

---

# norme française

**NF ISO 16737****13 Mars 2013**Indice de classement : **P 92-547**

---

**ICS : 13.220.01**

## **Ingénierie de la sécurité incendie — Exigences régissant les équations algébriques — Écoulements au travers d'une ouverture**

E : Fire safety engineering — Requirements governing algebraic equations —  
Vent flows

D : Ingenieurmethoden für die Brandsicherheit — Anforderungen bezüglich  
algebraischer Funktionen — Rauchabzüge

---

### ***Norme française homologuée***

par décision du Directeur Général d'AFNOR.

Remplace la norme homologuée NF ISO 16737, de mai 2008.

---

### ***Correspondance***

Le présent document reproduit intégralement la Norme internationale  
ISO 16737:2012.

---

### ***Résumé***

Le présent document donne des exigences pour l'application d'ensembles de formules algébriques explicites pour le calcul de caractéristiques spécifiques des écoulements au travers d'une ouverture. Il est destiné à être utilisé par les praticiens de la sécurité incendie qui se servent de méthodes de calcul d'ingénierie de la sécurité incendie.

---

### ***Descripteurs***

**Thésaurus International Technique** : ingénierie, sécurité incendie, protection contre l'incendie, risque, évaluation, modèle, description, caractéristique physique, feu, mode opératoire, limite, écoulement, air, fumée, calcul, méthode de calcul, algèbre.

---

### ***Modifications***

Par rapport au document remplacé, révision de la norme internationale.

---

### ***Corrections***

---

## La norme

---

**La norme** est destinée à servir de base dans les relations entre partenaires économiques, scientifiques, techniques et sociaux.

La norme par nature est d'application volontaire. Référencée dans un contrat, elle s'impose aux parties. Une réglementation peut rendre d'application obligatoire tout ou partie d'une norme.

**La norme est un document élaboré par consensus** au sein d'un organisme de normalisation par sollicitation des représentants de toutes les parties intéressées. Son adoption est précédée d'une enquête publique.

La norme fait l'objet d'un examen régulier pour évaluer sa pertinence dans le temps.

Toute norme est réputée en vigueur à partir de la date présente sur la première page.

---

## Pour comprendre les normes

---

L'attention du lecteur est attirée sur les points suivants :

Seules les formes verbales **doit et doivent** sont utilisées pour exprimer une ou des exigences qui doivent être respectées pour se conformer au présent document. Ces exigences peuvent se trouver dans le corps de la norme ou en annexe qualifiée de «normative». Pour les méthodes d'essai, l'utilisation de l'infinitif correspond à une exigence.

Les expressions telles que, **il convient et il est recommandé** sont utilisées pour exprimer une possibilité préférée mais non exigée pour se conformer au présent document. Les formes verbales **peut et peuvent** sont utilisées pour exprimer une suggestion ou un conseil utiles mais non obligatoires, ou une autorisation.

En outre, le présent document peut fournir des renseignements supplémentaires destinés à faciliter la compréhension ou l'utilisation de certains éléments ou à en clarifier l'application, sans énoncer d'exigence à respecter. Ces éléments sont présentés sous forme de **notes ou d'annexes informatives**.

---

## Commission de normalisation

---

Une commission de normalisation réunit, dans un domaine d'activité donné, les expertises nécessaires à l'élaboration des normes françaises et des positions françaises sur les projets de norme européenne ou internationale. Elle peut également préparer des normes expérimentales et des fascicules de documentation.

Si vous souhaitez commenter ce texte, faire des propositions d'évolution ou participer à sa révision, adressez vous à <norminfo@afnor.org>.

La composition de la commission de normalisation qui a élaboré le présent document est donnée ci-après. Lorsqu'un expert représente un organisme différent de son organisme d'appartenance, cette information apparaît sous la forme : organisme d'appartenance (organisme représenté).

---

## Ingénierie de la sécurité incendie

**AFNOR ISI**

### Membres de la commission de normalisation

Président : M GUILLAUME

Secrétariat : M SMERECKI — AFNOR

M	BAL	CERIB
MME	CHAUSSARD	LCPP — LABO CENTRAL PREFECTURE DE POLICE
M	COLINA	ATILH
M	CRAVEUR	ISMANS
M	DHIMA	CSTB
M	DUDOGNON	SAINT GOBAIN ISOVER
M	DUPLANTIER	INERIS
M	FOUILHOX	ROCKWOOL FRANCE SAS
M	FRANÇOIS-BRAZIER	SAINT GOBAIN PAM
M	FRECHET	OLIVIER FRECHET
LCL	GAUDARD	BSPP — BRIGADE SAPEURS POMPIERS PARIS
M	GAUTIER	EDF SEPTEN
M	GENTY	BNPP
MME	GUESDON	RATP
M	GUILLAUME	LNE
M	HENNETON	CTICM — CENTRE TECH IND CONST METALLIQUE
MR	HORVATH	CIMBETON
M	KRUPPA	JK EXPERTISE INCENDIE
M	LAMUTH	CEA-CENTRE DE FONTENAY AUX ROSES
MME	LARIVE	CETU
M	LE MADEC	ROCKWOOL FRANCE SAS
MME	LESTOURNELLE	FILMM
MME	L'HOIR	IRSN
M	MARLAIR	INERIS
CL	MAURER	DEFIFEU
M	MAURIN	SAINT GOBAIN EUROCOUSTIC
M	MILLET	PLASTICSEUROPE
MME	MIMOUNI	LCPP — LABO CENTRAL PREFECTURE DE POLICE
MME	MOREAU	CETU
M	MSIKA	LCPP — LABO CENTRAL PREFECTURE DE POLICE
MME	MULLER	LCPP — LABO CENTRAL PREFECTURE DE POLICE
M	NAZIH	ASTRIUM SAS — ASTRIUM EADS
M	ORAZY	LCPP — LABO CENTRAL PREFECTURE DE POLICE
MR	PARIS	TECHNIP FRANCE
M	PARISSE	PLASTICSEUROPE
MME	RIGOLLET	IRSN
MME	ROBERT	CERIB
M	ROME	EDF SEPTEN
M	RUTMAN	CSTB
M	SCHULTZ	DEFIFEU
M	TÉPHANY	DG SECURITE CIVILE GESTION CRISES
M	ZHAO	CTICM — CENTRE TECH IND CONST METALLIQUE



# Sommaire

Page

<b>Avant-propos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>v</b>
<b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>Références normatives</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b> <b>Termes et définitions</b> .....	<b>1</b>
<b>4</b> <b>Exigences régissant la description de phénomènes physiques</b> .....	<b>2</b>
<b>5</b> <b>Exigences régissant la documentation</b> .....	<b>2</b>
<b>6</b> <b>Exigences régissant les limites</b> .....	<b>2</b>
<b>7</b> <b>Exigences régissant les paramètres d'entrée</b> .....	<b>3</b>
<b>8</b> <b>Exigences régissant le domaine d'applicabilité</b> .....	<b>3</b>
<b>Annexe A (informative) Aspects généraux des écoulements au travers d'une ouverture</b> .....	<b>4</b>
<b>Annexe B (informative) Équations spécifiques pour des écoulements au travers d'une ouverture satisfaisant aux exigences de l'Annexe A</b> .....	<b>10</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>35</b>

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

L'ISO 16737 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 92, *Sécurité au feu*, sous-comité SC 4, *Ingénierie de la sécurité incendie*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 16737:2006), qui a fait l'objet d'une révision technique.

## Introduction

La présente Norme internationale est destinée à être utilisée par les praticiens de la sécurité incendie qui se servent de méthodes de calcul d'ingénierie relatives à la sécurité incendie. Ces praticiens comprennent, par exemple, les ingénieurs en sécurité incendie, les autorités compétentes telles que les fonctionnaires territoriaux compétents, le personnel des services d'incendie, les agents chargés de l'application des codes, les agents chargés de l'élaboration des codes. Il est prévu que les utilisateurs de la présente Norme internationale possèdent une qualification et une compétence appropriées dans le domaine de l'ingénierie de la sécurité incendie. Il est particulièrement important que les utilisateurs comprennent les paramètres pour lesquels des méthodologies particulières peuvent être employées.

Les formules algébriques conformes aux exigences de la présente Norme internationale sont utilisées avec d'autres méthodes de calcul d'ingénierie lors de la conception de la sécurité contre l'incendie. Cette conception est précédée de la détermination d'un contexte, y compris les objectifs devant être atteints en matière de sécurité contre l'incendie, ainsi que de critères de performance lorsqu'un plan expérimental de sécurité incendie est confronté à des scénarios d'incendie de dimensionnement spécifiés. Les méthodes de calcul d'ingénierie sont utilisées pour déterminer si les critères de performance seront satisfaits par une conception donnée et, dans la négative, la manière dont la conception doit être modifiée.

Les calculs d'ingénierie ont notamment pour objet la conception sûre en matière d'incendie des environnements bâtis entièrement neufs, par exemple les bâtiments, les navires ou les véhicules, ainsi que l'évaluation de la sécurité contre l'incendie des environnements bâtis existants.

Les formules algébriques mentionnées dans la présente Norme internationale sont très utiles pour quantifier les conséquences de scénarios d'incendie de dimensionnement. Ces formules sont particulièrement utiles dans la mesure où elles permettent au praticien de déterminer très rapidement la manière dont il convient de modifier un plan expérimental de sécurité incendie pour répondre aux critères de performance, sans perdre de temps à effectuer des calculs numériques détaillés jusqu'à l'étape de documentation de la conception finale. Les domaines dans lesquels des formules algébriques se sont avérées applicables comprennent, par exemple, la détermination du transfert de chaleur, par convection aussi bien que par rayonnement, des panaches de feu, la prédiction des propriétés des écoulements en jet sous plafond régissant les temps de réponse des détecteurs, le calcul du transport de la fumée dans les ouvertures de ventilation et l'analyse des dangers d'un feu dans une enceinte tels que le transport de la fumée et l'embrasement éclair.

Les formules algébriques évoquées dans la présente Norme internationale sont essentielles pour vérifier les résultats de modèles numériques complets qui calculent l'augmentation du débit calorifique et ses conséquences.





# Ingénierie de la sécurité incendie — Exigences régissant les équations algébriques — Écoulements au travers d'une ouverture

## 1 Domaine d'application

**1.1** La présente Norme internationale spécifie des exigences pour l'application d'ensembles de formules algébriques explicites pour le calcul de caractéristiques spécifiques des écoulements au travers d'une ouverture.

**1.2** La présente Norme internationale est une mise en application des exigences générales de niveau élevé pour les calculs relatifs à la dynamique d'un incendie impliquant des systèmes de formules algébriques.

**1.3** La présente Norme internationale est organisée sous forme d'un modèle dans lequel les informations spécifiques relatives aux formules algébriques pour les écoulements au travers d'une ouverture sont fournies pour satisfaire aux types suivants d'exigences générales:

- a) description des phénomènes physiques traités par la méthode de calcul;
- b) documentation de la méthode de calcul et de sa base scientifique;
- c) limites de la méthode de calcul;
- d) paramètres d'entrée de la méthode de calcul;
- e) domaine d'applicabilité de la méthode de calcul.

**NOTE** Des exemples de systèmes d'équations algébriques satisfaisant à toutes les exigences de la présente Norme internationale sont fournis dans des annexes séparées pour chaque type différent de scénario de couche de fumée. Actuellement, il existe deux annexes informatives contenant des informations générales sur les écoulements au travers d'une ouverture et des formules algébriques spécifiques pour les calculs techniques pratiques.

## 2 Références normatives

Les documents ci-après, dans leur intégralité ou non, sont des références normatives indispensables à l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence (y compris les éventuels amendements) s'applique.

ISO 13943, *Sécurité au feu — Vocabulaire*

ISO 16730, *Ingénierie de la sécurité incendie — Évaluation, vérification et validation des méthodes de calcul*

ISO 5725 (toutes les parties), *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure*

## 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 13943 s'appliquent. Voir chaque annexe pour les termes et définitions spécifiques à cette annexe.

## **4 Exigences régissant la description de phénomènes physiques**

**4.1** L'écoulement flottant au travers d'une ouverture généré par un feu source dans une enceinte ayant une ou plusieurs ouvertures est un phénomène thermophysique complexe qui peut être extrêmement transitoire ou quasi stationnaire. Les écoulements au travers d'une ouverture peuvent comprendre des zones impliquées dans la combustion avec flamme et des zones où il ne se produit pas de combustion. Outre la flottabilité, les écoulements au travers d'une ouverture peuvent être influencés par des forces dynamiques dues au vent extérieur ou à des ventilateurs mécaniques.

**4.2** Les types généraux de conditions aux limites de débit et les autres éléments du scénario auxquels l'analyse est applicable doivent être décrits à l'aide de schémas.

**4.3** Les caractéristiques des écoulements au travers d'une ouverture devant être calculées et leurs domaines d'utilité doivent être clairement identifiés, y compris les caractéristiques déduites par association aux grandeurs calculées.

**4.4** Des éléments de scénarios (par exemple un environnement à deux couches, un mélange uniforme, etc.) auxquels des formules spécifiques s'appliquent doivent être clairement identifiés.

**4.5** Étant donné que différentes formules décrivent différentes caractéristiques d'écoulements au travers d'une ouverture (4.3) ou s'appliquent à différents scénarios (4.4), il doit être démontré que, si plusieurs méthodes permettent de calculer une grandeur donnée, le résultat est indépendant de la méthode utilisée.

## **5 Exigences régissant la documentation**

**5.1** La procédure à suivre pour réaliser les calculs doit être décrite par un ensemble de formules algébriques.

**5.2** Chaque formule doit être présentée dans un paragraphe distinct contenant une phrase pour décrire le résultat de la formule ainsi que des notes explicatives et les limites propres à la formule présentée.

**5.3** Chaque variable de l'ensemble de formules doit être clairement définie, avec les unités SI appropriées, bien que des versions des formules avec des coefficients sans dimension soient préférées.

**5.4** La base scientifique de l'ensemble de formules doit être donnée par référence à des manuels reconnus, à la littérature scientifique évaluée par des pairs ou par des dérivations, selon le cas.

**5.5** Des exemples doivent montrer comment l'ensemble de formules est évalué en utilisant, pour tous les paramètres d'entrée, des valeurs conformes aux exigences spécifiées à l'Article 4.

## **6 Exigences régissant les limites**

**6.1** Les limites quantitatives à l'application directe de l'ensemble de formules algébriques pour calculer les paramètres de sortie, cohérentes avec les scénarios décrits à l'Article 4, doivent être spécifiées.

**6.2** Des avertissements relatifs à l'utilisation de l'ensemble de formules algébriques dans une méthode de calcul plus générale doivent être fournis, ces avertissements devant comprendre un contrôle de la cohérence avec les autres relations utilisées dans la méthode de calcul et les procédures numériques utilisées.

## **7 Exigences régissant les paramètres d'entrée**

**7.1** Les paramètres d'entrée du système d'équations algébriques doivent être clairement définis, comme la température de la couche, la pression et les dimensions géométriques.

**7.2** L'origine des données relatives aux paramètres d'entrée doit être identifiée ou fournie explicitement dans la Norme internationale.

**7.3** Les domaines de validité de chaque paramètre d'entrée doivent être indiqués comme spécifié dans l'ISO 16730.

## **8 Exigences régissant le domaine d'applicabilité**

**8.1** Une ou plusieurs collectes de données mesurées doivent être identifiées pour déterminer le domaine d'applicabilité de l'ensemble de formules. Ces données doivent présenter un niveau de qualité (par exemple répétabilité, reproductibilité — voir l'ISO 5725) évalué par une procédure documentée/normalisée.

**8.2** Le domaine d'applicabilité des équations algébriques doit être déterminé par une comparaison avec les données de mesurage en 8.1.

**8.3** Il faut identifier les sources d'erreur possibles qui limitent le système d'équations algébriques aux scénarios spécifiques indiqués à l'Article 4, par exemple l'hypothèse d'homogénéité d'une ou plusieurs couches de gaz dans l'enceinte.

## **Annexe A** **(informative)**

### **Aspects généraux des écoulements au travers d'une ouverture**

#### **A.1 Termes et définitions utilisés dans la présente annexe**

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 13943 ainsi que les suivants s'appliquent.

##### **A.1.1**

##### **limite physique**

surface qui définit l'étendue d'une enceinte

##### **A.1.2**

##### **plan de référence**

élévation utilisée comme élévation de référence pour l'évaluation des profils de pression hydrostatique

##### **A.1.3**

##### **enceinte**

pièce, espace ou volume limité par des surfaces

##### **A.1.4**

##### **coefficient de débit**

facteur d'efficacité empirique qui tient compte de la différence entre le débit réel et le débit théorique par une ouverture

##### **A.1.5**

##### **pression hydrostatique**

gradient de pression atmosphérique associé à la hauteur

##### **A.1.6**

##### **position de l'interface**

hauteur de la couche de fumée

altitude de l'interface d'une couche de fumée par rapport à une altitude de référence, habituellement la limite inférieure de l'enceinte

##### **A.1.7**

##### **hauteur du plan neutre**

élévation à laquelle la pression à l'intérieur d'une enceinte est la même que la pression à l'extérieur de l'enceinte

##### **A.1.8**

##### **différence de pression**

différence entre la pression à l'intérieur d'une enceinte et à l'extérieur de cette enceinte à une élévation spécifiée

#### **A.1.9**

##### **fumée**

jet de particules solides et liquides et gaz émis dans l'atmosphère lorsqu'un matériau subit une pyrolyse ou une combustion, associé à la quantité d'air qui est entraînée ou mélangée d'une autre manière dans la masse

#### **A.1.10**

##### **couche de fumée**

couche chaude supérieure

couche chaude de gaz

volume de fumée relativement homogène qui se forme et qui s'accumule au-dessous de la limite physique la plus haute dans une enceinte à la suite d'un incendie

#### **A.1.11**

##### **interface de la couche de fumée**

plan horizontal séparant la couche de fumée de la couche inférieure

#### **A.1.12**

##### **ouverture**

ouverture sur la limite d'une enceinte par laquelle l'air et la fumée peuvent s'écouler grâce à des forces induites naturellement ou mécaniquement

#### **A.1.13**

##### **écoulement au travers d'une ouverture**

écoulement de fumée ou d'air par un évent dans la limite physique d'une enceinte

## **A.2 Description des phénomènes physiques abordés par l'ensemble de formules**

### **A.2.1 Domaine d'application**

La présente annexe est destinée à documenter les méthodes générales qui peuvent servir à calculer le à travers une ouverture. L'ensemble de formules repose sur la théorie d'un écoulement à travers un orifice.

### **A.2.2 Description générale de la méthode de calcul**

Les méthodes de calcul permettent le calcul des écoulements au travers d'ouvertures situées sur les limites physiques d'une enceinte résultant de différences de pression qui se produisent entre une enceinte et les espaces adjacents, à cause de leur différence de température. Les différences de pression peuvent également résulter de la dilatation des gaz brûlés, de la ventilation mécanique, du vent ou d'autres forces agissant sur les limites des enceintes et les ouvertures, mais ces forces ne sont pas abordées dans la présente Norme internationale. À partir de la différence de pression au travers d'une ouverture et des températures des enceintes que l'ouverture relie, le débit massique est calculé selon de la théorie de l'écoulement à travers un orifice.

Les propriétés d'une enceinte, comme la hauteur de l'interface de la couche de fumée, la température et d'autres propriétés, sont calculées grâce au principe de conservation de la chaleur et de la masse pour la couche de fumée, comme décrit dans l'ISO 16735.

### A.2.3 Caractéristiques d'un écoulement au travers d'une ouverture à calculer

Les formules donnent le débit massique, le débit d'enthalpie et le débit des espèces chimiques.

## A.3 Symboles et abréviations utilisés dans la présente annexe

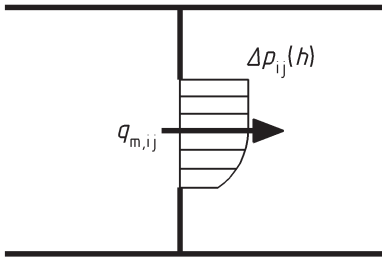
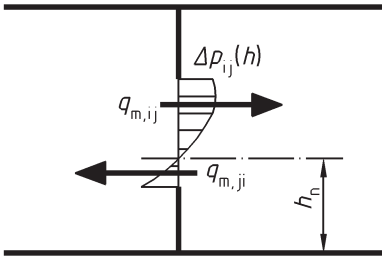
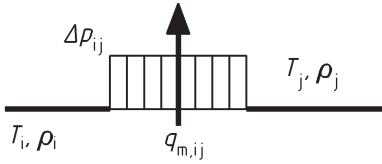
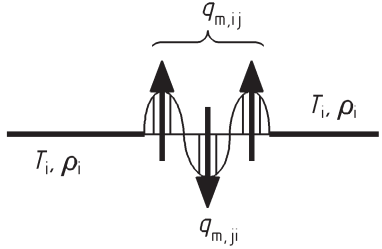
$A$	surface de l'ouverture ( $\text{m}^2$ )
$B$	largeur de l'ouverture (m)
$C_D$	coefficient de débit (-)
$g$	accélération due à la pesanteur ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )
$h_l$	hauteur du bord inférieur de l'ouverture au-dessus du plan de référence (m)
$h_u$	hauteur du bord supérieur de l'ouverture au-dessus du plan de référence (m)
$\max(x_1, x_2)$	maximum de $x_1$ et $x_2$
$q_{m,ij}$	débit massique s'écoulant d'une enceinte $i$ vers une enceinte $j$ ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$q_{m,ji}$	débit massique s'écoulant d'une enceinte $j$ vers une enceinte $i$ ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$p_i(h)$	pression dans l'enceinte $i$ à la hauteur $h$ au-dessus du plan de référence (Pa)
$p_j(h)$	pression dans l'enceinte $j$ à la hauteur $h$ au-dessus du plan de référence (Pa)
$T$	température (K)
$T_0$	température de référence (K)
$v$	vitesse d'écoulement ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$\rho_i$	masse volumique de la fumée (ou de l'air) dans l'enceinte $i$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$\rho_j$	masse volumique de la fumée (ou de l'air) dans l'enceinte $j$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$\rho_0$	masse volumique de la fumée (ou de l'air) à la température de référence ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$\Delta p_{ij}(h)$	différence de pression entre les enceintes $i$ et $j$ à la hauteur $h$ , c'est-à-dire $p_i(h) - p_j(h)$ (Pa)
$\xi$	hauteur utilisée comme variable d'intégration (m)

## A.4 Documentation de l'ensemble de formules

### A.4.1 Liste des ensembles de formules

La vitesse de l'écoulement au travers d'ouvertures est calculée conformément à la théorie d'écoulement par un orifice, d'après l'application de l'équation de Bernoulli. Des méthodes pour calculer les écoulements au travers d'une ouverture sont développées pour les conditions indiquées au Tableau A.1. Dans le cas d'ouvertures verticales et horizontales, l'écoulement peut être unidirectionnel ou bidirectionnel. Pour les ouvertures horizontales, un écoulement bidirectionnel ne se produit que pour des cas particuliers lorsque la différence de pression est faible. Les formules explicites présentées ici s'appliquent à un écoulement à travers des ouvertures verticales et à un écoulement unidirectionnel au travers d'ouvertures horizontales.

Tableau A.1 — Conditions de calcul des écoulements au travers d'une ouverture

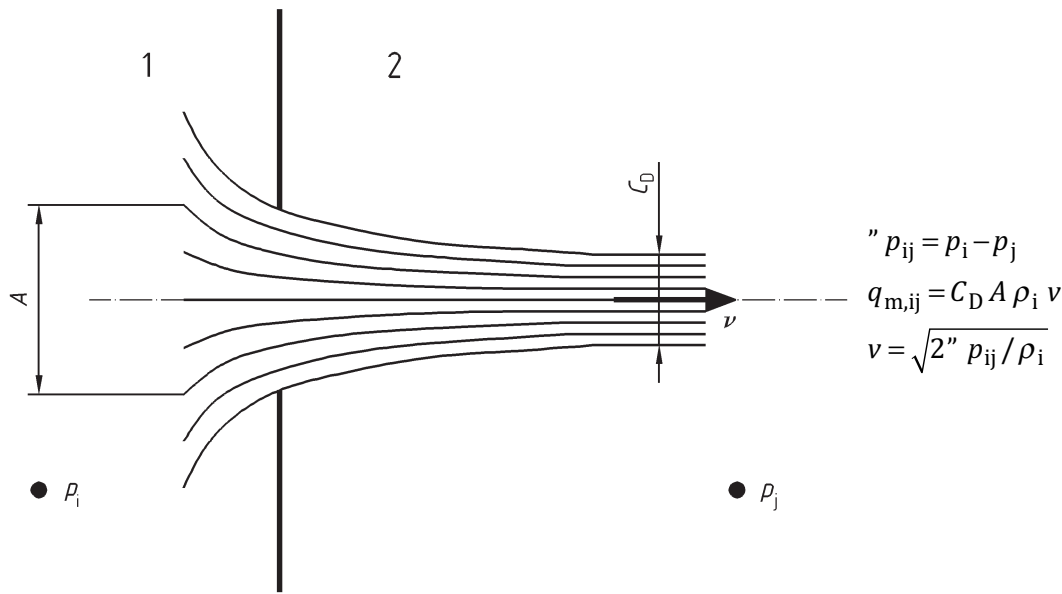
	écoulement unidirectionnel	écoulement bidirectionnel
ouverture verticale		
ouverture horizontale		 <p>L'écoulement est instable. Pas de formule explicite disponible actuellement.</p>

#### A.4.2 Écoulement à travers un orifice — Répartition uniforme de pression sur la surface de l'ouverture

Lorsque la différence de pression est créée par certaines actions comme le vent extérieur ou des ventilateurs mécaniques, l'écoulement au travers d'une ouverture est donné par:

$$q_{m,ij} = C_D A \sqrt{2 \rho_i \Delta p_{ij}} \quad (\text{A.1})$$

où  $\Delta p_{ij} = p_i - p_j$  et où l'hypothèse de départ est que la différence de pression au travers de l'ouverture est uniforme sur toute la surface de l'ouverture, comme indiqué à la Figure A.1:



#### Légende

- 1 enceinte *i*
- 2 enceinte *j*

**Figure A.1 — Ligne de courant et coefficient de perte de charge pour un écoulement isotherme à travers un orifice**

#### A.4.3 Différence de pression hydrostatique

Lorsqu'un profil de température vertical  $T_i(h)$  existe dans une enceinte *i*, comme indiqué à la Figure A.2, la masse volumique  $\rho_i$  à la hauteur *h* au-dessus du plan de référence est calculée par:

$$\rho_i(h) = \frac{\rho_0 T_0}{T_i(h)} \approx \frac{353}{T_i(h)} \quad (\text{A.2})$$

La pression hydrostatique dans l'enceinte *i* est calculée en intégrant la masse volumique sur la hauteur pour donner:

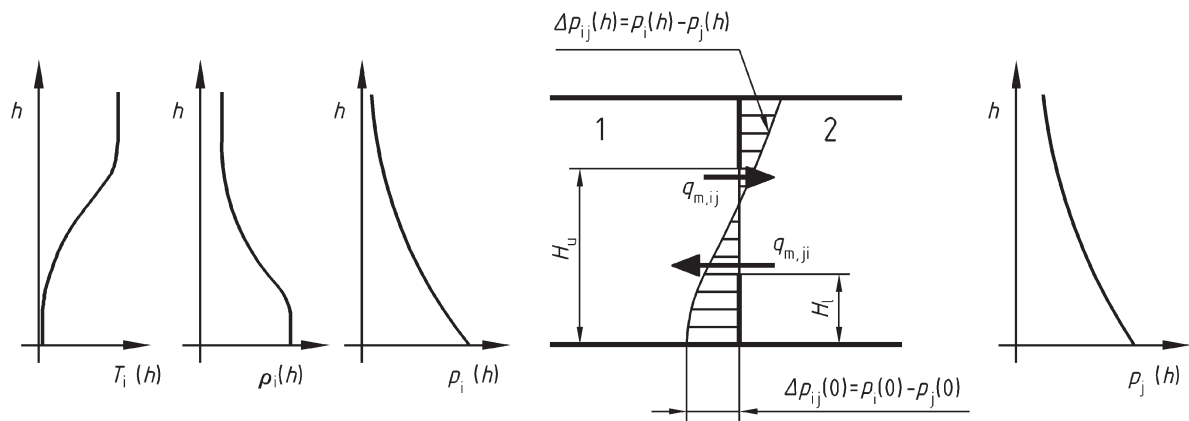
$$p_i(h) = p_i(0) - \int_0^h \rho_i(\zeta) g d\zeta \quad (\text{A.3})$$

La différence de pression hydrostatique entre les enceintes *i* et *j* à la hauteur *h* est:

$$\begin{aligned} \Delta p_{ij}(h) &= p_i(h) - p_j(h) \\ &= \{p_i(0) - p_j(0)\} - \int_0^h \{\rho_i(\zeta) - \rho_j(\zeta)\} g d\zeta \\ &= \Delta p_{ij}(0) - \int_0^h \{\rho_i(\zeta) - \rho_j(\zeta)\} g d\zeta \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

NOTE Pour dériver la Formule (A.2), la fumée est assimilée à un gaz parfait dont les propriétés sont identiques à celles de l'air à la pression atmosphérique normale.





### Légende

- 1 enceinte *i*
- 2 enceinte *j*

Figure A.2 — Différentiel de pression hydrostatique entre deux enceintes adjacentes

### A.4.4 Équation de l'écoulement général — écoulement au travers d'une ouverture verticale avec différence de pression

Lorsque la différence de pression au travers de l'ouverture n'est pas uniforme sur la surface de l'ouverture, l'écoulement au travers de l'ouverture est calculé en appliquant la théorie de l'écoulement par un orifice à chaque partie de l'ouverture, comme indiqué à la Figure A.2. Compte tenu de la différence de pression hydrostatique de la Formule (A.4), les débits massiques entre les enceintes sont calculés par:

$$q_{m,ij} = C_D B \int_{h_l}^{h_u} \sqrt{2\rho_i(\zeta) \max(p_{ij}(\zeta), 0)} d\zeta \quad (A.5)$$

$$q_{m,ij} = C_D B \int_{h_l}^{h_u} \sqrt{2\rho_i(\zeta) \max(-p_{ij}(\zeta), 0)} d\zeta \quad (A.6)$$

## Annexe B (informative)

### Équations spécifiques pour des écoulements au travers d'une ouverture satisfaisant aux exigences de l'Annexe A

#### B.1 Description des phénomènes physiques abordés par l'ensemble de formules

##### B.1.1 Généralités

Les formules données dans la présente annexe permettent de calculer le débit massique de la fumée par une ouverture. D'autres méthodes peuvent être utilisées pour calculer ces grandeurs, à condition qu'elles aient été validées et vérifiées pour la plage de conditions à laquelle elles sont appliquées.

##### B.1.2 Éléments de scénario auxquels l'ensemble de formules est applicable

L'ensemble de formules s'appliquent aux écoulements au travers d'une ouverture gouvernés par les forces de flottabilité sous l'effet du feu. Les effets de pression dynamique, comme le vent, ne sont pas pris en compte. Des méthodes permettant de calculer les conditions d'écoulement au travers d'une ouverture sont développées pour deux profils de température: l'un est un profil de température uniforme alors que l'autre est un profil à deux couches, tel que calculé par l'ISO 16735. Les conditions de calcul sont résumées au Tableau B.1.

**Tableau B.1 — Formules de calcul des écoulements au travers d'une ouverture**

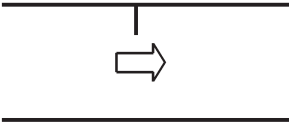
Profil de température	Disposition de la ou des ouvertures	Configurations d'écoulement	Para- graphe
Uniforme	Une seule ouverture		B.3.1

Tableau B.1 (suite)

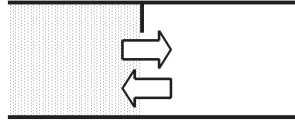
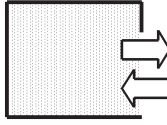
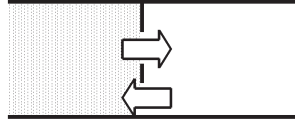
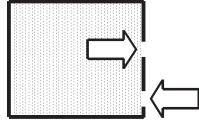
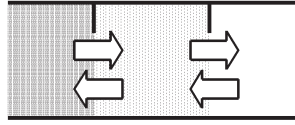
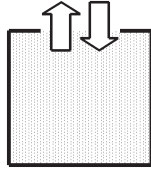
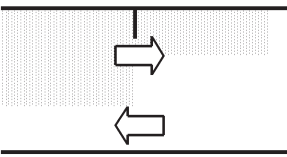
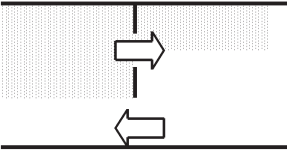
Profil de température	Disposition de la ou des ouvertures	Configurations d'écoulement	Paragraphe
Une seule couche	Une seule ouverture verticale (cas général, l'écoulement peut être unidirectionnel ou bidirectionnel)		B.3.2
	Une seule ouverture verticale (cas particulier, l'écoulement est bidirectionnel)		B.3.3
	Ouvertures verticales multiples (cas général, l'écoulement peut être unidirectionnel ou bidirectionnel)		B.3.4
	Ouvertures verticales multiples (cas particulier de deux petites ouvertures verticales dans un enceinte, l'écoulement est bidirectionnel)		B.3.5
	Ouvertures verticales multiples en série (Combinaison de plusieurs ouvertures verticales en une seule ouverture équivalente)		B.3.6
	Une seule ouverture horizontale (écoulement bidirectionnel non permanent)		B.3.7

Tableau B.1 (suite)

Profil de température	Disposition de la ou des ouvertures	Configurations d'écoulement	Para- graphe
Deux couches	Une seule ouverture verticale (cas général, l'écoulement peut être unidirectionnel ou bidirectionnel)		B.3.8
	Ouvertures verticales multiples (cas général, l'écoulement peut être unidirectionnel ou bidirectionnel)		B.3.9

### B.1.3 Caractéristiques de l'écoulement au travers d'une ouverture à calculer

Les formules donnent les débits massiques de la fumée et de l'air au travers d'une ouverture.

### B.1.4 Conditions d'écoulement au travers d'une ouverture auxquelles ces formules s'appliquent

Les formules explicites donnent le débit de fumée au travers d'ouvertures verticales et horizontales dans des conditions spécifiées.

### B.1.5 Cohérence interne de l'ensemble de formules

L'ensemble de formules est développé de façon cohérente.

### B.1.6 Normes et autres documents où l'ensemble de formules est utilisé

ISO 16735:2006, *Ingénierie de la sécurité incendie — Exigences régissant les équations algébriques — Couches de fumée*

## B.2 Symboles et abréviations utilisés dans l'Annexe B

Outre les symboles et abréviations utilisés dans l'Annexe A, les termes suivants sont utilisés dans la présente annexe.

$\text{abs}(x)$	valeur absolue de $x$
$A_{ij}$	surface de l'ouverture qui relie les enceintes $i$ et $j$ ( $\text{m}^2$ )
$B_{ij}$	largeur de l'ouverture entre les enceintes $i$ et $j$ (m)
$c_p$	chaleur spécifique de l'air et de la fumée ( $\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$h$	hauteur au-dessus du plan de référence (m)
$h_m$	hauteur de la base du segment du milieu au-dessus du plan de référence dans le cas d'une configuration à deux couches (m)
$h_n$	hauteur du plan neutre par rapport au plan de référence (m)

$h_t$	hauteur de la base du segment supérieur au-dessus du plan de référence dans le cas d'une configuration à deux couches (m)
$\dot{H}'_{ij}$	flux d'enthalpie de l'enceinte $i$ vers l'enceinte $j$ (kW)
$\min(x_1, x_2)$	minimum de $x_1$ et $x_2$
$\dot{q}'_{m,ij}$	flux de masse d'espèces chimiques de l'enceinte $i$ vers l'enceinte $j$ (kg s <sup>-1</sup> )
$T_i$	température de l'enceinte $i$ (K)
$T_j$	température de l'enceinte $j$ (K)
$T_{a,i}$	température de la couche d'air dans l'enceinte $i$ (K)
$T_{a,j}$	température de la couche d'air dans l'enceinte $j$ (K)
$T_{s,i}$	température de la couche de fumée dans l'enceinte $i$ (K)
$T_{s,j}$	température de la couche de fumée dans l'enceinte $j$ (K)
$w_i$	concentration d'espèces chimiques dans l'enceinte $i$ (kg kg <sup>-1</sup> )
$\rho_{a,i}$	masse volumique de la couche d'air dans l'enceinte $i$ (kg m <sup>-3</sup> )
$\rho_{a,j}$	masse volumique de la couche d'air dans l'enceinte $j$ (kg m <sup>-3</sup> )
$\rho_{s,i}$	masse volumique de la couche de fumée dans l'enceinte $i$ (kg m <sup>-3</sup> )
$\rho_{s,j}$	masse volumique de la couche de fumée dans l'enceinte $j$ (kg m <sup>-3</sup> )

### B.3 Documentation de l'ensemble de formules

#### B.3.1 Écoulement au travers d'une ouverture reliant deux enceintes de température uniforme et identique

Lorsqu'une différence de pression,  $\Delta p_{ij}$ , est imposée au travers d'une ouverture avec un profil de température uniforme dans les deux volumes, tel que représenté à la Figure B.1, le débit massique est calculé par:

$$\dot{q}_{m,ij} = C_D A_{ij} \sqrt{2 \rho'' p_{ij}} \quad (\text{B.1})$$

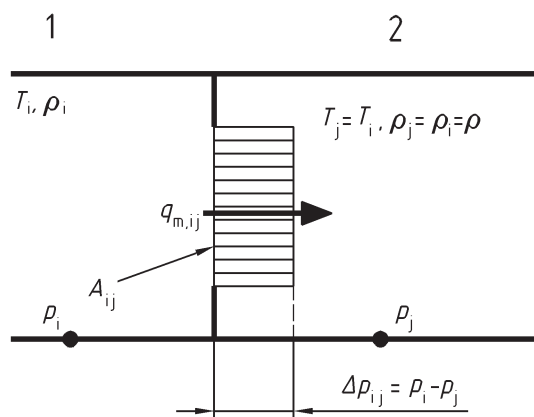
$$\Delta p_{ij} = p_i - p_j \quad (\text{B.2})$$

Les débits d'enthalpie et d'espèces chimiques sont calculés à l'aide du débit massique:

$$\dot{H}'_{ij} = c_p (T_i - T_0) \dot{q}_{m,ij} \quad (\text{B.3})$$

$$\dot{q}'_{m,ij} = w_i \dot{q}_{m,ij} \quad (\text{B.4})$$

NOTE Les formules pour les débits d'enthalpie et d'espèces chimiques ne sont pas répétées dans les paragraphes suivants, mais les Formules (B.3) et (B.4) s'appliquent à tous les cas de la présente annexe.



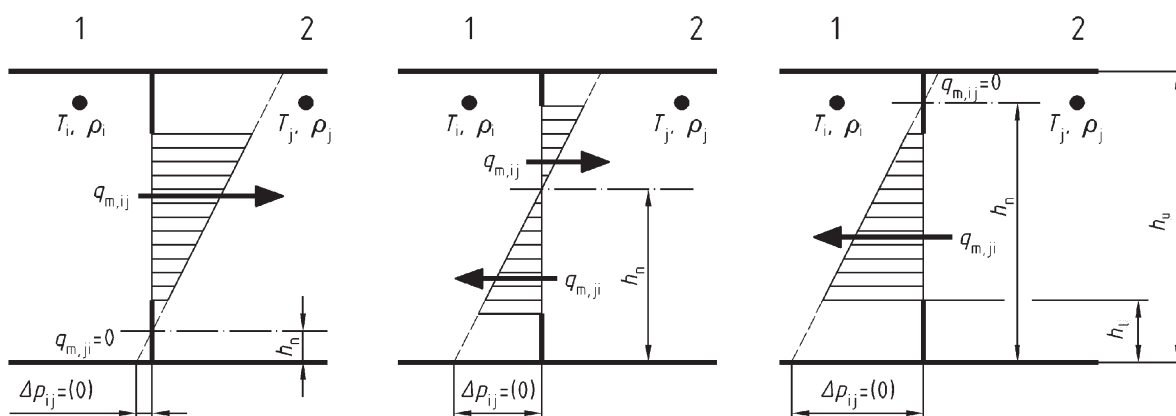
### Légende

- 1 enceinte  $i$
- 2 enceinte  $j$

**Figure B.1 — Différence de pression au travers d'une ouverture verticale et direction correspondante de l'écoulement dans le cas où la température est uniforme**

### B.3.2 Écoulement au travers d'une seule ouverture verticale reliant deux enceintes de températures uniformes, mais différentes — Cas général

Comme indiqué à la Figure B.1, les configurations d'écoulement sont classées selon la position du plan neutre. Lorsque le plan neutre se situe au-dessous du bord inférieur de l'ouverture, l'écoulement est unidirectionnel depuis l'enceinte  $i$  vers  $j$ . Lorsque le plan neutre se situe dans la plage de la hauteur d'ouverture, l'écoulement est bidirectionnel. Lorsque le plan neutre se situe au-dessus du bord supérieur de l'ouverture, l'écoulement est unidirectionnel depuis l'enceinte  $j$  vers  $i$  [1],[2]. La hauteur du plan neutre est donnée par (B.7). Les formules pour les débits massiques,  $q_{m,ij}$ ,  $q_{m,ji}$  sont données dans les Formules (B.8) à (B.11). Les résultats donnés par ces formules sont présentés de manière adimensionnée à la Figure B.4.



### Légende

- 1 enceinte  $i$
- 2 enceinte  $j$

**Figure B.2 — Différence de pression au travers d'une ouverture verticale et direction correspondante de l'écoulement ( $\rho_i < \rho_j$ )**

**B.3.2.1 Masses volumiques des enceintes**

$$\rho_i = \frac{353}{T_i} \quad (\text{B.5})$$

$$\rho_j = \frac{353}{T_j} \quad (\text{B.6})$$

**B.3.2.2 Hauteur du plan neutre par rapport au sol**

$$h_n = \frac{\Delta p_{ij}(0)}{(\rho_i - \rho_j)g} \quad (\text{B.7})$$

**B.3.2.3 Débit massique**

Lorsque  $T_i > T_j$  ( $\rho_i < \rho_j$ ),

$$q_{m,ij} = \begin{cases} \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_i(\rho_j - \rho_i)g} \{(h_u - h_n)^{3/2} - (h_l - h_n)^{3/2}\} & (h_n < h_l) \\ \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_i(\rho_j - \rho_i)g} (h_u - h_n)^{3/2} & (h_l \leq h_n < h_u) \\ 0 & (h_u \leq h_n) \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

$$q_{m,ij} = \begin{cases} 0 & (h_n < h_l) \\ \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_j(\rho_j - \rho_i)g} (h_n - h_l)^{3/2} & (h_l \leq h_n < h_u) \\ \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_j(\rho_j - \rho_i)g} \{(h_n - h_l)^{3/2} - (h_n - h_u)^{3/2}\} & (h_u \leq h_n) \end{cases} \quad (\text{B.9})$$

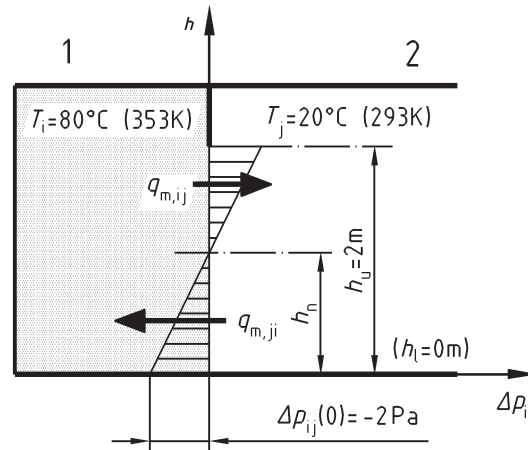
Lorsque  $T_i < T_j$  ( $\rho_i > \rho_j$ ),

$$q_{m,ij} = \begin{cases} 0 & (h_n < h_l) \\ \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_i(\rho_i - \rho_j)g} (h_n - h_l)^{3/2} & (h_l \leq h_n < h_u) \\ \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_i(\rho_i - \rho_j)g} \{(h_n - h_l)^{3/2} - (h_n - h_u)^{3/2}\} & (h_u \leq h_n) \end{cases} \quad (\text{B.10})$$

$$q_{m,ij} = \begin{cases} \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_j(\rho_i - \rho_j)g} \{(h_u - h_n)^{3/2} - (h_l - h_n)^{3/2}\} & (h_n < h_l) \\ \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_j(\rho_i - \rho_j)g} (h_u - h_n)^{3/2} & (h_l \leq h_n < h_u) \\ 0 & (h_u \leq h_n) \end{cases} \quad (\text{B.11})$$

**B.3.2.4 Exemple de calcul**

Le débit par une ouverture de porte (0,9 m de large, 2,0 m de haut) est calculé. Il est supposé que  $T_i$  est de 80 °C (353 K) et que  $T_j$  est de 20 °C (293 K). La pression dans l'enceinte  $j$  est supérieure de 2 Pa à celle dans l'enceinte  $i$  au niveau du sol [ $\Delta p_{ij}(0) = -2$  Pa], comme indiqué à la Figure B.3.



### Légende

- 1 enceinte  $i$
- 2 (enceinte  $j$ )

**Figure B.3 — Débit massique  $T_i = 80^\circ\text{C}$  (353 K),  $T_j = 20^\circ\text{C}$  (293 K),  $B_{ij} = 0,9\text{ m}$ ,  $h_u = 2\text{ m}$ ,  $h_l = 0\text{ m}$ ,  $\Delta p_{ij}(0) = -2\text{ Pa}$**

#### B.3.2.4.1 Masses volumiques des enceintes

En utilisant les Formules (B.5) et (B.6), la masse volumique de la fumée dans chaque enceinte est:

$$\rho_i = \frac{353}{T_i} = \frac{353}{353} = 1,000 \quad (\text{B.12})$$

$$\rho_j = \frac{353}{T_j} = \frac{353}{293} = 1,205 \quad (\text{B.13})$$

#### B.3.2.4.2 Hauteur du plan neutre par rapport au sol

En utilisant la Formule (B.7), la hauteur du plan neutre est:

$$h_n = \frac{\Delta p_{ij}(0)}{(\rho_i - \rho_j)g} = \frac{-2}{(1,0 - 1,205) \times 9,8} = 0,997 \quad (\text{B.14})$$

#### B.3.2.4.3 Débits massiques

Comme la hauteur du plan neutre,  $h_n$ , est comprise entre  $h_u$  et  $h_l$ , l'écoulement est bidirectionnel. En utilisant les Formules (B.8) et (B.9), les débits massiques vers et depuis l'enceinte  $j$  sont calculés comme suit:

$$\begin{aligned} q_{m,ij} &= \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_i(\rho_j - \rho_i)g(h_u - h_n)^{3/2}} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,9 \sqrt{2,0 \times 1,0 \times (1,205 - 1,0) \times 9,8 \times (2,0 - 0,997)^{3/2}} \\ &= 0,846 \end{aligned} \quad (\text{B.15})$$

$$\begin{aligned} q_{m,ji} &= \frac{2}{3} C_D B_{ij} \sqrt{2\rho_j(\rho_j - \rho_i)g(h_n - h_l)^{3/2}} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,9 \sqrt{2,0 \times 1,205 \times (1,205 - 1,00) \times 9,8 \times (0,997 - 0,0)^{3/2}} \\ &= 0,919 \end{aligned} \quad (\text{B.16})$$



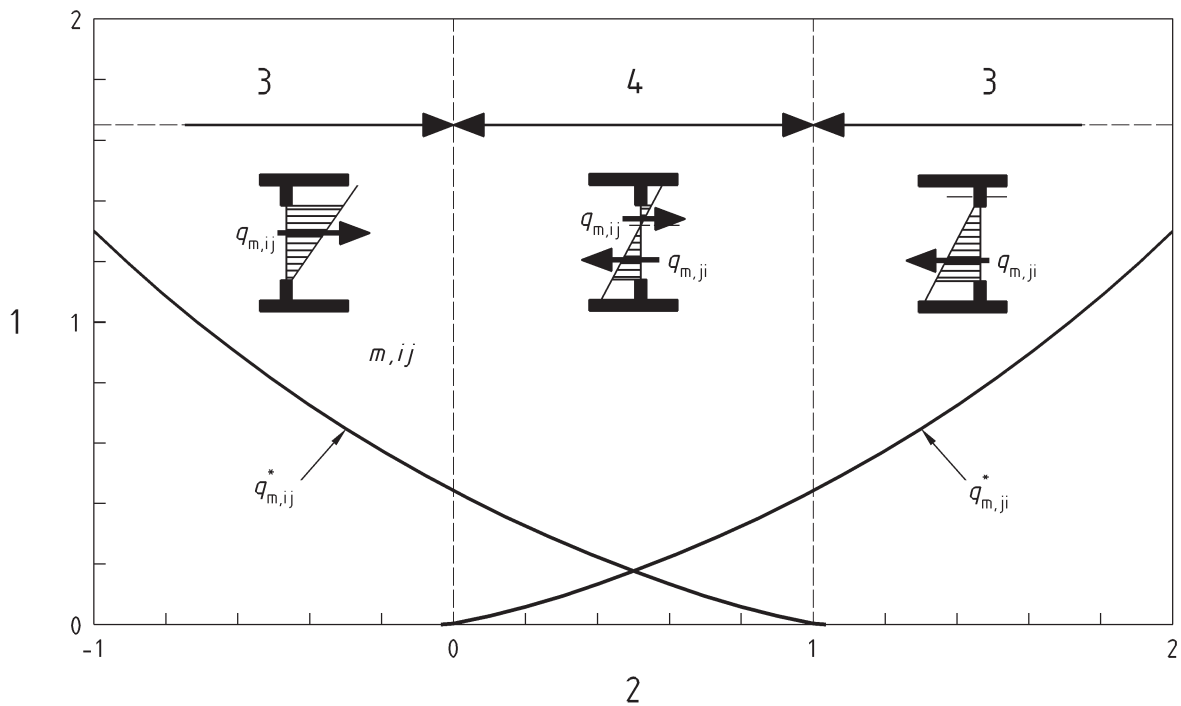
NOTE Comme pour les cas généraux, un diagramme adimensionné est fourni à la Figure B.4. Les débits massiques adimensionnés,

$$q_{m,ij}^* = \frac{q_{m,ij}}{\sqrt{2\rho_i(\rho_j - \rho_i)B_{ij}(h_u - h_l)^{3/2}}} \quad (\text{B.17})$$

$$q_{m,ji}^* = \frac{q_{m,ji}}{\sqrt{2\rho_j(\rho_j - \rho_i)B_{ij}(h_u - h_l)^{3/2}}} \quad (\text{B.18})$$

sont tracés par rapport à la hauteur du plan neutre non dimensionnel.

$$h_n^* = \frac{h_n - h_l}{h_u - h_l} \quad (\text{B.19})$$



#### Légende

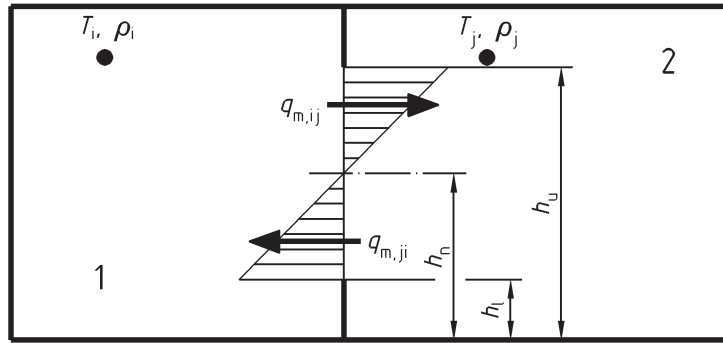
- 1 débit massique non dimensionnel,  $q_m^*$
- 2 hauteur du plan neutre non dimensionnel,  $h_m^*$
- 3 débit unidirectionnel
- 4 débit bidirectionnel

**Figure B.4 — Diagramme non dimensionnel pour le débit massique par une ouverture verticale dans le cas où  $T_i > T_j$**

### B.3.3 Écoulement au travers d'une seule ouverture verticale reliant deux enceintes de températures uniformes, mais différentes — Cas particulier d'une ouverture unique dans une enceinte

#### B.3.3.1 Généralités

Si une enceinte n'a qu'une seule ouverture, comme indiqué à la Figure B.5, le débit massique sortant de l'enceinte,  $q_{m,ij}$ , est égal au débit massique entrant,  $q_{m,ji}$ . Comme cas particulier de B.3.2, le plan neutre,  $h_n$ , est situé de façon que la conservation de la masse soit vérifiée dans l'enceinte  $i$ .



#### Légende

- 1 enceinte  $i$
- 2 enceinte  $j$

**Figure B.5 — Différence de pression au travers d'une seule ouverture verticale et débits correspondants dans le cas où  $T_i > T_j$  ( $\rho_i < \rho_j$ )**

#### B.3.3.2 Hauteur du plan neutre par rapport au sol

$$h_n = \frac{h_u - h_l}{1 + (\rho_j / \rho_i)^{1/3}} + h_l \quad (\text{B.20})$$

#### B.3.3.3 Débit massique

$$q_{m,ij} = \frac{2}{3} C_D \sqrt{2 \rho_i (\rho_j - \rho_i) g} \left( \frac{(\rho_j / \rho_i)^{1/3}}{1 + (\rho_j / \rho_i)^{1/3}} \right)^{3/2} B_{ij} (h_u - h_l)^{3/2} \quad (\text{B.21})$$

$$q_{m,ji} = \frac{2}{3} C_D \sqrt{2 \rho_j (\rho_j - \rho_i) g} \left( \frac{1}{1 + (\rho_j / \rho_i)^{1/3}} \right)^{3/2} B_{ij} (h_u - h_l)^{3/2} \quad (\text{B.22})$$

NOTE 1 Comme les débits sont identiques, le calcul des Formules (B.21) ou (B.22) est suffisant.

NOTE 2 Si la température de l'enceinte,  $T_i$ , est supérieure à 300 °C, le coefficient multipliant  $B_{ij}(h_u - h_l)^{3/2}$  est relativement constant, ce qui aboutit à la relation utile suivante [3]:

$$q_{m,ij} = q_{m,ji} \approx 0,52 B_{ij} (h_u - h_l)^{3/2} \quad (\text{B.23})$$

Le terme  $B_{ij}(h_u - h_l)^{3/2}$  est appelé facteur d'ouverture ( $\text{m}^{5/2}$ ).

### B.3.4 Écoulement au travers d'ouvertures verticales multiples reliant deux enceintes de températures uniformes, mais différentes

#### B.3.4.1 Généralités

Dans les situations pratiques, l'enceinte peut présenter plusieurs ouvertures. Les débits massiques au travers des ouvertures sont calculés comme en B.3.2, mais les Formules (B.7) à (B.11) sont appliquées à chaque ouverture.

#### B.3.4.2 Exemple de calcul

Comme indiqué à la Figure B.6, deux ouvertures relient les enceintes  $i$  et  $j$ . Les dimensions de l'ouverture 1 sont  $B_{ij,1} = 0,9$  m (largeur),  $h_{l,1} = 0,7$  m (hauteur du bord inférieur) et  $h_{u,1} = 1,2$  m (hauteur du bord supérieur). Les dimensions de l'ouverture 2 sont  $B_{ij,2} = 2,0$  m (largeur),  $h_{l,1} = 1,8$  m (hauteur du bord inférieur) et  $h_{u,2} = 4,0$  m (hauteur du bord supérieur). Il est supposé que  $T_i$  est de 80 °C (353 K) et  $T_j$  de 20 °C (293 K). La pression dans l'enceinte  $j$  est supérieure de 5 Pa ( $\Delta p_{ij}(0) = -5$  Pa) à celle dans l'enceinte  $i$  au niveau du sol.

##### B.3.4.2.1 Masses volumiques des deux enceintes

En utilisant les Formules (B.5) et (B.6), les masses volumiques des deux enceintes sont:

$$\rho_i = \frac{353}{T_i} = \frac{353}{353} = 1,000 \quad (\text{B.24})$$

$$\rho_j = \frac{353}{T_j} = \frac{353}{293} = 1,205 \quad (\text{B.25})$$

##### B.3.4.2.2 Hauteur du plan neutre par rapport au sol

En utilisant la Formule (B.7), la hauteur du plan neutre est:

$$h_n = \frac{\Delta p_{ij}(0)}{(\rho_i - \rho_j)g} = \frac{-5}{(1,000 - 1,205) \times 9,8} = 2,491 \quad (\text{B.26})$$

##### B.3.4.2.3 Débits massiques

Les débits massiques sont calculés pour chaque ouverture. Pour l'ouverture 1, le plan neutre est situé au-dessus de la hauteur du bord supérieur de l'ouverture. Par conséquent, l'écoulement est unidirectionnel

de l'enceinte  $j$  vers l'enceinte  $i$ . En appliquant la dernière formule de la Formule (B.9), le débit massique est calculé comme:

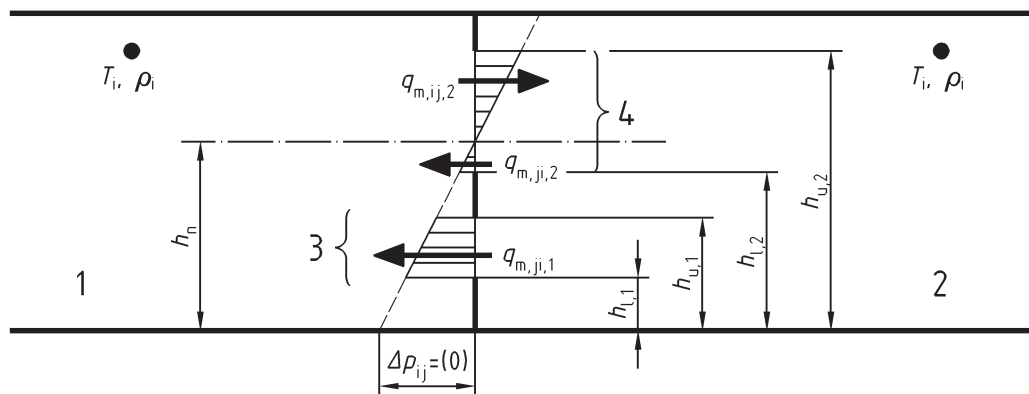
$$\begin{aligned}
q_{m,ij,1} &= \frac{2}{3} C_D B_{ij,1} \sqrt{2 \rho_j (\rho_j - \rho_i) g} \left\{ (h_n - h_{l,1})^{3/2} - (h_n - h_{u,1})^{3/2} \right\} \\
&= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,9 \sqrt{2 \times 1,205 \times (1,205 - 1,00) \times 9,8} \times \left\{ (2,491 - 0,7)^{3/2} - (2,491 - 1,2)^{3/2} \right\} \\
&= 0,859
\end{aligned} \tag{B.27}$$

Pour l'ouverture 2, le plan neutre est situé à l'intérieur de l'ouverture. Par conséquent, l'écoulement est bidirectionnel. En appliquant la deuxième formule de la Formule (B.8), le débit massique de l'enceinte  $i$  vers  $j$  est calculé comme:

$$\begin{aligned} q_{m,ij,2} &= \frac{2}{3} C_D B_{ij,2} \sqrt{2\rho_j(\rho_j - \rho_i)} g(h_{u,2} - h_n) \\ &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 2,0 \sqrt{2 \times 1,000 \times (1,205 - 1,000)} \times 9,8 \times (4,0 - 2,491)^{3/2} \\ &= 3,46 \end{aligned} \quad (B.28)$$

En appliquant la deuxième formule de la Formule (B.9), le débit massique de l'enceinte  $j$  vers  $i$  est calculé comme:

$$\begin{aligned}
q_{\text{mji},2} &= \frac{2}{3} C_D B_{\text{ij},2} \sqrt{2\rho_j(\rho_j - \rho_i)g} (h_n - h_{\text{l},2})^{3/2} \\
&= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 2,0 \sqrt{2 \times 1,205 \times (1,205 - 1,000) \times 9,8 \times (2,491 - 1,8)}^{3/2} \\
&= 1,18
\end{aligned} \tag{B.29}$$



### Légende

- |   |             |
|---|-------------|
| 1 | enceinte i  |
| 2 | enceinte j  |
| 3 | ouverture 1 |
| 4 | ouverture 2 |

**Figure B.6 — Différence de pression au travers de deux ouvertures verticales et direction correspondante de l'écoulement ( $\rho_j < \rho_i$ )**

### B.3.5 Écoulement au travers de multiples ouvertures verticales reliant deux enceintes de températures uniformes, mais différentes — Cas particulier de deux petites ouvertures

#### B.3.5.1 Domaine d'application des formules de calcul

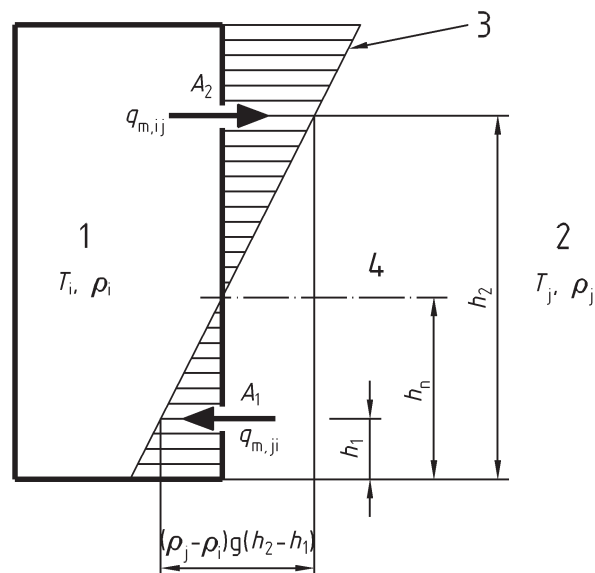
Soit le cas particulier suivant, un puits avec deux petites ouvertures à des hauteurs différentes, comme montré à la Figure B.7. La température intérieure est  $T_i$  et la température extérieure est  $T_j$ . Dans ce cas, la différence de pression entre l'espace intérieur et l'espace extérieur est donnée par:

$$\Delta p_{ij}(h) = (\rho_i - \rho_j)g(h_n - h) \quad (\text{B.30})$$

En régime permanent, la hauteur du plan neutre,  $h_n$ , est située de sorte que les débits massiques entrant et sortant sont équilibrés.

$$h_n = \frac{1}{1 + \frac{\rho_j}{\rho_i} \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2} (h_2 - h_1) + h_1 \quad (\text{B.31})$$

Dans ce cas, les formules générales sont simplifiées en utilisant le concept de section d'écoulement effective.



#### Légende

- 1 puits (enceinte  $i$ )
- 2 extérieur (enceinte  $j$ )
- 3 différence de pression  $\Delta p_{ij}(h)$
- 4 plan neutre

Figure B.7 — Différentiel de pression au travers d'un puits et directions correspondantes de l'écoulement ( $\rho_i < \rho_j$ )

### B.3.5.2 Section d'écoulement effective

La section d'écoulement effective est calculée pour tenir compte de la résistance totale opposée par les deux ouvertures.

$$A_{12} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{A_1}\right)^2 + \frac{\rho_j}{\rho_i} \left(\frac{1}{A_2}\right)^2}} \quad (\text{B.32})$$

### B.3.5.3 Débit massique

En utilisant la section d'écoulement effective, les débits massiques entrant et sortant sont calculés par:

$$q_{m,ij} = q_{m,ji} = C_D A_{12} \sqrt{2\rho_j(\rho_j - \rho_i)g(h_2 - h_1)} \quad (\text{B.33})$$

### B.3.5.4 Exemple de calcul

Les surfaces des ouvertures supérieure et inférieure sont  $A_1 = 1,0 \text{ m}^2$  et  $A_2 = 2,0 \text{ m}^2$ . L'ouverture supérieure est située 20 m au-dessus de l'ouverture inférieure. La température du puits est de 80 °C (353 K) et la température de l'air extérieur est de 20 °C (293 K).

En utilisant les Formules (B.5) et (B.6), les masses volumiques de l'air (ou de la fumée) dans les deux enceintes sont:

$$\rho_i = \frac{353}{T_i} = \frac{353}{353} = 1,000 \quad (\text{B.34})$$

$$\rho_j = \frac{353}{T_j} = \frac{353}{293} = 1,205 \quad (\text{B.35})$$

La section d'écoulement effective est calculée par la Formule (B.32) comme:

$$A_{12} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{A_1}\right)^2 + \frac{\rho_j}{\rho_i} \left(\frac{1}{A_2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{1,0}\right)^2 + \frac{1,205}{1,000} \left(\frac{1}{2,0}\right)^2}} = 0,877 \quad (\text{B.36})$$

Le débit massique est calculé par la Formule (B.33) comme:

$$q_{m,ij} = q_{m,ji} = 0,7 \times 0,877 \sqrt{2 \times 1,205 \times (1,205 - 1,00) \times 9,8 \times 20} = 6,04 \quad (\text{B.37})$$

NOTE Pour des calculs pratiques, le ratio des masses volumiques,  $\rho_j/\rho_i$ , dans la Formule (B.32) peut être considéré comme égal à 1.0. Dans cet exemple,

$$A_{12} \approx \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{A_2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{1}{2,00}\right)^2}} = 0,894 \quad (\text{B.38})$$

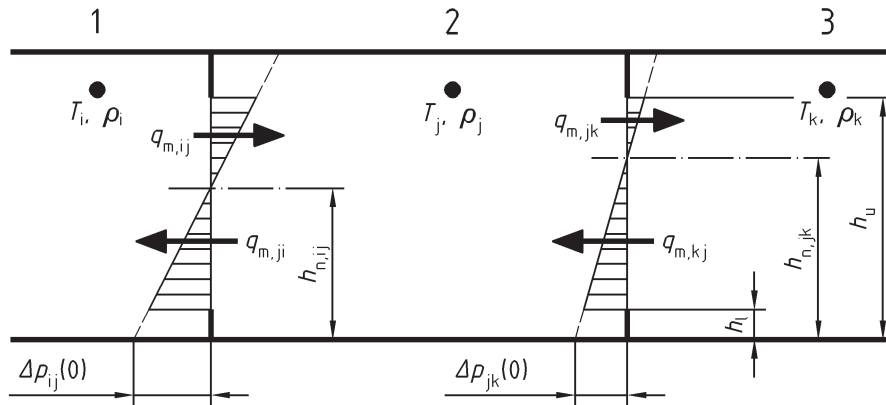
ce qui donne une erreur inférieure à 2 % par rapport à la valeur exacte obtenue par la Formule (B.36).

## B.3.6 Écoulement au travers d'ouvertures multiples en série

### B.3.6.1 Domaine d'application de la formule de calcul

Lors du dimensionnement pratique d'un système de désenfumage, les multiples ouvertures sont combinées en une ouverture unique équivalente de manière à obtenir le même débit massique pour une différence de pression spécifique. Cette approximation est utile pour les calculs dans des environnements bâtis réalistes pouvant comporter plusieurs ouvertures.

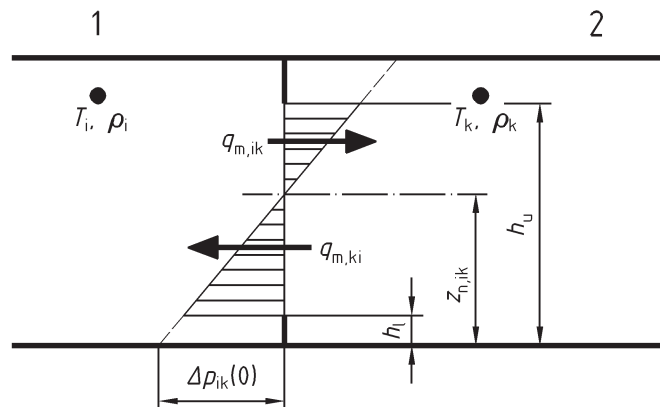
Comme indiqué à la Figure B.8, trois enceintes sont raccordées en série. À partir de la pression des enceintes  $i$  et  $k$ , les débits massiques sont calculés. Les hauteurs des bords supérieurs et inférieurs des ouvertures sont communes aux deux ouvertures, alors que leur largeur peut différer. Les températures des enceintes  $i$  et  $k$  sont uniformes, mais peuvent être différentes. La température dans l'enceinte  $j$  n'est pas nécessaire, car elle n'a pas d'incidence sur les résultats du calcul final.



#### Légende

- 1 enceinte  $i$
- 2 enceinte  $j$
- 3 enceinte  $k$

**Figure B.8 — a Différence de pression au travers de deux ouvertures en série et approximation par une seule ouverture (dans le cas où  $T_i > T_j > T_k$ ): Configuration initiale (Les hauteurs des bords inférieurs et supérieurs  $h_u$  et  $h_l$  sont communes à toutes les ouvertures. Les largeurs des ouvertures  $B_{ij}$  et  $B_{jk}$  peuvent être différentes.)**



#### Légende

- 1 enceinte  $i$
- 2 enceinte  $k$

**Figure B.8 b — Différence de pression au travers de deux ouvertures en série et approximation par une seule ouverture (dans le cas où  $T_i > T_j > T_k$ ): Approximation par une ouverture unique en utilisant la largeur d'écoulement effective**

### B.3.6.2 Largeur d'ouverture effective

Les débits massiques entre les enceintes  $i$  et  $k$  sont calculés à l'aide des Formules de base (B.7) à (B.11) où la largeur de l'ouverture  $B_{ij}$  est remplacée par la largeur effective:

$$B_{ik} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{B_{ij}}\right)^2 + \left(\frac{1}{B_{jk}}\right)^2}} \quad (\text{B.39})$$

NOTE Pour combiner plus de deux ouvertures en série, la formule peut être appliquée de manière récursive:

$$B_{i,j,k,\dots,m,n} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{B_{ij}}\right)^2 + \left(\frac{1}{B_{jk}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{B_{mn}}\right)^2}} \quad (\text{B.40})$$

### B.3.6.3 Exemple de calcul

Les enceintes  $i, j$  et  $k$  sont reliées par deux ouvertures en série. La hauteur des ouvertures est  $h_u = 2,1$  m,  $h_l = 0$  m. Les largeurs des ouvertures sont  $B_{ij} = B_{jk} = 1$  m. Les températures des enceintes sont  $T_i = 200$  °C (473 K),  $T_k = 20$  °C (293 K). La différence de pression entre les enceintes  $i$  et  $k$  est  $\Delta p_{ik}(0) = -6$  Pa au niveau du sol.

En utilisant les Formules (B.5) et (B.6), les masses volumiques de la fumée dans les deux enceintes sont:

$$\rho_i = \frac{353}{T_i} = \frac{353}{473} = 0,746 \quad (\text{B.41})$$

$$\rho_k = \frac{353}{T_k} = \frac{353}{293} = 1,205 \quad (\text{B.42})$$

En utilisant la Formule (B.39), la largeur d'ouverture effective est:

$$B_{ik} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{B_{ij}}\right)^2 + \left(\frac{1}{B_{jk}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{1,0}\right)^2 + \left(\frac{1}{1,0}\right)^2}} = 0,707 \quad (\text{B.43})$$

En utilisant les Formules (B.7), (B.8), (B.9), les débits massiques sont calculés comme:

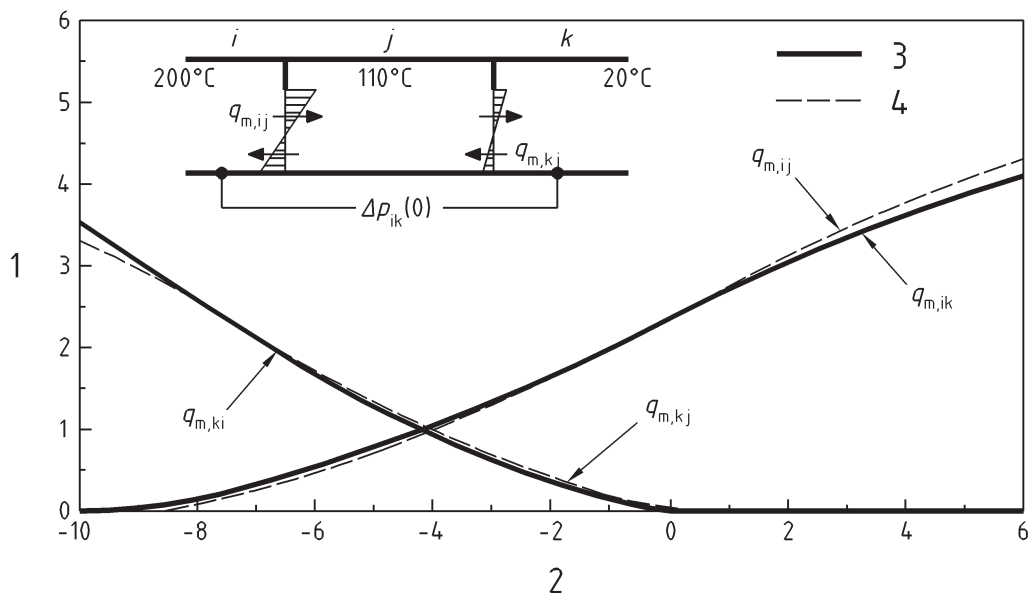
$$h_n = \frac{\Delta p_{ik}(0)}{(\rho_i - \rho_k)g} = \frac{-6}{(0,746 - 1,205) \times 9,8} = 1,335 \quad (\text{B.44})$$

$$\begin{aligned} q_{m,ik} &= \frac{2}{3} C_D B_{ik} \sqrt{2\rho_i(\rho_k - \rho_i)g(h_u - h_n)^{3/2}} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,707 \sqrt{2 \times 0,746 \times (1,205 - 0,746) \times 9,8 \times (2,1 - 1,335)^{3/2}} \\ &= 0,57 \end{aligned} \quad (\text{B.45})$$

$$\begin{aligned} q_{m,ki} &= \frac{2}{3} C_D B_{ik} \sqrt{2\rho_k(\rho_k - \rho_i)g(h_n - h_l)^{3/2}} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,707 \sqrt{2 \times 1,205 \times (1,205 - 0,746) \times 9,8 \times (1,335 - 0)^{3/2}} \\ &= 1,68 \end{aligned} \quad (\text{B.46})$$



NOTE La solution exacte en considérant deux ouvertures séparées est:  $q_{m,ij} = 0,44$ ,  $q_{m,ji} = 1,24$ ,  $q_{m,jk} = 0,76$  et  $q_{m,kj} = 1,56$ . Pour les cas généraux, les débits massiques calculés par le calcul exact et par la largeur effective sont comparés à la Figure B.9 pour des profils de température identiques ( $T_i = 200\text{ °C}$ ,  $T_j = 110\text{ °C}$  et  $T_k = 20\text{ °C}$ ). La différence de pression entre les enceintes au niveau du sol varie dans l'intervalle  $-12\text{ Pa}$  à  $4\text{ Pa}$ . Les débits  $q_{m,jk}$  et  $q_{m,ji}$  sont calculés en utilisant la largeur d'ouverture effective, alors que les débits  $q_{m,ij}$ ,  $q_{m,ji}$ ,  $q_{m,jk}$  et  $q_{m,kj}$  sont calculés pour deux ouvertures distinctes et couplées par le bilan massique de l'enceinte  $j$ . L'erreur est suffisamment faible pour être acceptable pour la plupart des calculs d'ingénierie.



#### Légende

- 1 débit massique [kg/s]
- 2 différence de pression au niveau du sol,  $\Delta p_{ik}(0)$  [Pa]
- 3 approximation par la largeur effective
- 4 calcul exact

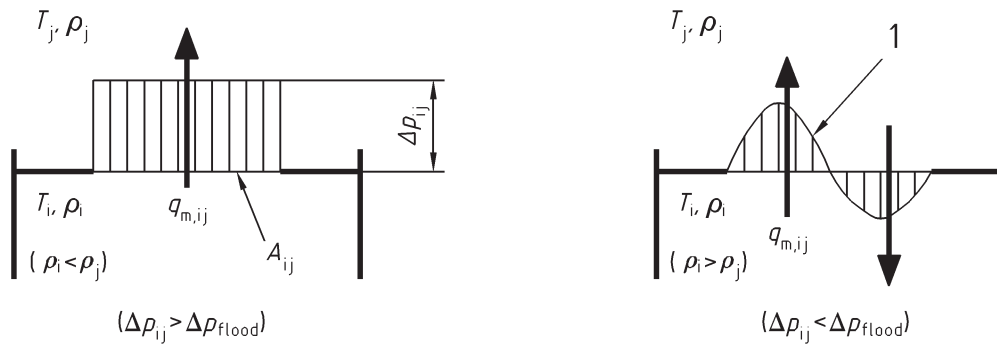
**Figure B.9 — Comparaison entre les résultats calculés et les solutions exactes (dans le cas où  $T_i = 473\text{ K}$ ,  $T_j = 383\text{ K}$ ,  $T_k = 293\text{ K}$  pour diverses différences de pression entre les enceintes  $i$  et  $k$ )**

### B.3.7 Écoulement au travers d'une ouverture horizontale reliant deux enceintes de températures uniformes, mais différentes

L'écoulement au travers d'une ouverture horizontale peut être calculé d'une manière similaire à l'écoulement au travers d'une ouverture verticale reliant deux enceintes à température uniforme.

$$q_{m,ij} = C_D A_{ij} \sqrt{2\rho_i \Delta p_{ij}} \dots (\text{si } \Delta p_{ij} > \Delta p_{\text{flood}}) \quad (\text{B.47})$$

Toutefois, il convient de faire attention puisqu'il existe une différence de pression minimale pour obtenir un écoulement unidirectionnel. Si la différence de pression est trop faible, un écoulement bidirectionnel peut se produire, comme indiqué à la Figure B.10. La condition critique  $\Delta p_{\text{flood}}$  pour le début d'un écoulement bidirectionnel fait encore l'objet de recherches. Des exemples de formules existent, dont celles développées par Yamada et al. [4] et Cooper [5]. Une formule explicite pour le débit dans le cas d'un écoulement bidirectionnel n'est pas bien établie actuellement.



### Légende

1 profil de vitesse

**Figure B.10 — Différentiel de pression au travers d'une ouverture verticale et direction correspondante de l'écoulement ( $\rho_i < \rho_j$ )**

### B.3.8 Configuration à deux couches — écoulement au travers d'une seule ouverture verticale reliant deux enceintes

Dans une configuration à deux couches, l'écoulement au travers d'une ouverture est assez complexe. Comme indiqué à la Figure B.11, l'écoulement au travers d'une ouverture est calculé en trois segments. Le segment inférieur est en contact avec la couche d'air des deux côtés. Le segment du milieu est en contact avec la fumée et l'air de l'un ou de l'autre côté. Le segment supérieur est en contact avec la fumée des deux côtés.

Les débits massiques sont calculés en appliquant les Formules de base (B.7) à (B.11) à chaque segment séparément. Les hauteurs de la base des segments supérieur et du milieu sont déterminées par:

$$h_m = \min(h_i, h_j) \quad (\text{B.48})$$

$$h_t = \max(h_i, h_j) \quad (\text{B.49})$$

à utiliser comme plans de référence dans les formules de calcul.

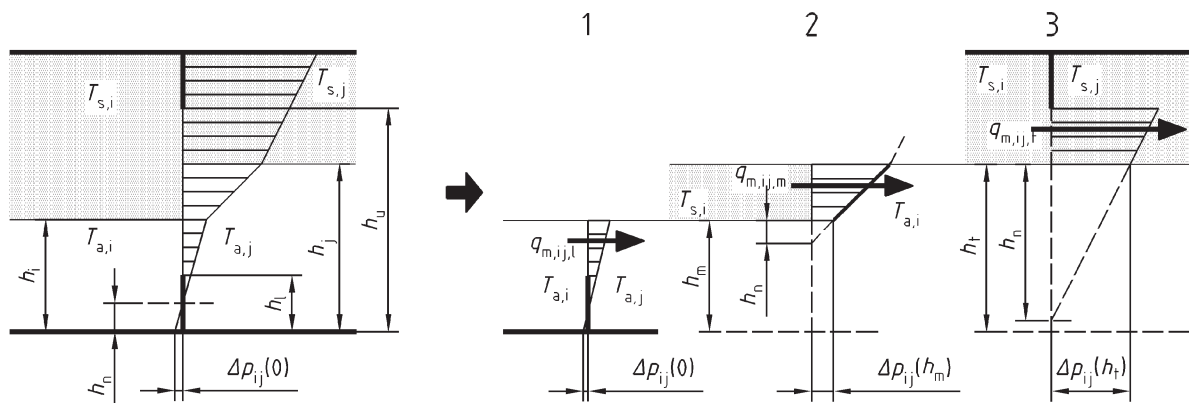
La hauteur du plan neutre doit être calculée pour chaque segment. En utilisant la différence de pression entre les enceintes  $i$  et  $j$  au niveau de la base du segment, les hauteurs du plan neutre par rapport à la base du segment sont calculées par:

$$h_n = \frac{\Delta p_{ij}(h_m)}{(\rho_i - \rho_j)g} \quad (\text{B.50})$$

pour le segment du milieu, et

$$h_n = \frac{\Delta p_{ij}(h_t)}{(\rho_i - \rho_j)g} \quad (\text{B.51})$$

pour le segment supérieur.



### Légende

- 1 segment inférieur
- 2 segment du milieu
- 3 segment supérieur

**Figure B.11 — Différence de pression et profil de débit massique dans une configuration à deux couches**

#### B.3.8.1 Débits massiques dans le segment inférieur

Les débits massiques dans le segment inférieur ( $h < h_m$ ) sont calculés par les formules en B.3.2 pour une ouverture verticale reliant deux enceintes de températures uniformes, mais différentes. Les remplacements suivants sont nécessaires pour appliquer les Formules (B.7) à (B.11):

$$T_i \rightarrow T_{a,i} \quad (B.52)$$

$$T_j \rightarrow T_{a,j} \quad (B.53)$$

$$h_u \rightarrow \min(h_u, h_m) \quad (B.54)$$

#### B.3.8.2 Débits massiques dans le segment du milieu

Les débits massiques dans le segment du milieu ( $h_m < h < h_u$ ) peuvent être calculés par les Formules (B.7) à (B.11) après les remplacements suivants:

$$T_i \rightarrow \begin{cases} T_{s,i} & (h_i \leq h_j) \\ T_{a,i} & (h_i > h_j) \end{cases} \quad (B.55)$$

$$T_j \rightarrow \begin{cases} T_{a,j} & (h_i \leq h_j) \\ T_{s,j} & (h_i > h_j) \end{cases} \quad (B.56)$$

$$h_l \rightarrow \max(h_l - h_m, 0) \quad (B.57)$$

$$h_u \rightarrow \min(h_t - h_m, h_u - h_m) \quad (\text{B.58})$$

La hauteur du plan neutre par rapport à la base du segment est calculée par:

$$h_n = \begin{cases} \frac{\Delta p_{ij}(h_m)}{(\rho_{s,i} - \rho_{a,j})g} (h_i \leq h_j) \\ \frac{\Delta p_{ij}(h_m)}{(\rho_{a,i} - \rho_{s,j})g} (h_i > h_j) \end{cases} \quad (\text{B.59})$$

en utilisant le différentiel de pression au niveau de la base du segment

$$\Delta p_{ij}(h_m) = \Delta p_{ij}(0) - (\rho_{a,i} - \rho_{a,j})gh_m \quad (\text{B.60})$$

### B.3.8.3 Débits massiques dans le segment supérieur

Comme pour les deux segments précédents, les débits dans le segment supérieur ( $h_t < h$ ) peuvent être calculés par les Formules (B.7) à (B.11) après les remplacements suivants:

$$T_i \rightarrow T_{s,i} \quad (\text{B.61})$$

$$T_i \rightarrow T_{s,j} \quad (\text{B.62})$$

$$h_l \rightarrow \max(h_l - h_t, 0) \quad (\text{B.63})$$

$$h_u \rightarrow h_u - h_t \quad (\text{B.64})$$

Comme pour le segment du milieu, la hauteur du plan neutre est calculée par rapport à la base du segment par:

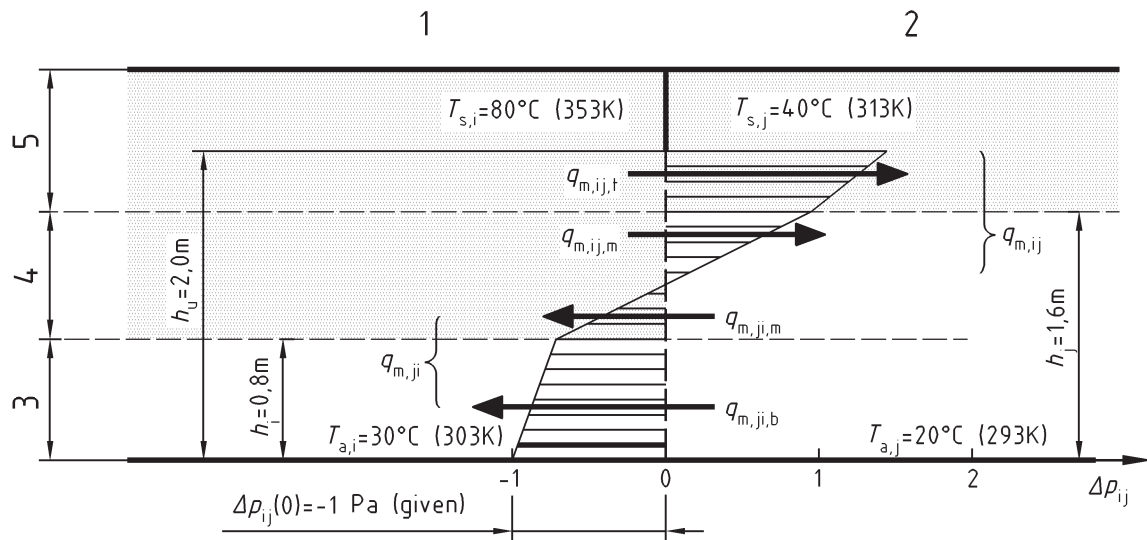
$$h_n = \frac{\Delta p_{ij}(h_t)}{(\rho_{s,i} - \rho_{s,j})g} \quad (\text{B.65})$$

en utilisant la différence de pression à la base du segment supérieur.

$$\Delta p_{ij}(h_t) = \Delta p_{ij}(h_m) - \begin{cases} (\rho_{s,i} - \rho_{a,j})g(h_t - h_m), & (h_i < h_j) \\ (\rho_{a,i} - \rho_{s,j})g(h_t - h_m), & (h_i > h_j) \end{cases} \quad (\text{B.66})$$

### B.3.8.4 Exemple de calcul

Comme indiqué à la Figure B.12, les couches de fumée se forment dans les parties supérieures des deux enceintes. Les hauteurs d'interface sont respectivement de 0,8 m et 1,6 m dans les enceintes *i* et *j*. Les températures de la couche de fumée sont de 80 °C (353 K) et 40 °C (313 K). Les températures de la couche inférieure sont de 30 °C (303 K) et 20 °C (293 K). La pression dans l'enceinte *j* est supérieure de 1 Pa à celle de l'enceinte *i* ( $\Delta p_{ij}(0) = -1$  Pa). La largeur de l'ouverture est de 0,9 m et sa hauteur est de 2,0 m ( $h_l = 0,0$  m,  $h_u = 2.0$  m). Les calculs de débits massiques sont réalisés pour chaque segment.



### Légende

- 1 enceinte *i*
- 2 enceinte *j*
- 3 segment inférieur  $h < h_m$
- 4 segment du milieu  $h_m < h < h_t$
- 5 segment supérieur  $h_u < h$

Figure B.12 — Exemple de calcul de débits massiques dans une configuration à deux couches

#### B.3.8.4.1 Débit massique dans le segment inférieur

La hauteur du segment inférieur est dans l'intervalle  $0 < h < h_m$  ( $= 0,8$  m) dans ce cas. En utilisant les Formules (B.5) et (B.6):

$$\rho_{a,i} = \frac{353}{T_i} = \frac{353}{303} = 1,165 \quad (\text{B.67})$$

$$\rho_{a,j} = \frac{353}{T_j} = \frac{353}{293} = 1,205 \quad (\text{B.68})$$

La hauteur du plan neutre est calculée par la Formule (B.7) comme:

$$h_n = \frac{\Delta p_{ij}(0)}{(\rho_{a,i} - \rho_{a,j})g} = \frac{-1}{(1,165 - 1,205) \times 9,8} = 2,566 \quad (\text{B.69})$$

qui est supérieure à la hauteur du segment  $h_m$ . Par conséquent, l'écoulement est unidirectionnel de l'enceinte *j* vers *i*. En utilisant la dernière formule de la Formule (B.9), on obtient:

$$\begin{aligned} q_{m,ji,b} &= \frac{2}{3} C_D B_{\text{vent}} \sqrt{2\rho_{a,j}(\rho_{a,j} - \rho_{a,i})g} \left\{ h_n^{3/2} - (h_n - h_m)^{3/2} \right\} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,9 \sqrt{2 \times 1,205 \times (1,205 - 1,165) \times 9,8} \left\{ 2,566^{3/2} - (2,566 - 0,8)^{3/2} \right\} \\ &= 0,718 \end{aligned} \quad (\text{B.70})$$

#### B.3.8.4.2 Débits massiques dans le segment du milieu

La hauteur du segment du milieu est dans l'intervalle  $h_m (= 0,8 \text{ m}) < h < h_t (= 1,6 \text{ m})$  dans ce cas. La différence de pression à la base du segment du milieu est calculée par la Formule (B.60):

$$\begin{aligned}\Delta p_{ij}(h_m) &= \Delta p_{ij}(0) - (\rho_{a,i} - \rho_{a,j})gh_m \\ &= -1 - (1,165 - 1,205) \times 9,8 \times 0,8 \\ &= -0,689\end{aligned}\quad (\text{B.71})$$

En utilisant les Formules (B.6) et (B.59), la hauteur du plan neutre pour ce segment est située à:

$$\rho_{s,i} = \frac{353}{T_i} = \frac{353}{353} = 1,000 \quad (\text{B.72})$$

$$h_n = \frac{\Delta p_{ij}(H_m)}{(\rho_{s,i} - \rho_{a,j})g} = \frac{-0,686}{(1,000 - 1,205) \times 9,8} = 0,343 \quad (\text{B.73})$$

au-dessus de la base du segment du milieu. Comme  $0 < h_n < h_u - h_m$ , l'écoulement est bidirectionnel. En utilisant la deuxième formule en Formule (B.8) et la deuxième formule en Formule (B.9), les débits massiques sont:

$$\begin{aligned}q_{m,ij,m} &= \frac{2}{3}C_D B_{\text{vent}} \sqrt{2\rho_{s,i}(\rho_{a,j} - \rho_{s,i})g} \{ (h_j - h_i) - h_n \}^{3/2} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,9 \times \sqrt{2 \times 1,0 \times (1,205 - 1,000) \times 9,8} \times \{ (1,6 - 0,8) - 0,343 \}^{3/2} \\ &= 0,260\end{aligned}\quad (\text{B.74})$$

$$\begin{aligned}q_{m,ij,m} &= \frac{2}{3}C_D B_{\text{vent}} \sqrt{2\rho_{a,j}(\rho_{a,j} - \rho_{s,i})g} h_n^{3/2} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,9 \times \sqrt{2 \times 1,205 \times (1,205 - 1,000) \times 9,8} \times 0,343^{3/2} \\ &= 0,186\end{aligned}\quad (\text{B.75})$$

#### B.3.8.4.3 Débit massique dans le segment supérieur

La hauteur du segment supérieur est  $h_t (= 1,6 \text{ m}) < h$  dans ce cas. La différence de pression à la base du segment supérieur est calculée par la Formule (B.66) comme:

$$\begin{aligned}\Delta p_{ij}(h_t) &= \Delta p_{ij}(h_m) - (\rho_{s,i} - \rho_{a,j})g(h_y - h_m) \\ &= -0,689 - (1,000 - 1,205) \times 9,8 \times 0,8 \\ &= 0,917\end{aligned}\quad (\text{B.76})$$

En utilisant les Formules (B.6) et (B.65), la hauteur du plan neutre au-dessus de la base du segment supérieur est:

$$\rho_{s,j} = \frac{353}{T_j} = \frac{353}{313} = 1,128 \quad (\text{B.77})$$

$$h_n = \frac{\Delta p_{ij}(h_j)}{(\rho_{s,i} - \rho_{s,j})g} = \frac{0,917}{(1,000 - 1,128) \times 9,8} = -0,731 \quad (\text{B.78})$$

Le résultat négatif indique que le plan neutre se trouve 0,731 m en dessous de la base du segment. Comme  $h_n < 0$ , l'écoulement est unidirectionnel. En utilisant la première formule en Formule (B.8), le résultat est:

$$\begin{aligned} q_{m,ij,t} &= \frac{2}{3} C_{DB,ij} \sqrt{2\rho_{s,i}(\rho_{s,j} - \rho_{s,i})g} \{ (h_u - h_j) - h_n \}^{3/2} - (-h_n)^{3/2} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,9 \times \\ &\quad \sqrt{2 \times 1,0 \times (1,128 - 1,00) \times 9,8} \times \{ (2,0 - 1,6) - (-0,731) \}^{3/2} - \{ -(-0,731)^{3/2} \} \\ &= 0,384 \end{aligned} \quad (\text{B.79})$$

#### B.3.8.4.4 Débits massiques totaux entre enceintes

Les débits massiques totaux par des ouvertures sont donnés par la somme des débits dans les trois segments.

$$q_{m,ij} = q_{m,ij,m} + q_{m,ij,t} = 0,261 + 0,384 = 0,644 \quad (\text{B.80})$$

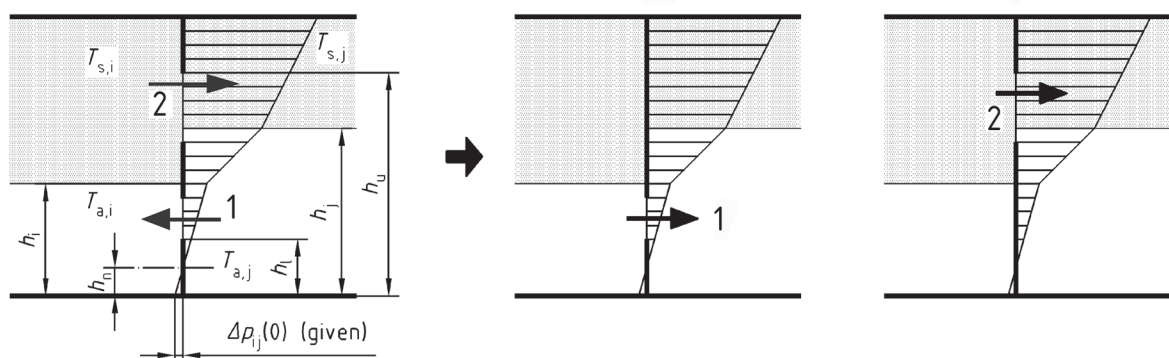
$$q_{m,ij} = q_{m,ji,b} + q_{m,ji,m} = 0,720 + 0,185 = 0,903 \quad (\text{B.81})$$

NOTE Si un mélange est négligé à l'interface air-fumée, le débit massique dans le segment du milieu,  $q_{m,ij}$  est identique au débit entrant dans la couche de fumée de l'enceinte  $j$ . De même,  $q_{m,ji}$  est identique au débit d'air vers la couche inférieure dans l'enceinte  $i$ .

### B.3.9 Configuration à deux couches — Écoulement au travers de multiples ouvertures verticales reliant deux enceintes

#### B.3.9.1 Généralités

En cas d'ouvertures multiples dans une configuration à deux couches, comme indiqué à la Figure B.13, la même procédure qu'en B.3.8 est appliquée séparément à chaque ouverture.



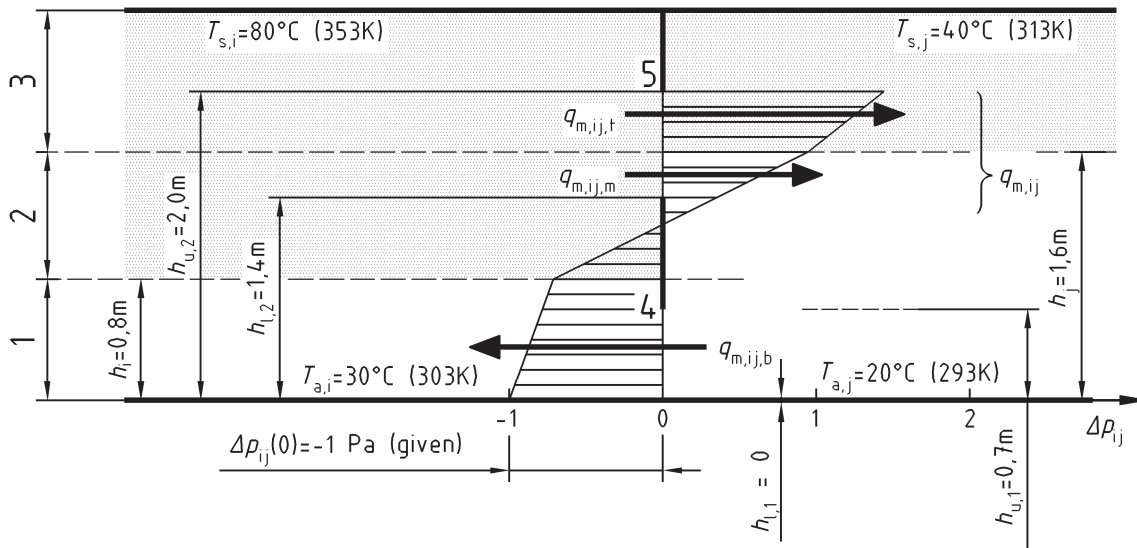
#### Légende

- 1 ouverture 1
- 2 ouverture 2

Figure B.13 — Calcul en cas d'ouvertures multiples dans une configuration à deux couches

### B.3.9.2 Exemple de calcul

Comme indiqué à la Figure B.14, les couches de fumée se forment dans les parties supérieures de deux enceintes. Les hauteurs des couches de fumée et leurs températures sont identiques à celle de l'exemple en B.3.8.4. Il y a deux ouvertures entre les enceintes. L'intervalle de hauteur de l'ouverture 1 est de  $h_{l,1} = 0$  m à  $h_{u,1} = 0,7$  m. L'intervalle de hauteur de l'ouverture 2 est de  $h_{l,2} = 1,4$  m à  $h_{u,2} = 2,0$  m. La largeur des deux ouvertures est de  $B_{ij,1} = B_{ij,2} = 0,9$  m. Les calculs de débit massique sont réalisés pour chaque ouverture.



#### Légende

- 1 segment inférieur  $h < h_m$
- 2 segment du milieu  $h_m < h < h_t$
- 3 segment supérieur  $h_t < h$
- 4 ouverture 1
- 5 ouverture 2

Figure B.14 — Exemple de calcul de débits massiques dans une configuration à deux couches avec des ouvertures multiples

#### B.3.9.2.1 Débit massique dans l'ouverture 1

Puisque les débits massiques dans les segments du milieu et supérieur sont nuls, le calcul est effectué uniquement pour le segment inférieur. La hauteur du plan neutre pour le segment inférieur est de 2,566 m, telle que calculée par la Formule (B.69). Le débit est calculé de la même manière qu'en Formule (B.70), mais en modifiant l'intervalle de hauteur.

$$\begin{aligned}
 q_{m,ij,l} &= \frac{2}{3} C_D B_{ij,1} \sqrt{2 \rho_{a,j} (\rho_{a,j} - \rho_{a,i}) g} \left\{ (h_n - h_{l,1})^{3/2} - (h_n - h_{u,1})^{3/2} \right\} \\
 &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,9 \times \sqrt{2 \times 1,205 \times (1,205 - 1,165) \times 9,8} \times \left\{ (2,566 - 0)^{3/2} - (2,566 - 0,7)^{3/2} \right\} \quad (\text{B.82}) \\
 &= 0,635
 \end{aligned}$$

#### B.3.9.2.2 Débit massique dans l'ouverture 2

Les débits massiques dans les segments du milieu et supérieur sont à calculer. La hauteur du plan neutre pour le segment du milieu est de 0,343 m au-dessus de la base du segment, telle que calculée



par la Formule (B.73). Le débit est calculé de la même manière qu'en Formule (B.74), mais en modifiant l'intervalle de hauteur.

$$\begin{aligned}
 q_{m,ij,m} &= \frac{2}{3} C_D B_{ij,2} \sqrt{2 \rho_{s,i} (\rho_{a,j} - \rho_{s,i})} g \left( \left\{ (h_j - (h_m + h_n)) \right\}^{3/2} - \left\{ (h_{l,2} - (h_m + h_n)) \right\}^{3/2} \right) \\
 &= \frac{2}{3} \times 0,7 \times 0,9 \times \sqrt{2 \times 1,0 \times (1,205 - 1,000)} \times 9,8 \times \\
 &\quad \left( \left\{ 1,6 - (0,8 + 0,343) \right\}^{3/2} - \left\{ 1,4 - (0,8 + 0,343) \right\}^{3/2} \right) \\
 &= 0,150
 \end{aligned} \tag{B.83}$$

Le débit massique dans le segment supérieur est identique à celui de l'exemple en B.3.4.7, tel que calculé par la Formule (B.79):

$$q_{m,ij,t} = 0,384 \tag{B.84}$$

## B.4 Base scientifique de l'ensemble de formules

L'écoulement au travers d'une ouverture a été analysé par rapport à une prédiction quantitative des feux se produisant dans une enceinte. Des études antérieures comportent la prédiction des températures pour des feux pleinement développés par Kawagoe[4] sur la base des suggestions de Sekine. Des extensions ont été faites pour une configuration à deux couches par Prah[7] et Rockett[8]. Pour ces études, les équations de l'écoulement étaient dérivées des équations fondamentales de la mécanique des fluides. Des mesures directes à échelle réelle ont été réalisées dans les années 1980 par Steckler et al.[9],[10],[11] et Nakaya et al.[12]. Ces mesures ont montré que le coefficient de perte de charge se situe dans un intervalle de 0,68 à 0,73, généralement à 0,7. D'autres aspects historiques sont étudiés par Beyler[13].

## B.5 Limites de l'ensemble de formules

L'ensemble de formules ne peut pas être appliqué dans les situations suivantes:

### B.5.1 Uniformité de la couche de fumée

L'ensemble de formules suppose un profil uniforme ou à deux couches de la température de l'enceinte adjacent à l'ouverture. Lorsque cette hypothèse n'est pas vérifiée, il est recommandé d'utiliser la formule de l'écoulement général de l'Annexe A.

### B.5.2 Pression dynamique

L'effet de la pression dynamique provoquée par un vent extérieur ou des ventilateurs mécaniques n'est pas pris en compte. Dans ces cas, il faut étudier soigneusement la répartition de la pression dynamique.

## B.6 Paramètres de sortie

L'ensemble de formules aboutit à un débit massique par l'ouverture, en kilogrammes par seconde [kg/s]. Lorsqu'un écoulement bidirectionnel existe, la position du plan neutre est également calculée.

## B.7 Paramètres d'entrée de l'ensemble de formules

### B.7.1 Différence de pression au travers des ouvertures

Le paramètre  $\Delta p_{ij}$  est défini comme la différence de pression au plan de référence, qui est généralement considérée à l'élévation la plus basse de la limite physique.

### **B.7.2 Profil de température de l'enceinte adjacent à l'ouverture**

Le profil de température adjacent à une ouverture doit être uniforme ou à deux couches. Dans le cas d'un profil uniforme, la température de chaque enceinte doit être spécifiée. Dans le cas de deux couches, la position d'interface, la température de la couche de fumée et celle de la couche d'air doivent être spécifiées.

## **B.8 Domaine d'application de l'ensemble de formules**

Le domaine d'application de l'ensemble de formules peut être déterminé à partir des études réalisées par Steckler et al.<sup>[9]</sup>, Nakaya et al.<sup>[12]</sup> et d'autres auteurs. Les expériences de Steckler ont été réalisées dans une pièce de 2,8 m sur 2,8 m de large et de 2,13 m de haut. La largeur de l'ouverture de la porte d'entrée était de 0,74 m, tandis que sa hauteur variait entre 0,46 m et 1,38 m. Le débit calorifique de l'incendie était compris entre 31,6 kW et 158 kW. La température de l'enceinte était au maximum de 250 °C. Les expériences de Nakaya correspondent à une pièce plus grande de 3,45 m sur 3,55 m de large et de 2,12 m de haut. La hauteur de l'ouverture était de 1,6 m ou 1,7 m. La largeur de l'ouverture variait entre 0,29 m et 0,89 m. Les températures des enceintes étaient comprises entre 50 °C dans le cas d'un profil de température à deux couches et 1 000 °C dans le cas d'un profil uniforme, au maximum.

## Bibliographie

- [1] ISO 16735:2006, *Ingénierie de la sécurité incendie — Exigences régissant les équations algébriques — Couches de fumée*
- [2] TANAKA T. *A Model on Fire Spread in Small Scale Buildings*, BRI Research Paper, Building Research Institute, 1978(No. 79), 1980(No. 84)
- [3] PEACOCK R., JONES W.W., FORNEY G.P., RENEKE P.A., BUKOWSKI R.W., KLOTE J.H. *An Updated Guide for HAZARD I version 1.2, NISTIR 5410*. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1994
- [4] KAWAGOE K. *Fire Behavior in Rooms, BRI report No. 27*. Building Research Institute, 1958
- [5] YAMADA T. *Experimental Study of the Exchange Flow through a Horizontal Ceiling Vent in Atrium Fires: Criteria of Supply Air and Pressure necessary for Uni-directional Flow*, NISTIR 6030: Thirteenth Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, March 13-20, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1996, pp. 21-29
- [6] COOPER L.Y. Combined Buoyancy- and Pressure-Driven Flow Through a Shallow, Horizontal Circular Vent. *J. Heat Transfer*. 1995, **117** pp. 659–667
- [7] PRAHL J., & EMMONS H.W. Fire Induced Flow through an Opening. *Combust. Flame*. 1975, **25** pp. 369–385
- [8] ROCKETT A.J. Fire Induced Gas Flow in an Enclosure. *Combustion Science and Technology*. 1976, **12** pp. 165–175
- [9] STECKLER K.D., QUINTIERE J.G., RINKINEN W.J. *Flow Induced by Fire in a Compartment*, 19th Symposium (International) on Combustion, 1982, pp. 913-920
- [10] STECKLER K.D., BAUM H.R., QUINTIERE J.G. *Fire Induced Flow through Room Openings — Flow Coefficients*, 20th Symposium (International) on Combustion, 1984, pp. 1591-1600
- [11] QUINTIERE J.G., STECKLER K., CORLEY D. An Assessment of Fire Induced Flows in Compartments. *Fire Science and Technology*. 1984, **4** (1) pp. 1–14
- [12] NAKAYA I., TANAKA T., YOSHIDA M., STECKLER K. Doorway Flow Induced by a Propane Fire. *Fire Saf. J.* 1986, **10** pp. 185–195
- [13] BEYLER C. SFPE Classic Paper Review: Fire-Induced flow through an Opening by Joseph Prah and Howard Emmons. *J. Fire Prot. Eng.* 2004, **14** (2) pp. 95–100