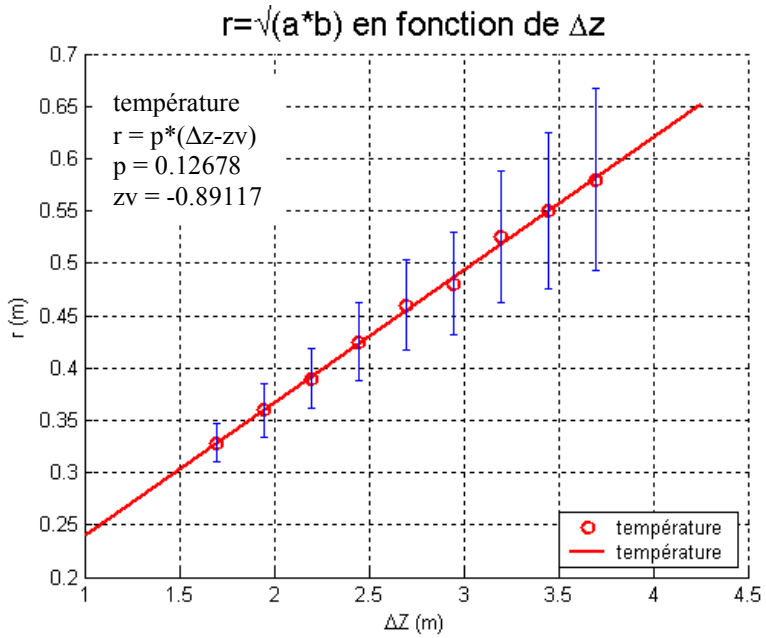


Figure 5.54 : Erreur de mesure sur le rayon thermique en fonction de z : cas 3 sources

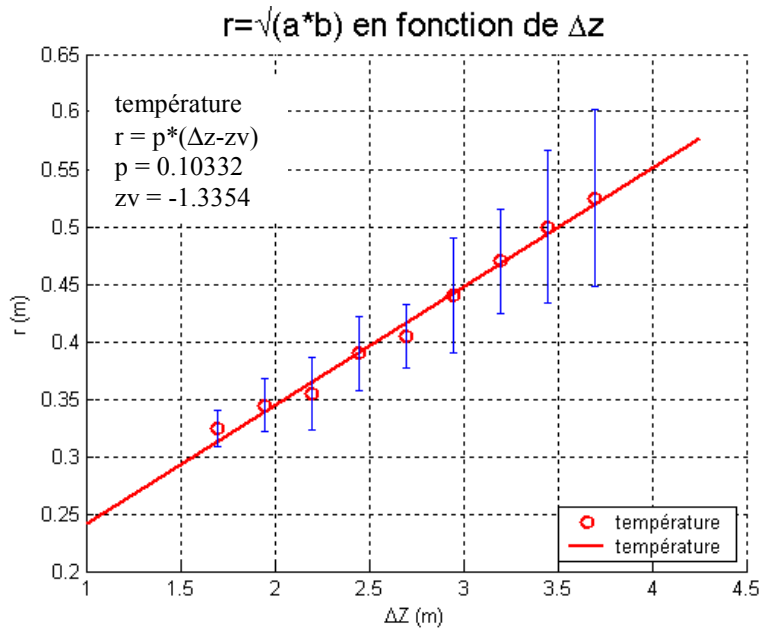


Figure 5.55 : Erreur de mesure sur le rayon thermique en fonction de z : cas 4 sources

Les figures 5.52, 5.53, 5.54, 5.55 illustrent l'erreur de mesure sur le rayon thermique en fonction de z pour les 4 configurations de source. Les barres d'erreurs indiquées sur les figures pour chaque hauteur z représente deux fois l'écart-type obtenu à partir de la méthode analytique. On peut observer que ces barres d'erreur sont plus en plus grandes au fur et à mesure que z augmente. Ces barres d'erreurs sont comprises environ entre 3 cm et 16 cm pour les 4 cas.

➢ *Erreur de mesure : rayon dynamique*

D'après l'étude de répétitivité décrite en annexes, nous avons fixé une imprécision sur la mesure de vitesse à 0,02 m/s.

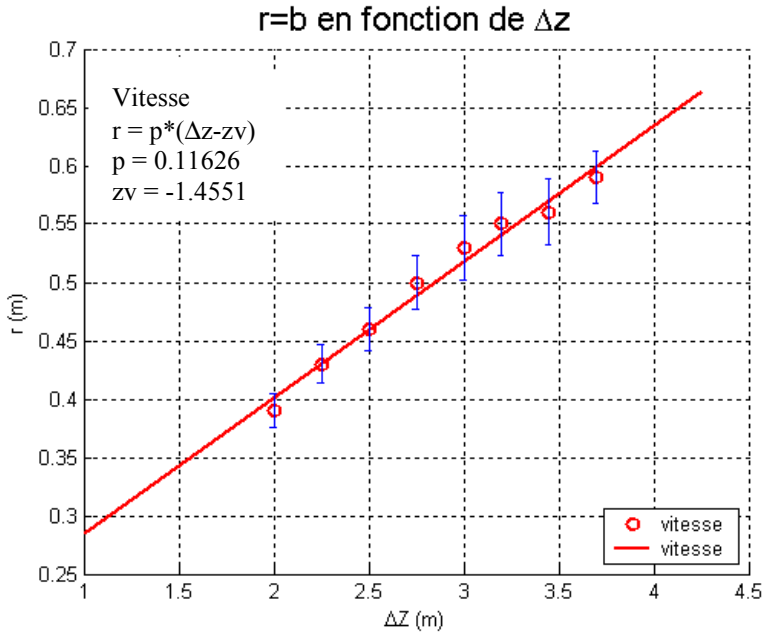


Figure 5.56 : Erreur de mesure sur le rayon dynamique en fonction de z : cas 1 source

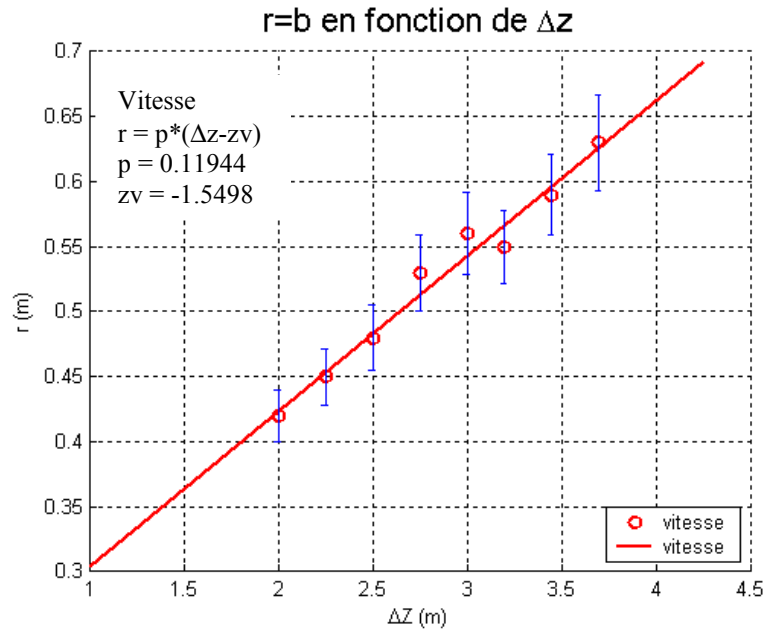


Figure 5.57 : Erreur de mesure sur le rayon dynamique en fonction de z : cas 2 sources

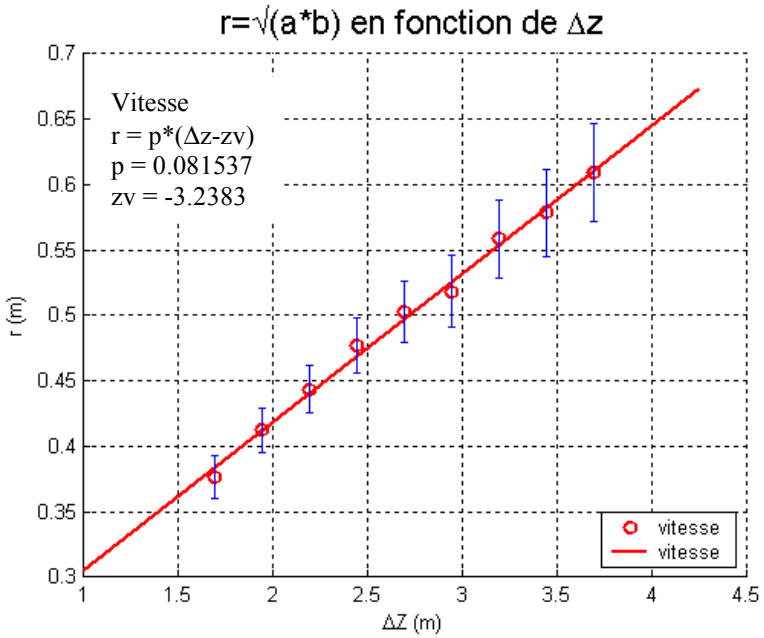


Figure 5.58 : Erreur de mesure sur le rayon dynamique en fonction de z : cas 3 sources

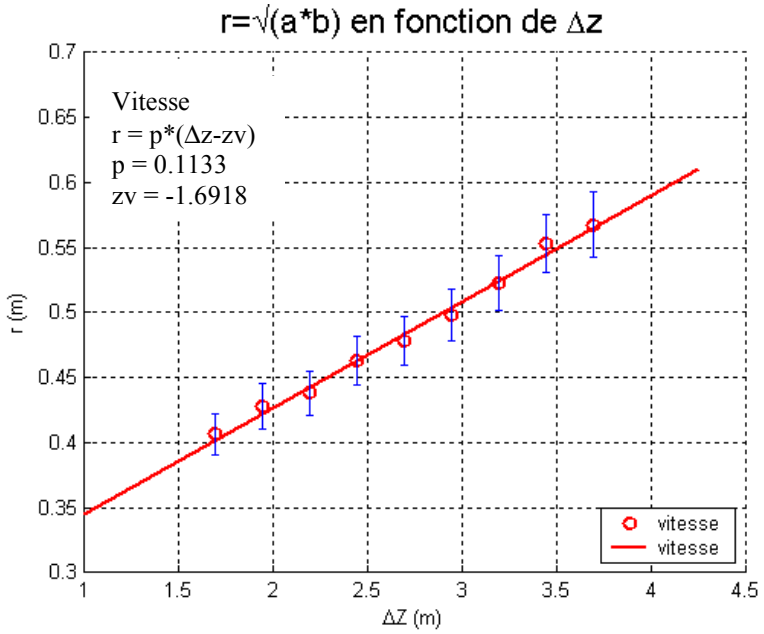


Figure 5.59 : Erreur de mesure sur le rayon dynamique en fonction de z : cas 4 sources

Les figures 5.56, 5.57, 5.58, 5.59 illustrent l'erreur de mesure sur le rayon dynamique en fonction de z pour les 4 configurations de source. Les barres d'erreurs indiquées sur les figures pour chaque hauteur z représente deux fois l'écart-type obtenu à partir de la méthode analytique. De même que pour l'erreur sur le rayon thermique, on peut observer que ces barres d'erreur sont plus en plus grandes au fur et à mesure que z augmente. Ces barres d'erreurs sont comprises environ entre 3 cm et 8 cm pour les 4 cas.

- *Incertitude sur le débit*

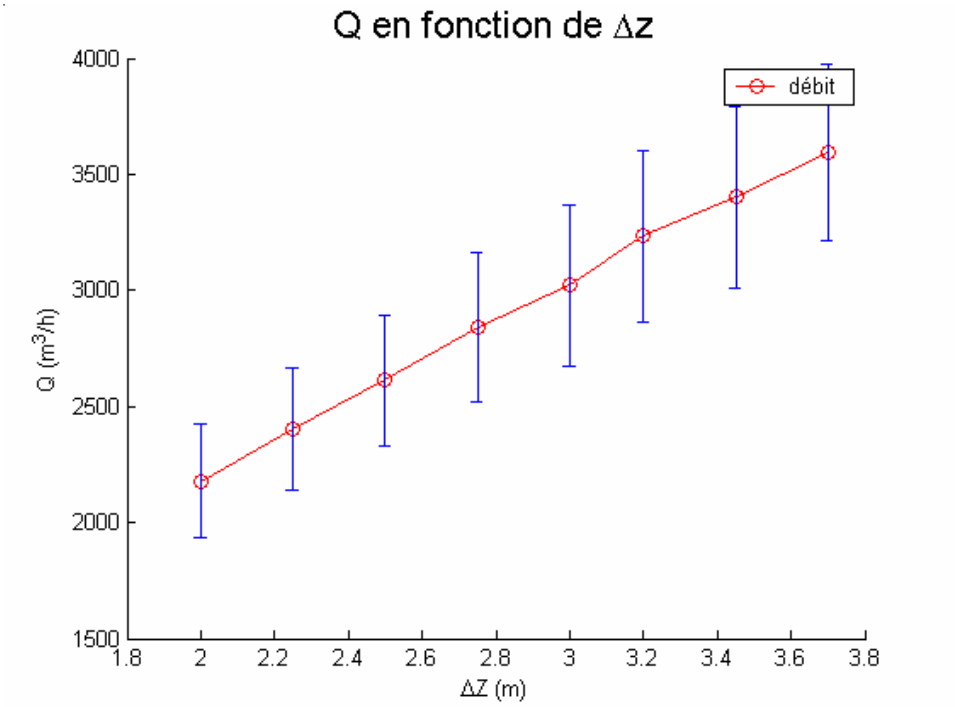


figure 5.60 : débit en fonction de la hauteur z – barres d'erreur : cas 1 source

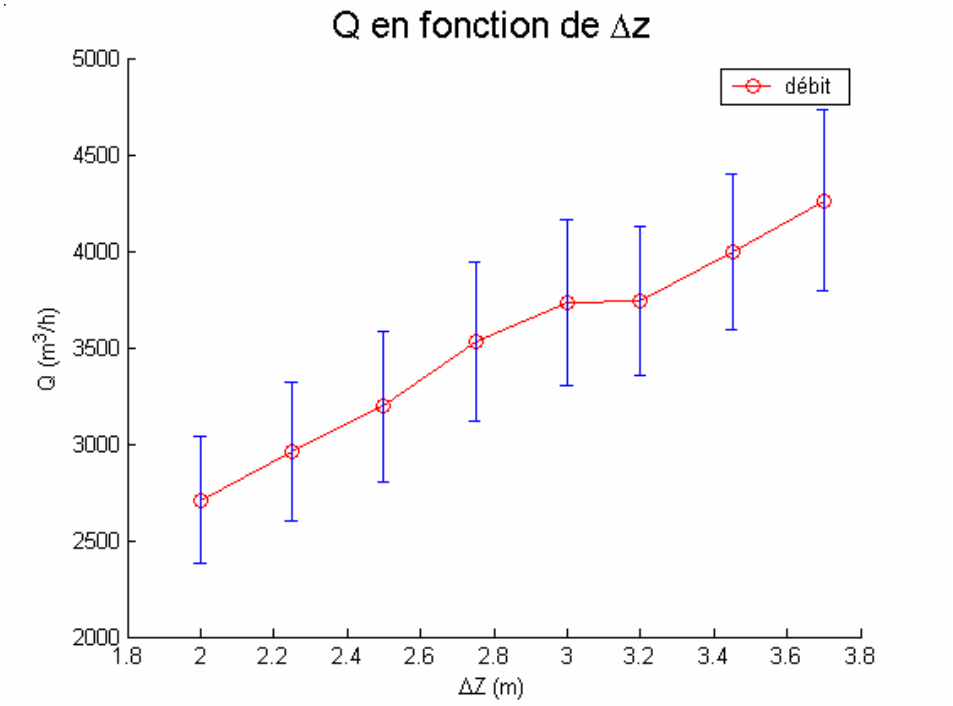


figure 5.61 : débit en fonction de la hauteur z – barres d'erreur : cas 2 sources

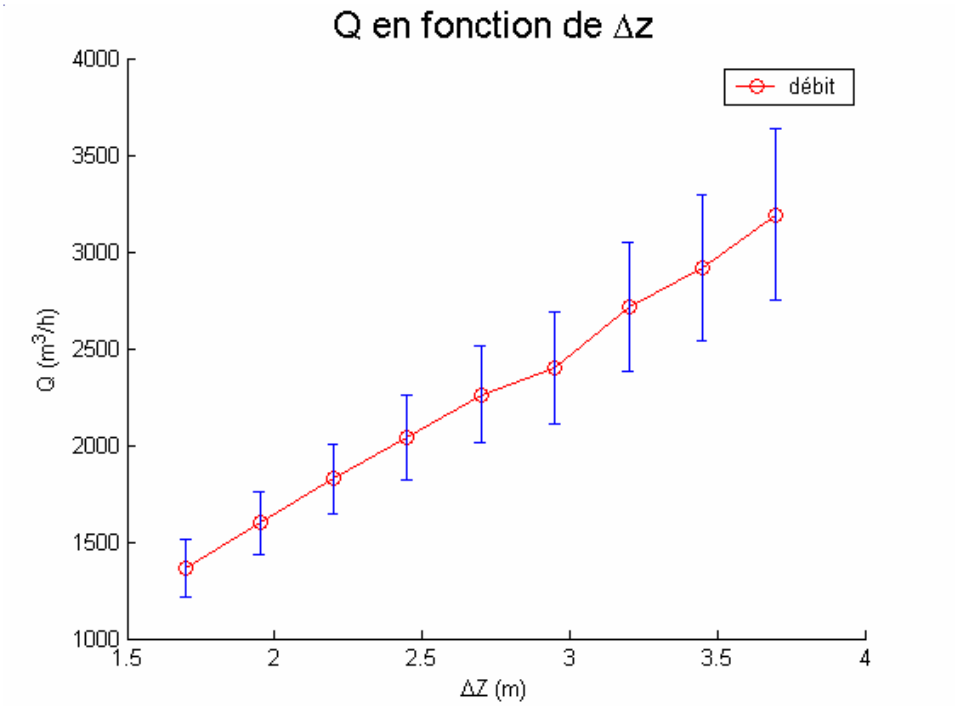


figure 5.62 : débit en fonction de la hauteur z – barres d'erreur : cas 3 sources

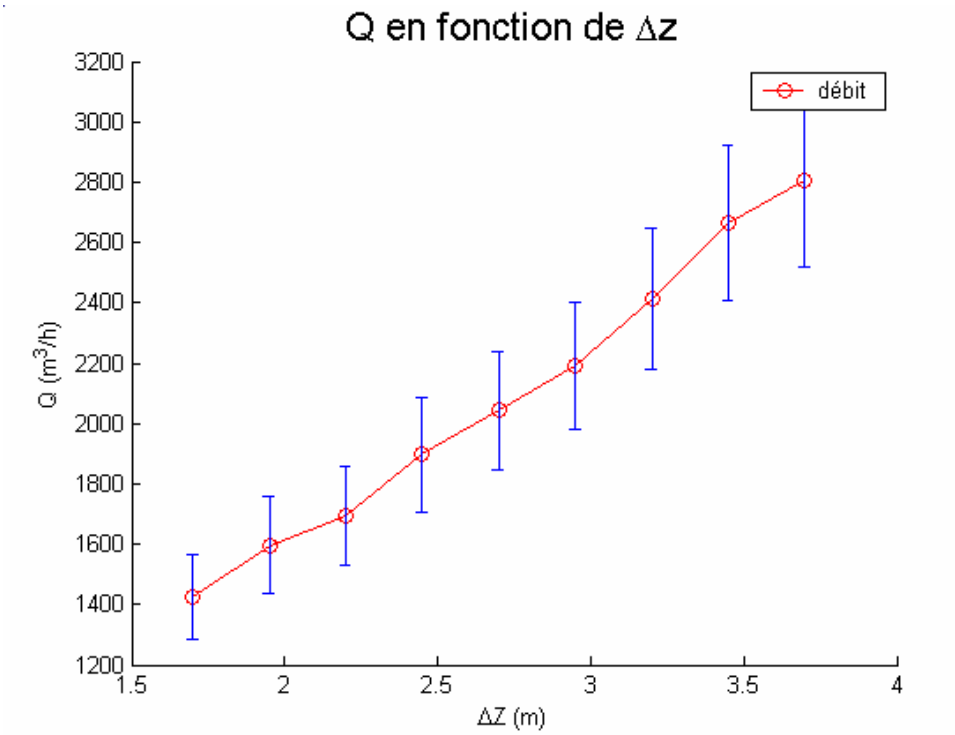


figure 5.63 : débit en fonction de la hauteur z – barres d'erreur : cas 4 sources

Les figures 5.60 à 5.63 illustrent le débit expérimental en fonction de Δz avec les barres d'incertitudes. D'après ces figures, on peut observer que les barres d'incertitudes croient en fonction de Δz. L'incertitude sur les débits pour les 4 sources évolue environ entre 140 m^3/h et 470 m^3/h. Pour une hauteur donnée, l'incertitude relative sur le débit est d'environ 10% pour les 4 configurations.

- *Incertitude sur l'origine virtuelle*

Les origines virtuelles thermiques et dynamiques ont été calculées jusqu'à présent sans prendre en compte les erreurs de mesures de température et de vitesse. Ces erreurs de mesure ont une influence sur la valeur des rayons thermiques et dynamiques et donc sur l'origine virtuelle. L'objectif de cette partie est de prendre en compte les erreurs de mesures de température et de vitesse calculées ci-dessus dans le calcul de la pente p, l'ordonnée à l'origine z_0, l'origine virtuelle et de connaître leurs incertitudes correspondantes (voir paragraphe 3.4.5 a).

Thermique :

	Cas 1 source	Cas 2 sources	Cas 3 sources	Cas 4 sources
p (m)	0,127	0,101	0,135	0,104
z_0 (m)	0,174	0,237	0,097	0,138
Δp (m)	0,031	0,026	0,022	0,018
Δz_0 (m)	0,081	0,067	0,048	0,041
z_v (m)	-1,36	-2,34	-0,72	-1,32
$\Delta z_v/z_v$ (%)	71	54	65,6	48

Tableau 5.29 : tableau récapitulatif des résultats sur la pente p, l'ordonnée à l'origine z_0 et leurs incertitudes, l'origine virtuelle et son incertitude pour les 4 cas

D'après le tableau 5.29, on constate que les incertitudes sur l'origine virtuelle sont élevées pour les 4 cas (entre 48 et 71%). Dans le calcul d'incertitude de l'origine virtuelle, la part d'incertitude est plus grande pour l'ordonnée à l'origine que pour la pente pour chacune des configurations de sources. L'erreur faite sur l'origine virtuelle est importante, ceci implique également une erreur conséquente pour le débit.

Dynamique :

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
p (m)	0,12	0,127	0,116	0,079
z_0 (m)	0,154	0,182	0,185	0,271
Δp (m)	0,013	0,017	0,0127	0,0101
Δz_0 (m)	0,034	0,046	0,031	0,027
z_v (m)	-1,28	-1,44	-1,6	-3,41
Δz_v (%)	32,8	38,7	27,7	22,5

Tableau 5.30 : tableau récapitulatif des résultats sur la pente p, l'ordonnée à l'origine z_0 et leurs incertitudes, l'origine virtuelle et son incertitude pour les 4 cas

D'après le tableau 5.30, on constate que les incertitudes sur l'origine virtuelle pour les 4 cas sont moins élevées (entre 22,5% et 32,8%) que celles obtenues d'après les résultats thermiques.

5.2.8 Conclusion

Les différents résultats expérimentaux présentés dans les paragraphes précédents ont permis d'observer le développement du panache au dessus d'une source rectangulaire modulable. Plusieurs configurations de source rectangulaire avec des rapports Longueur/largeur différents (1,66, 2, 3 et 6) ont été testées à partir de 4 modules rectangulaires de dimensions 0,25 x 1,5 m de base et 0,5 m de hauteur, seule la surface supérieure de la source supérieure a été chauffée.

Voici les principales observations :

- La forme du panache obtenu est elliptique en zone proche puis devient axisymétrique pour les 4 configurations à partir d'une certaine hauteur z. Plus la géométrie de la source tend vers le carré, plus le panache est axisymétrique.
- L'orientation des isothermes et des isovitesses est la même que celle de la source thermique.
- La position du centre du panache est très excentrée par rapport à celle de la source puis devient de plus en plus centrée lorsqu'on augmente le nombre de sources.
- On peut remarquer également que le rayon a évolue peu par rapport au rayon b pour 1 et 2 sources rectangulaires en thermique et en dynamique. Contrairement aux configurations 3 et 4 sources où les rayons a et b évoluent en fonction de z.
- Les champs thermiques et dynamiques ne se superposent pas pour une même hauteur. En effet, les rayons dynamiques sont un peu supérieurs aux rayons thermiques. De plus, la forme elliptique du panache est plus marquée pour les champs de vitesse. Enfin, la vitesse au centre croit légèrement puis devient constante sauf dans le cas 3 sources rectangulaires.
- Les coefficients directeurs obtenus en thermique et en dynamique sont en accord avec la théorie ($p = 0,11$).
- Les origines virtuelles thermiques et dynamiques obtenues à partir de l'évolution des rayons des ellipses en fonction de z pour les 4 configurations de source ne permettent pas d'établir des relations entre la géométrie de la source et la position de l'origine virtuelle.
- D'après nos résultats expérimentaux, on peut supposer qu'à partir d'une source présentant un rapport d'aspect (Longueur/largeur) inférieur à 3, le modèle de la source ponctuelle peut s'appliquer. Par conséquent, le modèle de la source linéaire est applicable pour des sources rectangulaires de rapport d'aspect (Longueur/largeur) supérieur à 3.

5.3 Source rectangulaire : étude de la transition source linéique/source ponctuelle

5.3.1 Introduction

L'objectif de cette étude est d'affiner la détermination du rapport d'aspect critique à partir duquel le panache bascule d'un comportement de source linéique à un comportement de source ponctuelle. Dans le paragraphe précèdent, on a observé un comportement de source linéique pour les sources de rapport d'aspect supérieur à 3 et un comportement de source ponctuelle pour les sources de rapport d'aspect égaux à 2 et à 1,5. Dans ce paragraphe, nous allons essayer de voir ce qui se passe dans la zone de transition où le rapport d'aspect évolue entre 2 et 3 en étudiant de nouveaux cas de source rectangulaires.

5.3.2 Configuration expérimentale

Les figures 5.64 et 5.65 illustrent les nouveaux cas de source rectangulaire afin d'étudier la zone de transition source linéique/source ponctuelle. Nous avons choisi deux cas avec trois sources dont la distribution de température n'est pas homogène. La source centrale est à 350°C dans les deux cas et les sources extérieures sont à 85°C puis à 150°C. Ceci a pour but de faire varier le rapport d'aspect entre 2 et 3 de la source rectangulaire et ainsi d'observer ce qui se passe dans cette zone.

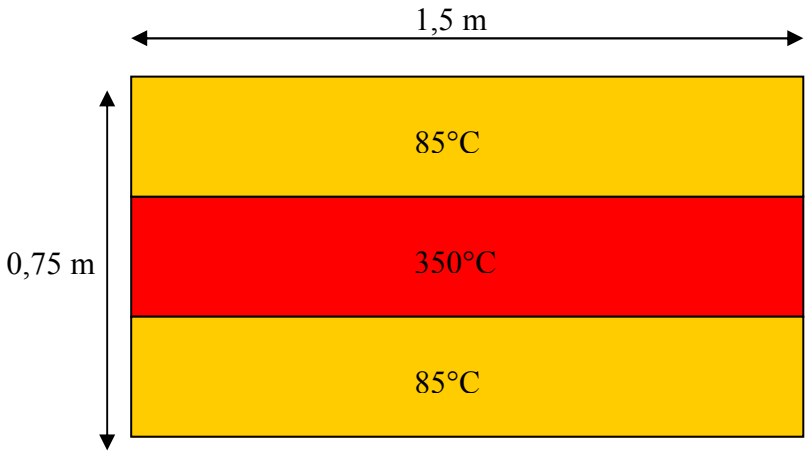


figure 5.64 : configuration de 3 sources rectangulaires (vue de dessus) : T=85°C, T=350°C, T=85°C.

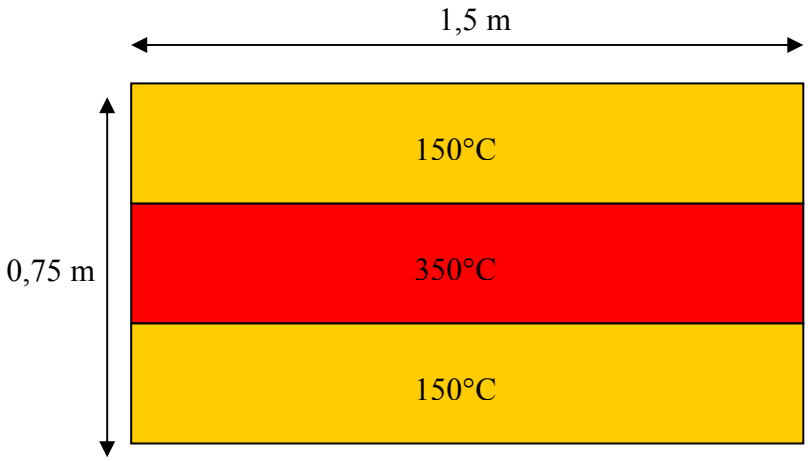


figure 5.65 : configuration de 3 sources rectangulaires (vue de dessus) : T=150°C, T=350°C, T=150°C.

5.3.3 Comparaison des résultats expérimentaux pour les cas étudiés.

Dans ce paragraphe, nous comparons les résultats expérimentaux de 4 cas de source rectangulaire : cas 1 source étudié précédemment (T=350°C), cas 3 sources (T=85°C, T=350°C, T=85°C), cas 3 sources (T=150°C, T=350°C, T=150°C), cas 3 sources étudié précédemment (T=150°C, T=150°C, T=150°C). Cette étude de comparaison permettra d'analyser la zone de transition entre un cas de source linéaire et un cas de source ponctuelle.

- *Température*

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,75	88,4	0,114	0,045	0,5	0,36	6,8
2	89	0,121	0,043	0,52	0,41	6,2
2,25	89,1	0,127	0,038	0,54	0,45	5,6
2,5	89,8	0,133	0,039	0,55	0,48	5,2
2,75	89,3	0,144	0,037	0,56	0,52	4,8
3	89,2	0,151	0,031	0,58	0,56	4,5
3,2	89	0,156	0,026	0,6	0,57	4,2
3,45	89,3	0,166	0,03	0,59	0,57	3,6
3,7	89,6	0,178	0,035	0,61	0,6	3,2

Tableau 5.31 : Paramètres du modèle gaussien elliptique : cas 1 source

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,75	92,8	-0,0004	-0,031	0,51	0,37	5,9
2	92,3	0,016	-0,02	0,52	0,41	5,5
2,25	91,6	0,024	-0,037	0,52	0,44	4,9
2,5	91	0,029	-0,039	0,51	0,46	4,5
2,75	90,2	0,048	-0,034	0,53	0,5	4,2
3	90,6	0,044	-0,042	0,53	0,52	3,7
3,2	90,3	0,06	-0,032	0,56	0,56	3,5
3,45	90,2	0,077	-0,037	0,56	0,58	3,2
3,7	91,2	0,091	-0,021	0,59	0,63	2,9

Tableau 5.32 : paramètres du modèle elliptique gaussien : cas 3 sources (T=85°C, T=350°C, T=85°C)

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,75	92,2	0,01	-0,023	0,49	0,36	7,6
2	91,7	0,015	-0,022	0,49	0,39	6,9
2,25	90,8	0,023	-0,02	0,51	0,43	6,2
2,5	90,6	0,022	-0,028	0,5	0,45	5,6
2,75	90,2	0,029	-0,033	0,51	0,47	5
3	89,7	0,038	-0,026	0,53	0,51	4,6
3,2	90,7	0,036	-0,032	0,51	0,51	4
3,45	90,6	0,045	-0,035	0,53	0,55	3,7
3,7	90,2	0,059	-0,025	0,55	0,58	3,5

Tableau 5.33 : paramètres du modèle elliptique gaussien : cas 3 sources (T=150°C, T=350°C, T=150°C)

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	ΔT_c [°C]
1,7	89,1	0,055	0,022	0,36	0,3	7,1
1,95	89,6	0,062	0,014	0,38	0,34	6,2
2,2	89,1	0,076	0,014	0,4	0,38	5,5
2,45	89,4	0,082	0,004	0,43	0,42	4,9
2,7	89	0,093	0,093	0,46	0,46	4,5
2,95	88,2	0,103	-0,008	0,48	0,48	4,1
3,2	89,3	0,109	-0,027	0,52	0,53	3,7
3,45	89,2	0,112	-0,03	0,54	0,56	3,4
3,7	89,2	0,131	-0,031	0,57	0,59	3,2

Tableau 5.34 : paramètres du modèle elliptique gaussien : cas 3 sources (T=150°C, T=150°C, T=150°C)

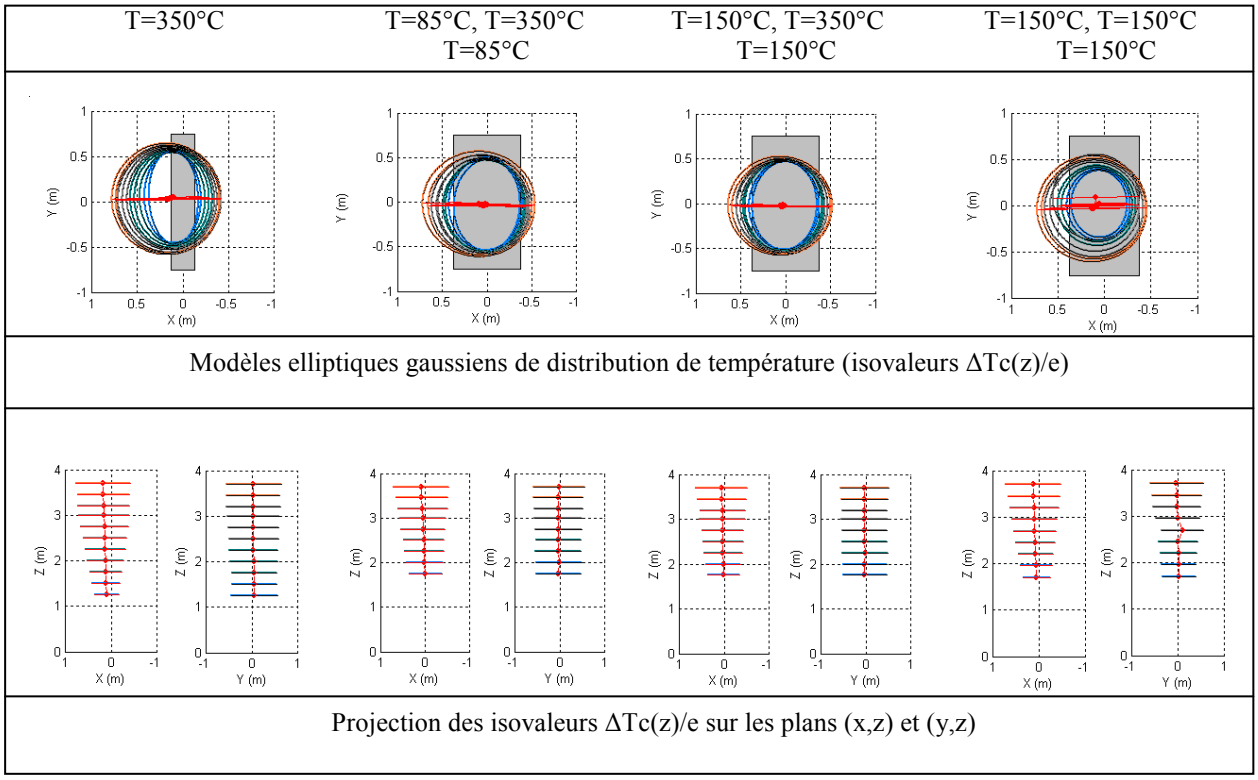


Figure 5.66 : comparaison des modèles elliptiques (isothermes $\Delta T_c(z)/e$) sur les plans (x, y), (x, z) et (y, z) entre les quatre configurations

Les tableaux 5.31, 5.32, 5.33, 5.34 et la figure 5.66 illustrent les résultats des modèles elliptiques appliqués aux champs de température pour les quatre configurations de source. D'après ces résultats, on constate principalement que seul le cas 3 sources homogène en température de surface développe un panache quasiment axisymétrique tandis que les trois autres cas développent des panaches elliptiques puis axisymétriques à partir d'une hauteur z. On observe également que les rayons a et b évoluent en fonction de z pour le cas 3 sources (T=150°C, T=150°C, T=150°C) tandis que seul le rayon b évolue pour les trois autres cas.

- *Vitesse*

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,75	87,9	0,106	-0,006	0,61	0,36	0,8	1987
2	87,5	0,105	-0,003	0,61	0,39	0,81	2179
2,25	87,5	0,107	-0,006	0,61	0,43	0,81	2403
2,5	88	0,106	-0,006	0,62	0,46	0,81	2613
2,75	87,4	0,114	-0,008	0,62	0,5	0,81	2840
3	87,4	0,117	-0,01	0,63	0,53	0,8	3021
3,2	87,8	0,112	-0,024	0,65	0,55	0,8	3235
3,45	88,2	0,097	-0,028	0,68	0,56	0,79	3402
3,7	87,9	0,1	-0,033	0,7	0,59	0,77	3597

Tableau 5.35 : paramètres du modèle elliptique gaussien : cas 1 source

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,75	89,4	0,0097	-0,048	0,76	0,4	0,705	2424
2	89,4	0,021	-0,04	0,71	0,43	0,737	2545
2,25	88,1	0,014	-0,053	0,72	0,46	0,742	2779
2,5	87,5	0,0097	-0,055	0,72	0,48	0,757	2959
2,75	86,8	0,024	-0,053	0,7	0,51	0,765	3089
3	86,5	0,0046	-0,066	0,74	0,54	0,754	3408
3,2	86,9	0,017	-0,063	0,74	0,56	0,755	3538
3,45	86,3	0,019	-0,073	0,75	0,58	0,752	3700
3,7	87,2	0,016	-0,07	0,75	0,61	0,742	3839

Tableau 5.36 : paramètres du modèle elliptique gaussien : cas 3 sources (T=85°C, T=350°C, T=85°C)

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,75	88,7	0,015	-0,049	0,66	0,39	0,828	2410
2	88,5	0,013	-0,045	0,66	0,41	0,843	2580
2,25	88	0,016	-0,041	0,65	0,46	0,852	2881
2,5	87,3	0,0074	-0,05	0,66	0,48	0,86	3081
2,75	87	0,01	-0,056	0,69	0,51	0,849	3379
3	86,9	0,013	-0,053	0,69	0,54	0,858	3616
3,2	87	0,005	-0,066	0,72	0,56	0,847	3862
3,45	87	0,003	-0,066	0,72	0,58	0,845	3990
3,7	86,5	0,007	-0,062	0,72	0,62	0,841	4246

Tableau 5.37 : paramètres du modèle elliptique gaussien : cas 3 sources (T=150°C, T=350°C, T=150°C)

z [m]	Θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	a [m]	b [m]	w_c [m/s]	Q [m^3/h]
1,7	88	0,057	0,003	0,43	0,33	0,85	1364
1,95	88	0,052	-0,011	0,46	0,37	0,83	1598
2,2	88,2	0,059	-0,017	0,48	0,41	0,82	1825
2,45	87,7	0,047	-0,034	0,53	0,43	0,79	2036
2,7	87,3	0,051	-0,039	0,55	0,46	0,79	2260
2,95	86,2	0,051	-0,04	0,56	0,48	0,79	2402
3,2	86,6	0,049	-0,064	0,6	0,52	0,77	2717
3,45	86,3	0,039	-0,074	0,62	0,54	0,77	2916
3,7	86	0,054	-0,076	0,64	0,58	0,76	3191

Tableau 5.38 : paramètres du modèle elliptique gaussien : cas 3 sources (T=150°C, T=150°C, T=150°C)

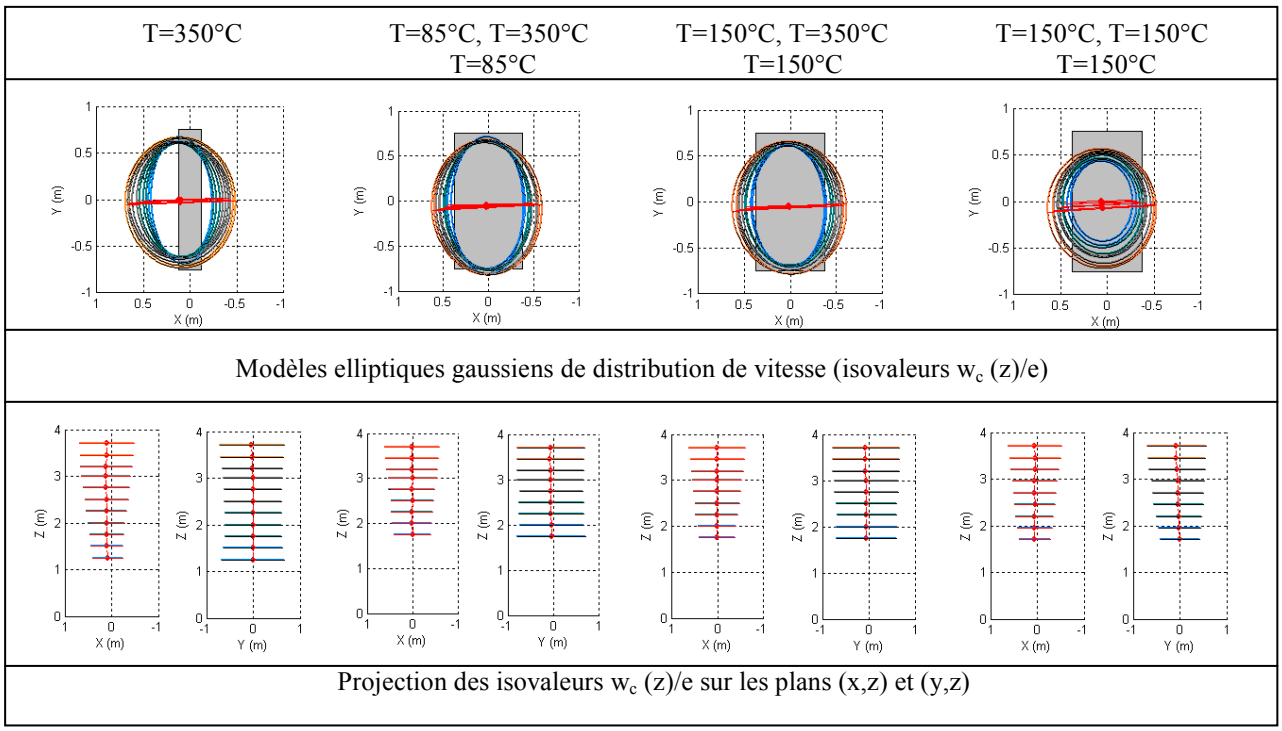


Figure 5.67: comparaison des modèles elliptiques (isovitesses $w_c(z)/e$) sur les plans (x, y), (x, z) et (y, z) entre les quatre configurations

Les tableaux 5.35, 5.36, 5.37, 5.38 et la figure 5.67 illustrent les résultats des modèles elliptiques appliqués aux champs de vitesse pour les quatre configurations de source. De même que pour les champs de température, on constate principalement que le cas 3 sources homogène en température de surface développe un panache plus axisymétrique que les trois autres cas.

- *Origines virtuelles*

Température					
		Cas T=350°C	Cas T=85°C T=150°C T=85°C	Cas T=150°C T=350°C T=150°C	Cas T=150°C T=150°C T=150°C
$r(z) = p(z - z_v)$	p	0,113	0,127	0,109	0,13
	$z_v(m)$	-1,74	-1,18	-1,61	-0,89
Vitesse					
$r(z) = p(z - z_v)$	p	0,116	0,107	0,116	0,11
	$z_v(m)$	-1,45	-2,03	-1,62	-1,69

Tableau 5.39 : tableau récapitulatif des paramètres obtenus par les modèles $r(z) = p(z - z_v)$ pour les champs de température et de vitesse avec (r = b pour les sources non homogènes et r = √ab pour le cas homogène)

Le tableau ci-dessus présente les coefficients directeurs et les origines virtuelles thermiques et dynamiques pour les quatre configurations de source. Les coefficients directeurs sont en bon accord avec la théorie (p = 0,11). Les origines virtuelles thermiques et dynamiques sont

différentes pour les quatre configurations. Il est difficile de conclure sur l'influence de la configuration de source sur la position de l'origine virtuelle.

5.3.4 Influence de la géométrie de la source sur les paramètres Q, ΔT_c, w_c

Afin d'étudier l'influence de la géométrie de la source sur le développement du panache, nous avons effectué pour chaque paramètres Q, ΔT_c, w_c, le rapport entre celui du cas étudié et celui d'un cas référence. Ensuite, nous avons normalisé le rapport précèdent par le rapport des puissances convectées (cas étudié/cas référence) de façon à s'affranchir de ce paramètre qui n'est pas le même pour les différents cas étudiés. Le cas référence est le même et a été choisi arbitrairement.

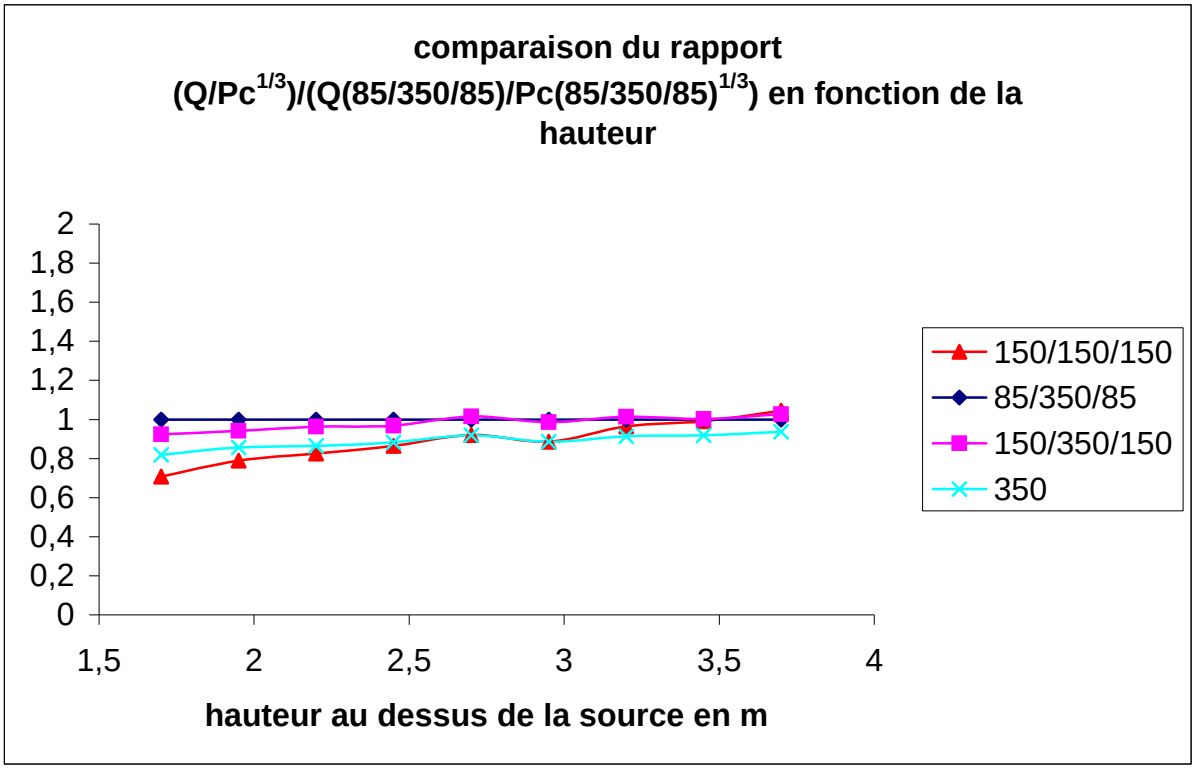


figure 5.68 : comparaison du rapport débit/puissance convectée entre un cas étudié et le cas référence pour plusieurs cas de sources rectangulaires référencés par leur température

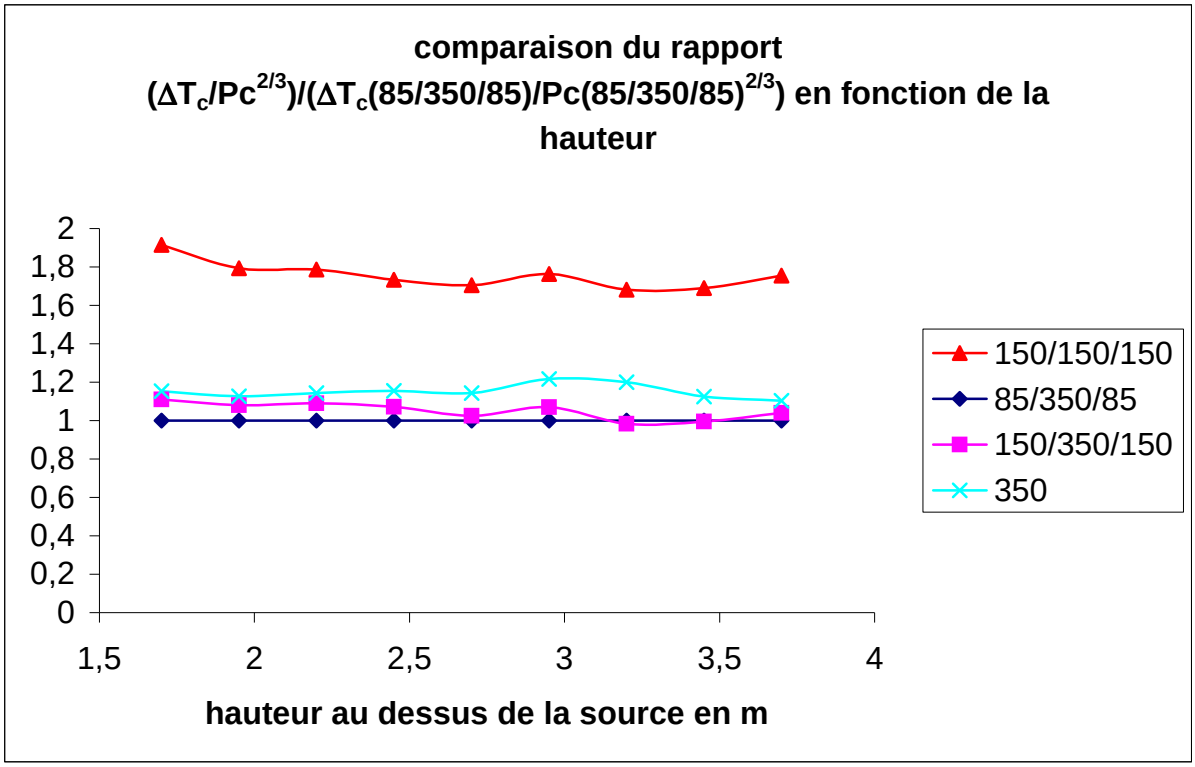


figure 5.69 : comparaison du rapport ΔT_c /puissance convectée entre un cas étudié et le cas référence pour plusieurs cas de sources rectangulaires référencés par leur température

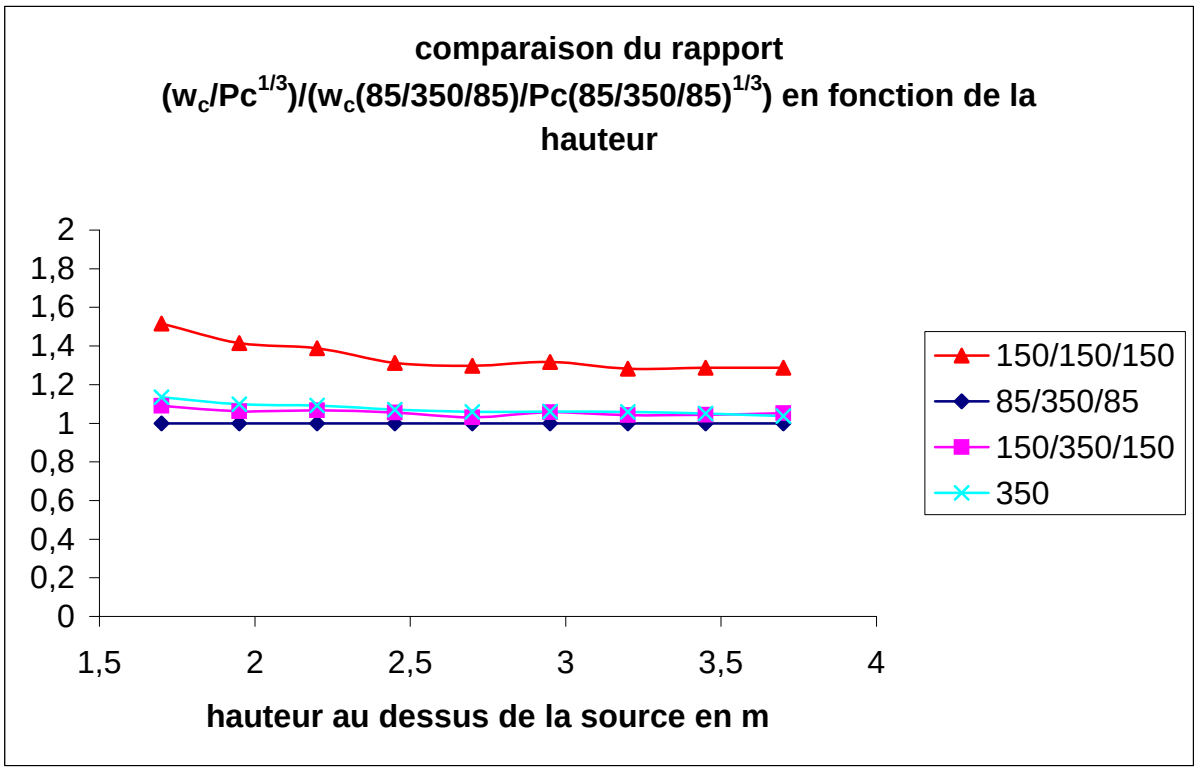


figure 5.70 : comparaison du rapport w_c /puissance convectée entre un cas étudié et le cas référence pour plusieurs cas de sources rectangulaires référencés par leur température

Les figures ci-dessus présentent respectivement l'évolution du rapport débit/puissance convectée, ΔT_c /puissance convectée, w_c /puissance convectée entre un cas étudié et le cas

référence pour les quatre cas de sources rectangulaires référencés par leur température. Le cas référence choisi est le cas 3 sources rectangulaires (85°C, 350°C, 85°C). D'après ces figures, pour chaque paramètres, on constate que le rapport étudié en fonction de la hauteur est proche de 1 pour le cas 1 source et les cas 3 sources (T=85°C, T=350°C, T=85°C et T=150°C, T= 350°C, T=150°C) en zone proche comme en zone lointaine ce qui montre que les paramètres Q, ΔT_c et w_c sont quasiment identiques quelque soit le cas de source. Pour le cas de source (T=150°C, T=150°C, T=150°C), on observe que la courbe est éloignée de celle des autres cas de source en zone proche puis se rapproche de 1 lorsque z augmente. Ainsi, on peut supposer qu'en zone lointaine, la géométrie de la source n'a plus d'influence sur les paramètres du panache.
Les courbes obtenues sur les paramètres Q, ΔT_c, w_c mettent en évidence les cas de source de modèle linéaire : cas 1 source et les cas 3 sources (T=85°C, T=350°C, T=85°C et T=150°C, T= 350°C, T=150°C) et le cas de source de modèle ponctuel (T=150°C, T=150°C, T=150°C). Nous avons vu que les formules théoriques différent selon le cas, ceci explique les différences observées sur l'évolution des paramètres entre un cas de source ponctuel et un cas de source linéaire.

5.3.5 Conclusions

Cette étude présente la zone de transition entre un cas de source linéaire et un cas de source ponctuelle. Nous avons étudié et comparé les différents résultats expérimentaux (champs thermiques, champs dynamiques, origines virtuelles, influence de la géométrie de la source sur les paramètres Q, ΔT_c, w_c) pour 4 configurations de sources différentes :

- T=350°C (Pc = 2000W)
- T=85°C, T=350°C, T=85°C (Pc = 2000W)
- T=150°C, T=350°C, T=150°C (Pc = 2500W)
- T=150°C, T=150°C, T=150°C (Pc = 1000W)

Les différents résultats de cette étude nous amène aux conclusions suivantes :

- La distribution de température de surface dans le cas 3 sources a une influence sur la forme du panache : elliptique pour les deux cas non homogènes et quasiment axisymétrique pour le cas uniforme.

- Il est difficile de conclure sur l'influence de la distribution de température de surface sur la position de l'origine virtuelle. Les origines virtuelles thermiques et dynamiques sont assez proches entre les 4 cas, On pourrait supposer que la température de surface n'a pas d'influence sur la position de l'origine virtuelle mais cette supposition est à prendre avec réserves.

- Le modèle linéique s'applique pour les cas T=85°C, T=350°C, T=85°C et T=150°C, T=350°C, T=150°C

- La distribution de température de surface des trois cas étudiés avec trois sources a source a une influence sur le choix du modèle théorique à appliquer pour calculer le débit. Plus la distribution de température est homogène, plus le rapport d'aspect tend vers 3 et donc vers un cas de source ponctuelle.

5.4 Comparaison source cylindrique/source rectangulaire

5.4.1 Cas 1 source cylindrique/2 sources rectangulaires

Une configuration de source de dimensions 0,5 x 1,5 m de base et 0,5 m de hauteur a été testée, seule la surface supérieure de la source supérieure a été chauffée. Les températures de surface (T = 320°C) ont été choisies de manière à conserver la même puissance convectée par la source que pour le cas 1 de la source cylindrique de diamètre 1 m.
Ainsi, l'objectif est d'analyser le développement du panache au-dessus d'une source rectangulaire et de le comparer à celui développé au dessus de la source cylindrique dans le cas de la configuration 1. Les deux sources thermiques de géométries différentes ainsi choisies ont un peu près la même surface de chauffe (0,75 m^2 contre 0,785 m^2 pour la source cylindrique) et ont la même puissance.

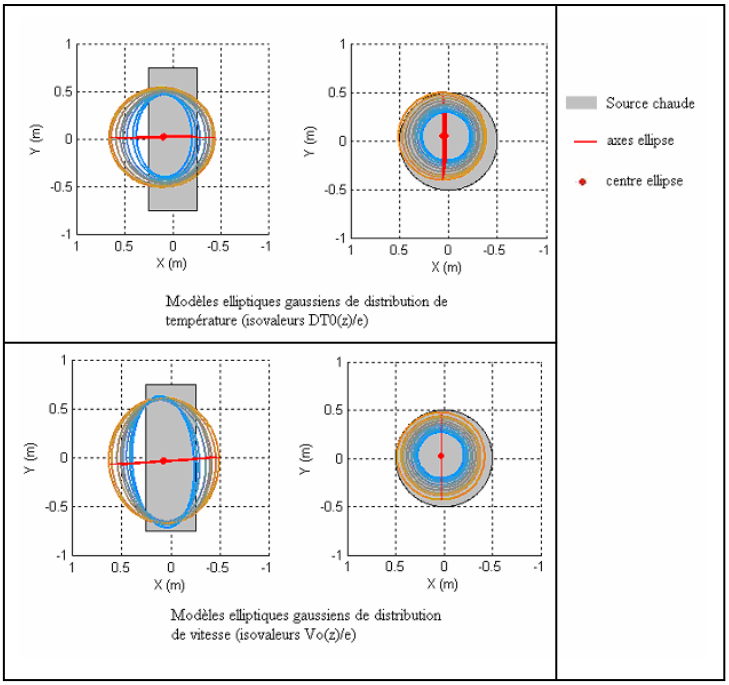


figure 5.71 : comparaison des modèles elliptiques gaussiens de distribution de température et de vitesse obtenus pour la source rectangulaire et la source cylindrique à z = 1,25, 1,50, 1,75, 2,25, 2,5 m , 2,75, 3 m et 3,25 m

D'après la figure 5.71, on peut constater que la forme du panache obtenue est différente entre les deux cas étudiés. Le panache est parfaitement axisymétrique pour la source cylindrique tandis que le panache est elliptique en zone proche puis devient axisymétrique pour la source rectangulaire. La différence de géométries des deux sources explique ce résultat. Les formes de panaches observées sont identiques à partir de z = 2 m pour les deux sources de géométries différentes. L'axisymétrie observée dans le cas de la source rectangulaire montre qu'à partir de z = 2 m, la forme du panache ne dépend plus de la géométrie de la source, le panache est donc en zone lointaine.
On peut observer que les coordonnées du centre du panache sont plus excentrées pour la source rectangulaire. La dissymétrie du soufflage à l'intérieur de la cellule a plus d'influence sur une géométrie de source rectangulaire que sur une source cylindrique.

L'écart de température entre le centre du panache et l'extérieur est plus important pour la source cylindrique mais l'écart avec le paramètre de la source rectangulaire diminue lorsque z augmente.
Enfin le rayon thermique du panache est plus important pour la source rectangulaire de quelques cm.
on peut constater que l'évolution des paramètres du modèle gaussien elliptique appliqué au champ de vitesse est similaire à celle appliqué au champ de température. Ainsi, on observe de la même manière que pour les champs de température les remarques suivantes :

- L'excentricité du panache est plus importante pour la source rectangulaire
- Le panache qui est elliptique en zone proche devient axisymétrique lorsque z augmente
- La stabilité spatiale du panache

Toutefois, d'après la figure 5.71, on peut remarquer que les champs thermiques et dynamiques ne se superposent pas pour une même hauteur. En effet, les rayons dynamiques sont un peu supérieurs aux rayons thermiques. De plus, la forme elliptique du panache est plus marquée pour les champs de vitesse. La cote z où le panache devient axisymétrique est plus grande que celle observée à partir des champs thermiques. L'évolution de la vitesse au centre est très différente pour chacune des sources. En effet, la vitesse décroît pour la source cylindrique tandis qu'elle augmente puis devient constante pour la source rectangulaire. De plus, les vitesses au centre sont plus élevées pour la source cylindrique.

		Cas 1		Source rectangulaire	
		Température	Vitesse	Température	Vitesse
$r(z) = p(z - z_v)$	p	0,1	0,1	0,095	0,12
	$z_v(m)$	-1,05	-0,94	-2,65	-1,55

Tableau 5.40 : tableau récapitulatif des paramètres obtenus par les modèles $r(z) = p(z - z_v)$ pour les champs de température et de vitesse

Le tableau 5.40 récapitule les paramètres obtenus par les modèles $r(z) = p(z - z_v)$ pour les champs de température et de vitesse. D'après ce tableau, on peut constater que les paramètres p obtenu sont en accord avec la théorie des panaches en zone lointaine (p = 0,11). En ce qui concerne l'origine virtuelle, les résultats sont différents en raison de la différence de géométrie entre les deux sources. En effet, les dimensions caractéristiques ne sont pas les mêmes pour les deux sources. L'origine virtuelle obtenue pour le cas 1 correspond au diamètre de la source, ceci vérifie la théorie. Pour la source rectangulaire, on a vu précédemment que les origines virtuelles obtenues expérimentalement ne permettaient pas de tirer une relation sur l'origine virtuelle en fonction d'une grandeur caractéristique de la géométrie de la source. Cependant, nous avons établis une relation à partir des origines virtuelles issues de l'étude sur la vérification du modèle théorique linéaire et ponctuel pour les 4 configurations où la grandeur caractéristique de la source est la largeur. Ainsi l'origine virtuelle pour le cas deux sources rectangulaires correspond à environ deux fois la largeur de la source.

5.4.2 Cas 1, 2, 3, 4, 5 source cylindrique/cas 3 sources rectangulaires et cas 4 sources rectangulaires

Dans cette partie, nous comparons l'application du modèle ponctuel entre tous les cas de la source cylindrique et les cas avec 3 et 4 sources rectangulaires à partir de la formule du débit.

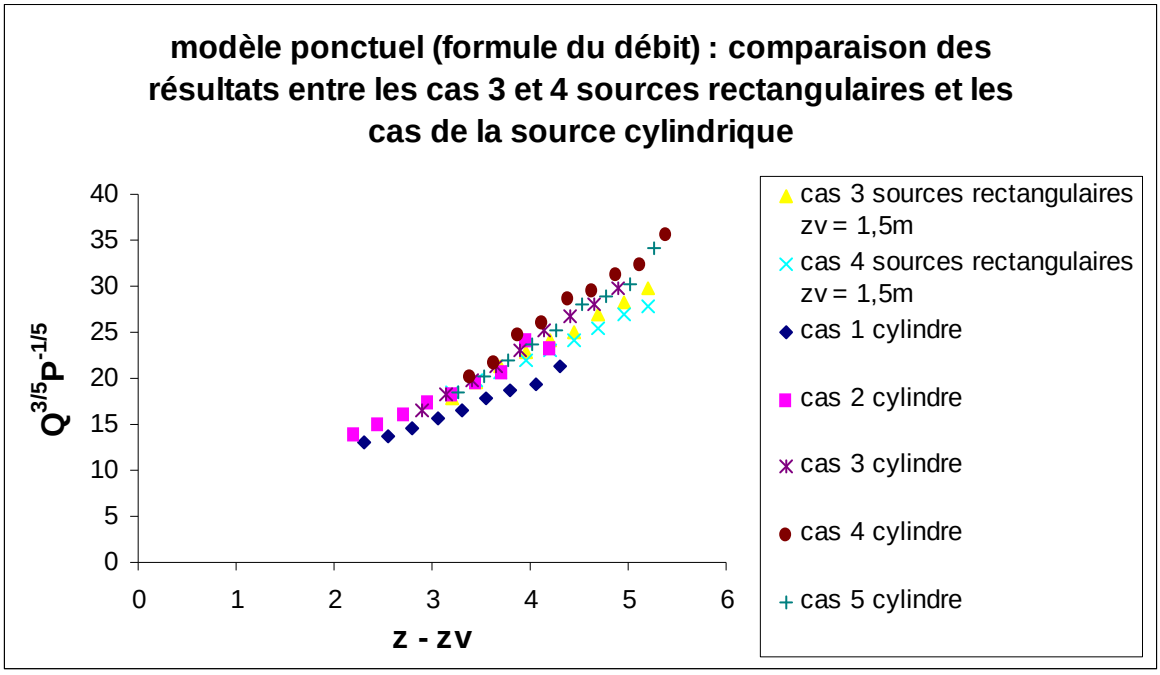


figure 5.72 : modèle ponctuel : comparaison des résultats entre les cas 3 et 4 sources rectangulaires et les cas de la source cylindrique à partir de la formule du débit $Q(z) = 0{,}005.P_c^{1/3}(z - z_v)^{5/3}$

D'après la figure 5.72, on observe que les courbes des cas de source rectangulaire coïncident avec les cas de la source cylindrique. Ces résultats confirment que les cas 3 et 4 sources rectangulaires vérifient le modèle de la source ponctuelle.
Le modèle de la source ponctuelle s'applique sur une source rectangulaire présentant un rapport d'aspect (Longueur/largeur) inférieur à 3.

Chapitre 6

Conclusions

Le travail présenté avait le double objectif de qualifier un nouveau dispositif métrologique permettant d'étudier la distribution de vitesse d'air dans le panache et d'étudier l'influence de la géométrie de la source sur les lois de développement de panache en milieu infini (sans stratification).

Après une étude de faisabilité menée pour déterminer le système de vélocimétrie le mieux adapté, nous avons décidé de nous orienter vers des sondes à film chaud omnidirectionnelles de type sphère. Ces sondes nous indique le module de la vitesse quelque soit l'orientation du courant d'air et nous donne également la température par l'intermédiaire d'une thermistance. Le temps de réponse de ces sondes permets de réaliser une mesure simultanée des capteurs à une fréquence de 1 Hz. La précision donnée par le fournisseur est de 0,02 m/s. En plus des 16 sondes thermoanémométriques, nous avons acquis un nouveau système d'acquisition de mesure qui nous permets de réaliser une mesure simultanée de 64 thermocouples et des 16 sondes thermoanémométriques et ainsi d'étudier les profils des champs thermiques et dynamiques du panache au même instant t.

Une nouvelle source rectangulaire thermique a été commandée de manière à observer l'influence de la géométrie sur les lois de développement de panaches. Cette source rectangulaire est composée de quatre modules rectangulaires identiques (longueur = 1,5 m, largeur = 0,25 m) que l'on peut chauffer indépendamment. Sur chacun de ces modules, seule la surface supérieure du module est chauffée. Ces modules placés les uns à coté des autres suivant le coté de longueur 1,5 m nous permets donc de faire varier le rapport d'aspect longueur/largeur de la source rectangulaire en chauffant 1, 2, 3 ou 4 modules. Le rapport d'aspect est respectivement 6, 3, 2, et 1,5.

Après avoir qualifié le nouveau système métrologique et la nouvelle source rectangulaire, nous avons étudié et comparé plusieurs cas de panaches issus de différentes configuration de source cylindrique et rectangulaire. Ceci dans le but d'étudier l'influence de la géométrie de la source sur le développement de panache et de vérifier les modèles théoriques de la source ponctuelle et de la source linéaire pour les différents cas étudiés.

La première partie consacrée aux résultats expérimentaux présente une étude expérimentale basée sur des mesures de vitesse et de température d'un panache développé au-dessus d'une source cylindrique de dimensions finies. Cinq configurations différentes de source ont été testées. Dans le premier cas, seul le disque supérieur a été chauffé. Puis, pour les quatre autres cas, on a maintenu le disque supérieur chaud et on a chauffé successivement de haut en bas les 4 zones latérales du cylindre jusqu'à ce que le cylindre soit entièrement chaud. Les températures de surface ont été choisies de manière à conserver la même puissance convectée par la source pour les cinq configurations.
Ainsi, l'objectif de cette étude est d'observer peu à peu l'effet de la troisième dimension sur le développement du panache au-dessus d'une source cylindrique à partir d'un cas 2D (le cas 1 :

disque chauffé) et de plusieurs cas 3D. Nous avons noté que les champs thermiques et dynamiques du panache différent pour une même hauteur à un instant t. De plus, le panache devient elliptique et excentré par rapport au centre de la source de quelques centimètres. Les origines virtuelles thermiques et dynamiques ont tendance à diminuer au fur et à mesure qu'on chauffe entièrement le cylindre du haut vers le bas. En tenant compte des hypothèses décrites dans le paragraphe 5.1.4, l'équation suivante donne la position de l'origine virtuelle pour une source cylindrique en fonction de son diamètre et de sa hauteur de chauffe :

$$\frac{z_v}{D} = -2\frac{h}{D} - 0{,}5$$

Donc, la troisième dimension ou la hauteur de chauffe d'une source thermique a des conséquences sur la position de l'origine virtuelle et sur l'évolution des paramètres débit, ΔT_c, V_c du panache. Enfin, l'effet de la troisième dimension sur le développement du panache au-dessus d'une source cylindrique ne contredit pas la théorie de l'origine virtuelle des panaches et ne provoque pas d'instabilités sur le développement du panache.

La deuxième partie présente les résultats expérimentaux basée sur des mesures de vitesse et de température d'un panache développé au-dessus de la source rectangulaire modulable. Tout d'abord, nous avons constaté que la forme du panache obtenu est elliptique en zone proche puis devient axisymétrique pour les 4 configurations à partir d'une certaine hauteur z. Plus la géométrie de la source tend vers le carré, plus le panache est axisymétrique. Ensuite, nous avons observé que l'orientation des isothermes et des isovitesses est la même que celle de la source thermique. De plus, la position du centre du panache est très excentrée (une dizaine de cm) par rapport à celle de la source puis devient de plus en plus centrée lorsqu'on augmente le nombre de sources. Par ailleurs, les champs thermiques et dynamiques ne se superposent pas pour une même hauteur. En effet, les rayons dynamiques sont supérieurs de quelques centimètres aux rayons thermiques. La forme elliptique du panache est plus marquée pour les champs de vitesse (le rayon a est plus grand d'une dizaine de cm) et la vitesse au centre (de l'ordre de 0,8 à 0,9 m/s) croit légèrement puis devient constante sauf dans le cas 3 sources rectangulaires.
Dans le but de vérifier les modèles théoriques de la source ponctuelle et de la source linéaire pour les différents cas étudiés, les résultats expérimentaux nous ont amené à la conclusion suivante : à partir d'une source présentant un rapport d'aspect (Longueur/largeur) inférieur à 3, le modèle de la source ponctuelle peut s'appliquer. Par conséquent, le modèle de la source linéaire est applicable pour des sources rectangulaires de rapport d'aspect (Longueur/largeur) supérieur à 3.
Une étude sur la zone de transition où le panache passe d'un comportement de source linéaire à un comportement de source ponctuelle à été réalisée. D'après nos essais expérimentaux, cette zone de transition se situe lorsque le rapport d'aspect est compris entre 2 et 3. Pour étudier cette zone, nous avons choisi deux cas avec trois sources dont la distribution de température n'est pas homogène. La source centrale est à 350°C dans les deux cas et les sources extérieures sont à 85°C puis à 150°C. Nous avons comparé ces deux cas au cas 3 sources où la température est homogène (T=150°C). Pour les deux premiers cas, le panache obtenu a un comportement de source linéaire et le cas où la température est homogène a un comportement de source ponctuelle. On peut supposer que plus la distribution de température est homogène, plus le rapport d'aspect tend vers 3 et donc vers un cas de source ponctuelle.
Contrairement au cas de la source cylindrique, les origines virtuelles thermiques et dynamiques obtenues à partir de l'évolution des rayons des ellipses en fonction de z pour les 4

configurations de source ne permettent pas d'établir des relations entre la géométrie de la source et la position de l'origine virtuelle. La transition source linéaire/source ponctuelle lorsque le rapport d'aspect évolue entre 2 et 3 explique ceci.

Enfin, nous avons comparé les résultats expérimentaux entre un cas de source cylindrique et un cas de source rectangulaire présentant la même surface de chauffe et la même puissance convectée. La forme du panache obtenue est différente entre les deux cas étudiés. Le panache est parfaitement axisymétrique pour la source cylindrique tandis que le panache est elliptique en zone proche puis devient axisymétrique pour la source rectangulaire. La différence de géométries des deux sources explique ce résultat. Les formes de panaches observées sont identiques à partir de z = 2 m pour les deux sources de géométries différentes. L'axisymétrie observée dans le cas de la source rectangulaire montre qu'à partir de z = 2 m, la forme du panache ne dépend plus de la géométrie de la source, le panache est donc en zone lointaine.

Annexe 1

Justification de l'incertitude sur la mesure de température (0,4°C) et sur la mesure de vitesse (0,02 m/s)

1.1 Introduction

Les incertitudes sur les mesures de température et sur les mesures de vitesse ont été choisies à partir des données d'étalonnage des sondes. De plus, nous avons étudié les fluctuations des mesures de température et de vitesse au cours du temps de manière à consolider le choix de nos incertitudes. Pour ce même objectif, nous avons également réalisé une étude de répétitivité des mesures de température et de vitesse.

1.2 Fluctuation temporelle

Nous avons mesuré les températures et les vitesses pour le cas 1 source rectangulaire pendant une période de 60 minutes pour z = 3 m puis nous avons échantillonné les mesures sur les périodes de temps suivantes : 1, 3, 5, 10, 30 et 60 minutes pour étudier les fluctuations. Voici les résultats des fluctuations de température et de vitesse entre les mesures moyennées à 10 min (temps de référence pour tous les essais expérimentaux) et celles à 60 min pour chaque thermocouple et chaque sonde de vitesse :

- *Température*

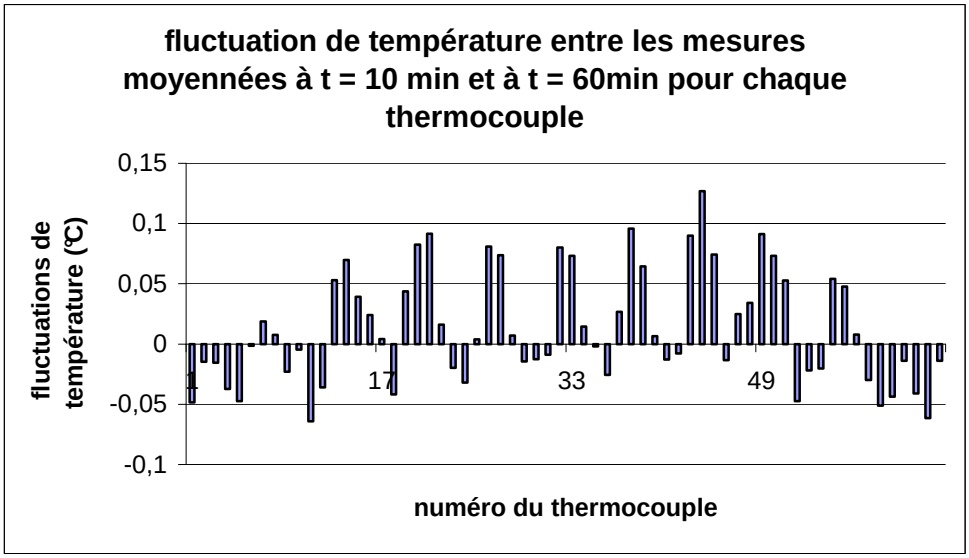


figure 1 : fluctuation de température entre les mesures moyennées à t = 10 min et à t = 60 min pour chaque thermocouple

- *Vitesse*

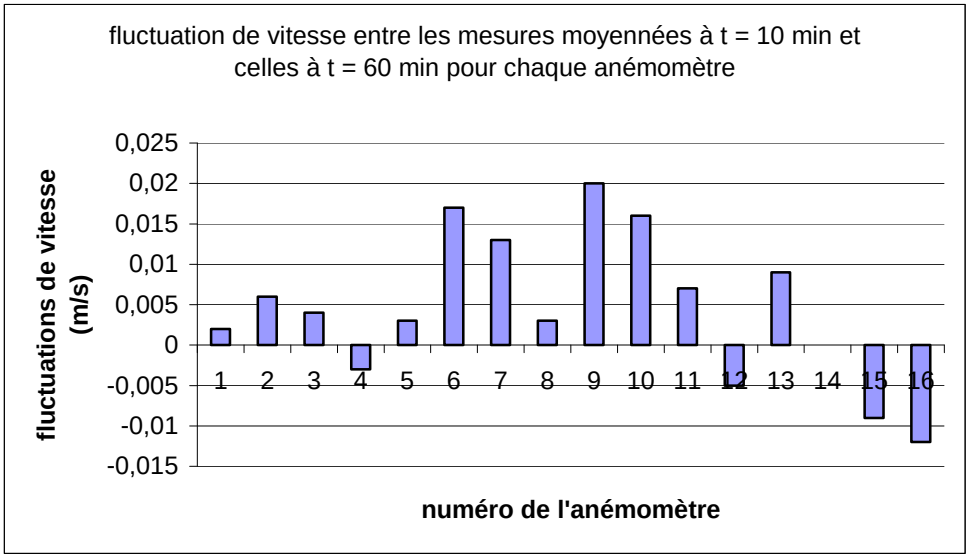


figure 2 : fluctuation de vitesse entre les mesures moyennées à t = 10 min et à t = 60 min pour chaque sonde de vitesse

Les figures 1 et 2 illustrent respectivement la différence obtenue entre les mesures de température et de vitesse moyennées à t = 60 min et celles à t = 10 min pour chaque thermocouple et chaque sonde de vitesse obtenues. D'après ces courbes, l'incertitude sur la mesure de température choisie est surestimée et celle de la vitesse est confirmée. En effet, d'après ces courbes, la fluctuation maximale de température est de 0,12°C et celle de vitesse est de 0,02 m/s.

1.3 Répétitivité des mesures

Dans cette partie, nous testons la répétitivité des mesures de température et de vitesse pour le cas une source rectangulaire à z = 1,75 m et à z = 3 m. L'objectif est également d'observer si les différences de température et de vitesse qui existent entre les deux expériences faites dans les mêmes conditions expérimentales mais à un instant différent confirment le choix des incertitudes sur la mesure de température (0,4°C) et de vitesse (0,02 m/s).

- *Température*

Les figures 4 et 5 illustrent la différence de température qui existe entre chaque thermocouple pour deux séries de mesures faites à des instants différents à z = 1,75 m et z = 3 m.

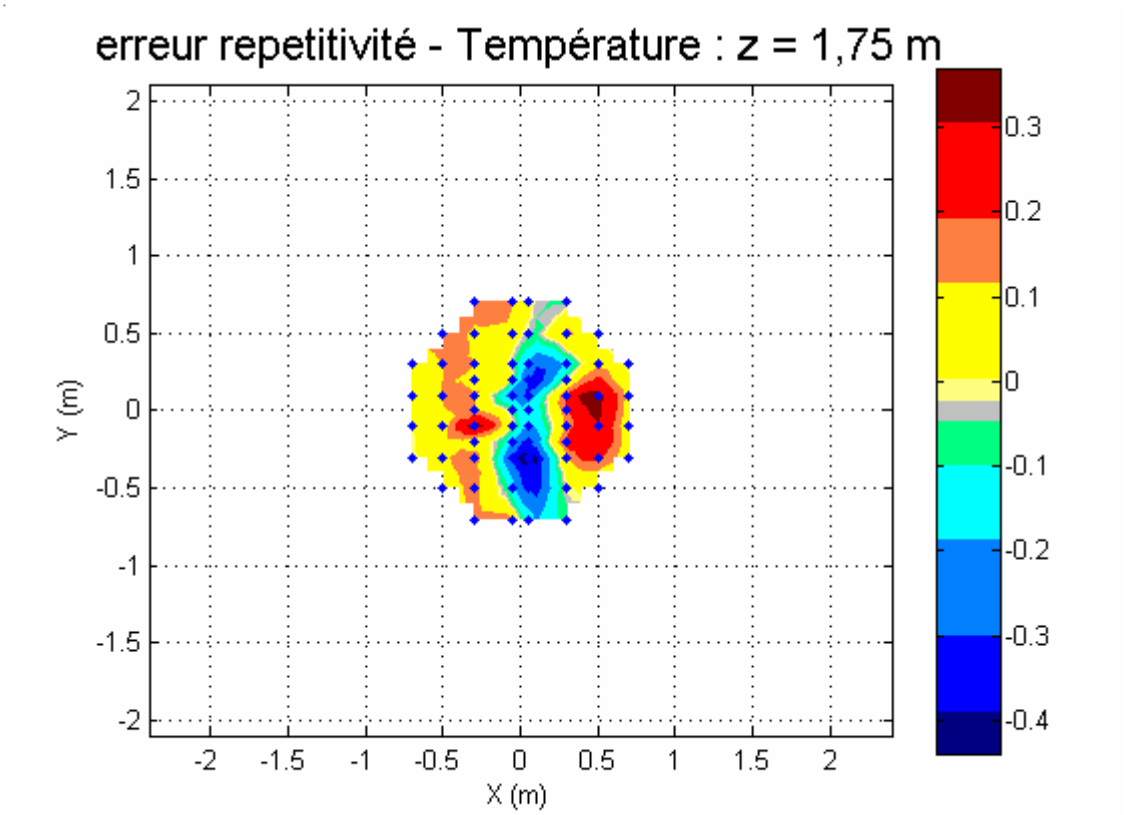


figure 4 : différence de température entre deux séries de mesures à z = 1,75 m – 1 source

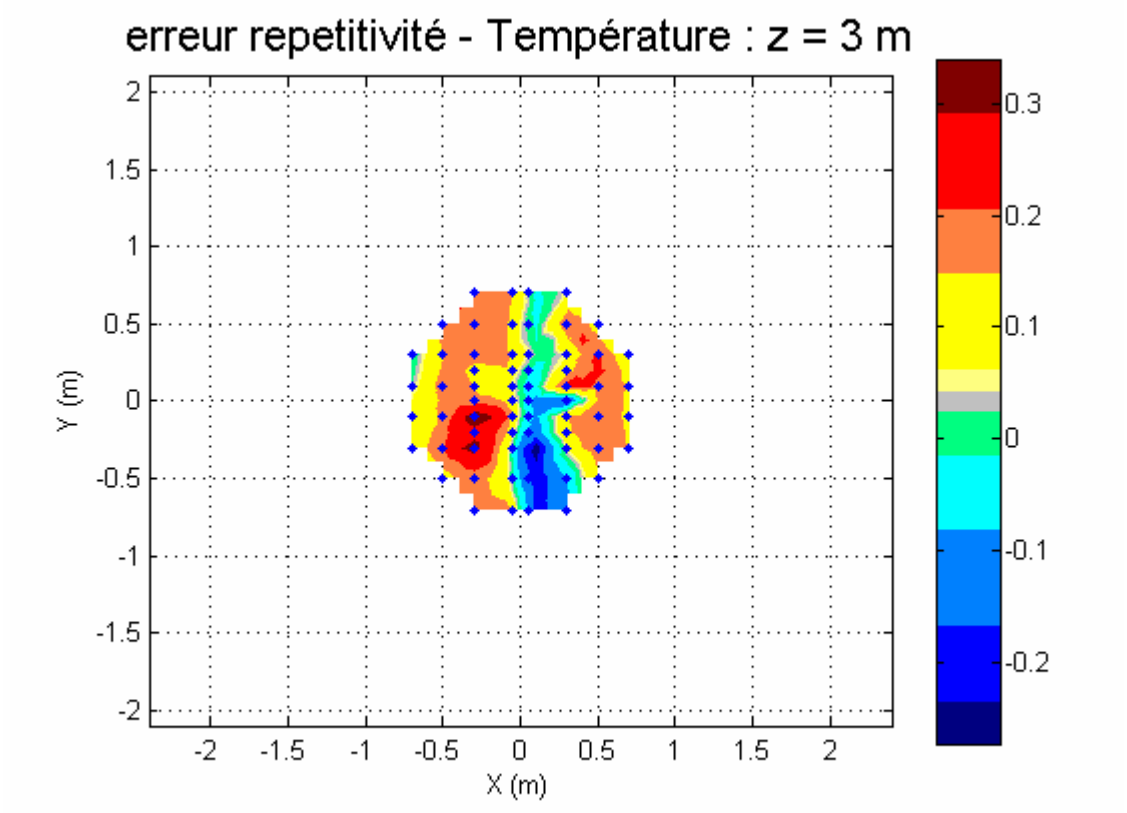


figure 5 : différence de température entre deux séries de mesures à z = 3 m – 1 source

D'après ces figures, on peut observer que les différences de température entre les deux séries de mesure sont au maximum égales à environ 0,4°C. Donc, ces résultats confirment le choix des incertitudes sur les mesures de température (0,4°C).

- *Vitesse*

Les figures 6 et 7 illustrent les différences de vitesse qui existent entre chaque sondes pour deux séries de mesures faites à des instants différents à z = 1,75 m et z = 3 m. On peut constater que les différences de vitesse sont faibles (environ 0,02 m/s en moyenne).

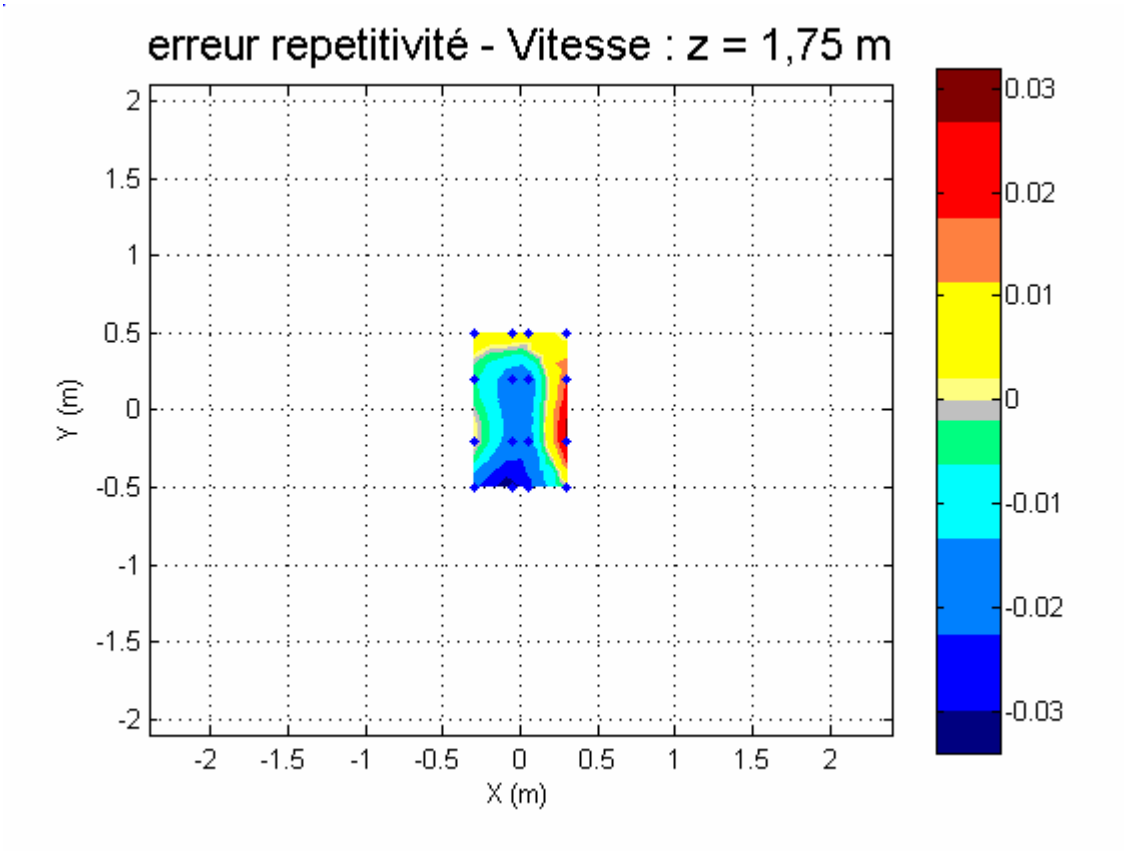


figure 6 : différence de vitesse entre deux séries de mesures à z = 1,75 m – 1 source

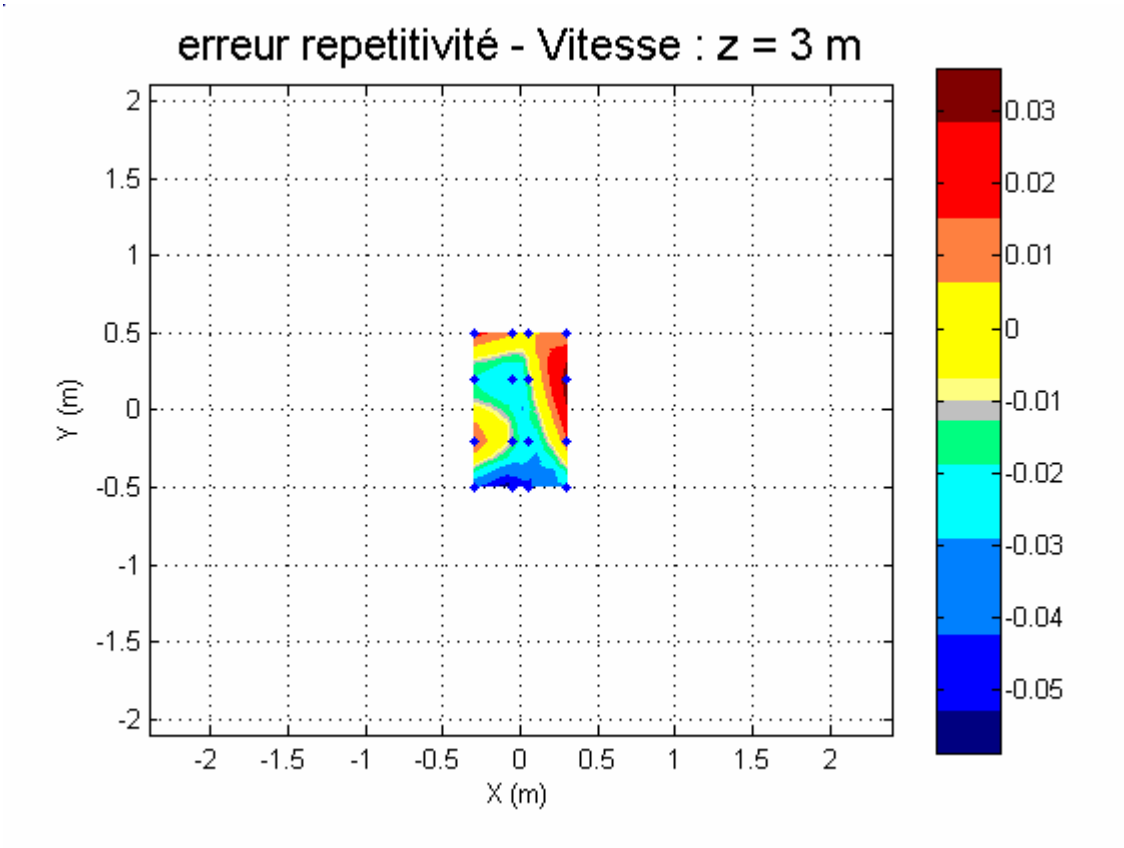


figure 7 : différence de vitesse entre deux séries de mesures à z = 3 m – 1 source

Ces résultats confirment le choix des incertitudes sur les mesures de vitesse (0,02 m/s)

1.4 Conclusion

Les différentes études présentées dans les paragraphes 1.2, 1.3 justifient le choix des incertitudes sur la température (+/-0,4°C) et la vitesse (+/-0,02 m/s). L'étude sur la fluctuation temporelle surestime le choix de l'incertitude sur la mesure de température et confirme celui de la vitesse. En effet, d'après les courbes obtenues, la fluctuation maximale de température est de 0,12°C et celle de vitesse est de 0,02 m/s. D'après les résultats de l'étude de répétitivité, on peut conclure que l'expérience est répétitive dans le temps. Les différences de vitesse entre les deux séries de mesures confirment le choix des incertitudes sur les mesures de vitesse (0,02 m/s) et sur les mesures de température (+/- 0,4°C).

Bibliographie

[1] Batchelor G.K., "Heat convection and buoyancy effects in fluids", QJRMS, 80, 339-358, 1954.

[2] Taylor S.R., "Dynamics of a mass of hot gas rising in air", US. Atomic Energy Commission MDDC 919, LDAC 276, 1945.

[3] Skåret E., "Ventilasjonsteknikk", Inst. Of Heating, Ventilation and Sanitary Techniques, NTH, Trondheim, 1986. Textbook (Norwegian).

[4] Skistad H., "Displacement Ventilation", England, Research Studies Press Ltd., 1994.

[5] Mundt E., "The performance of displacement ventilation systems : experimental and theoretical studies", Report for BFR project # 92099337-0 Building Services Engineering Royal Institute of Technology S-100 44 Stockholm, Sweden, 1996.

[6] Rouse H., Yih C.S., Humphreys H.W., "Gravitationnal convection from a boundary source", Tellus, 4, 201-210, 1952.

[7] Nakagome H., Hirata M., " The structure of turbulent diffusion in an axisymmetrical plume", Proc. ICHMT, Vol. 1-2, Dubrovnik, 1976.

[8] George W. K., Alpert R. L., Tamini F., "Turbulence measurements in an axisymmetric plume", Int. J. Heat mass transfer, vol. 20, 1145-1154, 1977.

[9] Papanicolaou P.N., List E.J., "Investigations of round vertical turbulent buoyant jets", J. Fluid Mech., Vol. 195, 341-391, 1988.

[10] Kofoed P., Nielsen P.V., " Thermal plumes in ventilated rooms: measurement in stratified surroundings and analysis by use of an extrapolation method", Proc. Building Similation'97, Vol. 1, 233-239, 1990.

[11] Auban O., « Approche Expérimentale de la Ventilation Par Déplacement », Thèse de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2000.

[12] Morton R.B., Taylor J., Turner J.S., "Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources", Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 234, 1-23, 1956.

[13] Jaluria Y., Ggebhart B., "On transition mechanisms in natural vertical convection flow", J. Fluid Mech., Vol. 66, part 2, 309-337, 1974.

[14] Jaluria Y., Ggebhart B., "Stability and transition of buoyancy-induced flows in a stratified fluid", J. Fluid Mech., Vol. 66, part 3, 593-612, 1974.

[15] Jaluria Y., Ggebhart B., "On the buoyancy-induced flow arising from a heated hemisphere", Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 18, 415-431, 1975.

[16] Nielsen P.V., "Displacement ventilation: theory and design", Dep. of building technology and structural engineering, Aalborg University, Denmark, 1993.

[17] Hunt G.R, Kaye N.G, "Virtual origin correction for lazy turbulent plumes", J. Fluid Mech, Vol 435, 2001.

[18] Manfred Bender, "Fume hoods, open canopy type – their ability to capture pollutants in various environments", American Industrial Hygiene Association Journal, 118-127, 1979.

[19] Baines W.D, Turner J.S, "Turbulent buyoant convection from a source in a confined region", J.Fluids Mech, Vol 37, 15-18, 1969.

[20] Baines W.D, "A technique for the direct measurement of the volume flux of a plume", J.Fluid Mech, Vol 132, 247-256, 1982.

[21] Manzoni D., Rongère F.X., "Simplified models of displacement ventilation systems", Proc. Roomvent'96, 1996.

[22] Manzoni D., Guitton P., "Models use for displacement ventilation systems design", Proc. Ventilation'97, 1997.
[23] Pinard S., Tuhault J.L., Blay D., "Etude expérimentale d'un système de climatisation par déplacement", Proc. SFT'98, 5-7 mai, Marseille, 1998.
[24] Nielsen P.V., "Temperature distribution in a displacement ventilated room", Proc. Roomvent'96, Yokohama, Japan, 323-330, 1996.
[25] Sandberg M., Lindstrom S., "A model for ventilation by displacement", Proc. Roomvent'87, Stockholm, 1987.
[26] Sandberg M., Lindstrom S., "Stratified flow in ventilated rooms: a model study", Proc. Roomvent'90, Oslo, 1990.
[27] Sandberg M., Mattssom M., "The effect of moving heat sources upon the stratification in rooms ventilated by displacement ventilation", Proc. Roomvent'92, Aalborg, 1992.
[28] Chen Z.D., Li Y., Mahoney J., "Experimental modeling of buoyancy-driven flows in buildings using a fine-bubble technique", Building and Environment n°36, 447-455, 2001.
[29] Chen Z.D., Li Y., Mahoney J., "Natural ventilation in an enclosure induced by a heat source distributed uniformly over a vertical wall", Building and Environment n°36, 493-501, 2001.
[30] van Berkel J., Rind C.C.M., van Steenhoven A.A., "Thermocline dynamics in thermally stratified store", Int. J. Heat mass transfer, vol. 45, 343-356, 2002.
[31] Heiselberg P., Sandberg M., "Convection from a slender cylinder in a ventilated room", Proc. Roomvent'90, 1990.
[32] Li Y., Sandberg M., Fuchs L., "Effects of thermal radiation on airflow with dispalcement ventilation: an experimental investigation", Energy and Buildings, Vol.19, 263-274, 1993.
[33] Mierzwinski S., Popiolek Z., Trzeciakiewicz Z., "Experiments on two-zone air flow forming in displacement ventilation", Proc. Roomvent'96, Vol. 3. Yokohama, Japan, 1996.
[34] Manzoni D., Guitton P., "Models use for displacement ventilation systems design", Proc. Ventilation'97, 1997.
[35] Manzoni D., "Ventilation par déplacement: modélisation et analyse mathématique", Thèse de l'Ecole Polytechnique, 1997.
[36] Trzeciakiewicz Z., Popiolek Z., Mierzwinski S., "Displacement ventilation forming at different air flow rates", Proc. The 8th International Conference Indoor Air'99, Edinburgh, Scotland, VIII 8-13, 1999.
[37] Trzeciakiewicz Z., Lipska B., Popiolek Z., Mierzwinski S., "Comparison of experimental and numerical test results of the air flow in a room with displacement ventilation", Proc. Roomvent'2000, Vol. 2, 719-724, 2000.
[38] Xing H., Awbi H.B., "The neutral height in a room with displacement ventilation", Proc. Roomvent'2000, Vol. 2, 783-788, 2000.
[39] Xing H., Awbi H.B., " Measurement and calculation of the neutral height in room with displacement ventilation", Building and Environment n°37, 961-967, 2002.
[40] Linden P. F., Lane-Serff G. F., Smeed D. A., "Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation", J. Fluid Mech., Vol. 212, 309-335, 1990.
[41] Stymne H., Sandberg M., Mattssom M., "Dispersion pattern of contaminants in a displacement ventilated room-implications for demand control", 12th AIVC conference, Ottawa, Canada, 1991.
[42] Auban O., Lemoine F., Vallette P. et Fontaine J.R., "Simulation by solutal convection of a thermal plume in a confined stratified environment : application to displacement ventilation", Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 44, 4679-4691, 2001.

[43] Turner, “The starling plume in neutral surroundings”, J of Fluid Mechanics, 1962.
[44] Colomer J., Boubnov B., Fernando H.J.S., ”Turbulent convection from isolated sources dynamics of atmospheres and oceans”, Vol 30, 125-148, 1999.
[45] Bouzinaoui A. “Panache développé au-dessus d’une source thermique : Stratification du milieu environnant en enceinte ventilée”, Thèse de l’université Henri Poincaré, Nancy 1, 2004.
[46] J.M Horan, D.P Finn, ”CFD reliability issues in the prediction of air flows in naturally ventilated building”, Int. J of Vent., Vol 4, n°3, 2006.
[47] Fontaine et al., “Numerical simulation and experimental validation of a plume flow from a heated disk”, Numerical heat transfer Part A Application, Vol 50, n°7, 645-666, 2006.
[48] R.Bastiaans, C.Rindt, F.Nieuwstadt, A.Van Steenhoven, “Direct and large eddy simulation of the transition of 2 and 3 dimensionnal plane plumes in a confined enclosure”, IJHMT, Vol 43, Issue 13, 2375-2393, july 2000.
[49] M.J Cook, Y.Ji and G.R Hunt, “CFD Modelling of natural ventilation : combined wind and buoyancy forces”, Int. J. of Vent., Vol 1, n°3, 169-179.
[50] Gosse J., “Technical guide to thermal processes”, Cambridge University Press, 1986.

Résumé :

Ce rapport présente l'étude expérimentale du développement d'un panache thermique dans un milieu confiné et ventilé. Cette situation est rencontrée dans les installations de la ventilation par déplacement. Les expériences ont été effectuées dans une cellule d'essai aéraulique d'une surface au sol de 4,8 x 4,2 m^2 et d'une hauteur de 5,6 m. Les sources de chaleur utilisées sont un cylindre de 1 m de diamètre constitué de cinq éléments d'aires identiques (4 surfaces cylindriques identiques superposés et un disque supérieur) et une source rectangulaire composée de 4 modules de dimensions 0,25 x 1,5 m où seule la surface supérieure est chauffée. Les expériences sont conduites par mesure de température et de vitesse et en l'absence de stratification.

Après une large qualification du nouveau système métrologique composé d'un dispositif d'acquisition permettant la mesure simultanée des vitesses par 16 sondes thermoanémométriques et des températures par 64 thermocouples, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus pour la source cylindrique et la source rectangulaire. L'objectif est d'étudier l'influence de la géométrie de la source sur les lois de développement de panache. Ainsi, pour chaque configuration de source, nous étudions et comparons les paramètres suivants : la position et la vitesse au centre du panache, l'écart de température entre le centre du panache et l'extérieur, la forme et le rayon elliptique du panache pour différentes hauteurs au-dessus de la source. Ces paramètres sont obtenus à partir de l'application du modèle gaussien elliptique aux mesures expérimentales de température et de vitesse. De plus, nous comparons également la position de l'origine virtuelle et la valeur du débit du panache pour les différentes configurations de source et nous étudions l'influence de la géométrie de la source sur ces paramètres. Ainsi, nous avons pu établir des lois théoriques qui nous donnent la position de l'origine virtuelle en fonction de la hauteur de chauffe dans le cas de la source cylindrique et de la largeur de la source dans le cas de la source rectangulaire. La valeur de la position de l'origine virtuelle présente un grand intérêt pour le calcul des débits de panaches et le dimensionnement des systèmes de captage.

Les différentes mesures effectuées ont permis également de vérifier les modèles théoriques de la source ponctuelle et de la source linéaire pour les différents cas étudiés.

Un calcul d'erreur sur la mesure de température et de vitesse est présenté pour chaque configuration et nous donne l'erreur sur le rayon elliptique du panache, le débit et la position de l'origine virtuelle.

Mots clefs : panaches, convection naturelle, ventilation par déplacement.