

Troisième partie

Écoulement et dispersion à l'échelle d'un quartier

Si la rue est une échelle adaptée à une modélisation simplifiée de la dispersion des polluants, le quartier constitue souvent une entité culturelle plus homogène, associée aux problématiques de l'homme dans la ville. En effet, l'histoire architecturale, l'activité économique, la vie associative, les centres locaux de décision politique (mairies d'arrondissements), constituent souvent un ensemble cohérent à l'échelle du quartier. Afin de prévoir l'impact sur la pollution des projets d'aménagements urbains ou des plans de circulation des véhicules, il est donc important de pouvoir modéliser le transport des effluents atmosphériques à cette échelle.

Pour aborder ce problème, nous proposons, au cours de cette partie, de généraliser l'approche rue-canyon à la description d'un ensemble de plusieurs rues connectées. Dans le premier chapitre, nous nous intéresserons à la modélisation des intersections de rues et des échanges associés. Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de la dispersion dans un réseau de rues et nous présenterons un modèle adapté à cette échelle.

III.1 Intersection entre plusieurs rues

Ce chapitre est consacré à l'étude des intersections de rues. Après quelques rappels bibliographiques, nous proposons un modèle décrivant les flux d'air et de polluants au niveau d'une intersection. Par la suite, ce modèle est comparé à des simulations numériques et à des expériences en soufflerie. Différentes configurations caractéristiques sont étudiées : rétrécissement et élargissement de rue, carrefour entre deux rues avec variation du rapport d'aspect des rues et de la direction du vent, intersection formant une place.

III.1.1 Généralités

Les intersections de rues jouent un rôle important dans l'étude de la dispersion des polluants au sein de la canopée urbaine. Du point de vue des émissions automobiles, la présence des feux de signalisation génère une surémission associée au temps de séjour des véhicules à l'arrêt (feu rouge) et à leur accélération au démarrage (feu vert). Du point de vue de la dispersion des polluants, les intersections constituent une zone d'échanges entre les différentes rues. Par exemple, une rue piétonne peut être polluée si elle est connectée à une rue où la circulation est importante. Enfin, du point de vue de la mesure, de nombreux capteurs sont placés au voisinage des intersections ; l'analyse des données mesurées par ces capteurs suppose donc de comprendre les mécanismes de transport à ce niveau (OTT, 1977 ; SCAPERDAS et COLVILE, 1999).

III.1.1.1 Analyse bibliographique

Il existe peu d'études sur les écoulements et la dispersion au niveau des intersections entre plusieurs rues. Au cours des années 70 et 80, plusieurs expériences in situ (O'TOOLE *et al.*, 1975 ; ROSAS *et al.*, 1980 ; BULLIN *et al.*, 1982) ont été réalisées sur des intersections de routes, dans des zones dégagées, afin d'évaluer l'impact du croisement de plusieurs autoroutes, en particulier au niveau des grands échangeurs. Parallèlement, plusieurs modèles semi-empiriques (IMM, MICRO2), basés sur un modèle gaussien, ont été développés pour estimer les concentrations à proximité de ces carrefours (BENESH, 1978 ; ZAMURS et PIRACCI, 1982 ; GRIFFIN, 1983 ; MESSINA, 1983).

Au sein de la canopée urbaine, plusieurs travaux ont porté sur la dispersion à travers des groupes d'obstacles (DAVIDSON *et al.*, 1996 ; MACDONALD *et al.*, 1997 ; ISNARD, 1999). L'objectif de ces approches est d'étudier l'effet global du groupe sur un panache de polluants. Bien qu'elles puissent fournir des observations qualitatives sur l'effet des intersections, elles ne permettent pas de décrire en détail les phénomènes. De plus, les obstacles utilisés sont généralement cubiques,

si bien qu'il est difficile dans ce cas de parler d'intersection de rues.

Finalement, les intersections entre plusieurs rues suffisamment longues et bordées de bâtiments, ont été peu étudiées. En évoquant les spécificités de la canopée urbaine, ZAMURS (1990) a montré la nécessité de développer des modèles de dispersion adaptés à la simulation de ce type d'intersection. Une série d'expériences en soufflerie (HOYDYSH et DABBERDT, 1994 ; HOYDYSH *et al.*, 1995) a permis de mettre en évidence plusieurs phénomènes particuliers. En effet, des mesures de concentration ont été réalisées au sein d'un réseau de rues et d'avenues perpendiculaires. L'écoulement n'a donc pas été déterminé de façon explicite mais les résultats obtenus pour la concentration nous permettent de dégager quelques informations sur son comportement. Il semble que le champ de vitesse dans l'intersection soit dominé par l'écoulement de la rue la plus large (avenue). En effet, lorsqu'une source est située dans une avenue, le traceur se disperse principalement dans cette avenue et très peu dans les rues voisines, même au niveau des intersections. Ceci est vrai quel que soit l'angle d'incidence de l'écoulement. Lorsque cette source est située dans la rue la plus étroite, le polluant se disperse dans celle-ci jusqu'à la première intersection rencontrée. Ensuite, le traceur semble être emporté par l'écoulement de l'avenue perpendiculaire. En ce qui concerne les niveaux de concentration dans l'intersection, des écarts importants ont été observés au sein même de l'intersection. Le maximum est presque toujours situé au coin d'un bâtiment. D'autres expériences sur des intersections ont été réalisées en soufflerie par KASTNER-KLEIN et PLATE (1998). Les mesures du champ de vitesse indiquent que l'écoulement dans l'intersection est orienté dans la direction du vent extérieur, sans déviation avec l'altitude. Le mouvement tourbillonnaire ou hélicoïdal, caractéristique des rues, ne semble donc pas être présent dans les intersections.

Quelques études récentes ont montré l'intérêt des simulations numériques pour étudier ce type d'écoulement complexe. HUNTER *et al.* (1990) ont mis en évidence la présence d'un vortex d'axe vertical à l'extrémité de la rue, à la limite de l'intersection, lorsque cette rue est perpendiculaire à l'écoulement extérieur. SCAPERDAS et COLVILE (1999) ont simulé une intersection réelle de Londres et ont mis en évidence différentes natures d'écoulement dans l'intersection en fonction de la direction du vent. Ils ont également montré que le maximum de concentration est situé à l'angle du bâtiment dont les deux faces se trouvent sous l'influence directe des sources de polluants. Par ailleurs, dans une étude à caractère plus appliquée, GADILHE *et al.* (1993) ont simulé l'écoulement dans une place de Nantes. Ils ont mis en évidence l'apparition d'une recirculation localisée à l'intérieur de la place.

Enfin, le seul modèle théorique basé sur une analyse des phénomènes physiques au sein d'une intersection a été proposé par YAMARTINO et WIEGAND (1986). Il suppose que l'intersection peut être assimilée à une boîte bien mélangée, alimentée par les rues situées à l'amont et par les sources situées dans l'intersection. À l'aide d'un bilan de masse sur cette boîte, ce modèle fournit une valeur moyenne pour la concentration dans l'intersection. Malheureusement, l'hypothèse d'une boîte bien mélangée semble être en désaccord avec les écarts de concentration observés par HOYDYSH et DABBERDT (1994) dans un carrefour.

Il ressort de cette analyse bibliographique qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, de modèle phénoménologique satisfaisant pour décrire les mécanismes de dispersion dans une intersection. Il y a donc un besoin de comprendre ces mécanismes de manière générale et non dans des situations particulières. Nous proposons, dans ce chapitre, d'aborder ce problème.

III.1.1.2 Définition d'une intersection

Avant d'étudier l'écoulement et la dispersion, nous allons revenir sur la notion même d'intersection. Le terme *intersection* regroupe en effet un grand nombre de configurations géométriques

différentes et il est utile de préciser notre cadre de travail. Tout d'abord, nous nous limiterons au cas des intersections situées dans la canopée urbaine, c'est-à-dire constituées de rues bordées de bâtiments. Les intersections que nous allons étudier sont basées sur la notion de tronçon de rue, homogène en terme de largeur, hauteur et direction. Une intersection peut ainsi être définie comme la zone de jonction entre plusieurs tronçons de rue. Par exemple, une rue comportant un élargissement de section ou un changement de direction sera considérée comme une jonction de deux segments de rue. Cette définition permet de décomposer le problème de la modélisation d'un quartier en deux parties : d'une part les tronçons de rue homogènes, modélisés à l'aide des approches décrites dans la deuxième partie ; d'autre part les intersections entre plusieurs tronçons.

Comme tout problème réel, la géométrie des intersections de rues est particulièrement complexe. Cette complexité est liée d'une part à la quantité de paramètres nécessaires pour définir l'intersection (nombre de rues, caractéristiques de ces rues, taille et forme de l'intersection, détails des toits, des façades, du sol, ...) et d'autre part à la diversité des configurations possibles, qui rend difficile l'expression d'une forme universelle d'intersection. L'étude d'une intersection passe donc nécessairement par l'utilisation d'un *modèle géométrique simplifié*, reproduisant uniquement les principales caractéristiques de l'intersection, à l'instar de l'approche *rue-canyon* qui consiste à représenter une rue par une cavité rectangulaire. Pour simplifier la définition géométrique d'une intersection, nous supposons donc que chaque rue qui constitue cette intersection peut être représentée par l'approche *rue-canyon*. Les façades des bâtiments, les toits et le sol seront supposés plans, et caractérisés par une rugosité aérodynamique uniforme.

Les types d'intersections rencontrées dans une zone urbaine sont très variés, et induisent des comportements aérodynamiques très différents. Pour simplifier le problème, nous proposons de classer ces intersections en deux grandes catégories :

- **Les intersections simples** : Une intersection simple se définit par un ensemble d'au moins deux segments de rue concourants en l'une de leurs extrémités. Des exemples d'intersections simples sont représentés sur les figures III.1.1-a à c. Une intersection de ce type est entièrement définie par les caractéristiques des rues qui la composent et par la position du point de concours, centre de l'intersection. On peut remarquer que deux segments de rue peuvent former une intersection si les caractéristiques de ces segments (largeur, hauteur, orientation) sont différentes. Le cas le plus fréquent d'intersection simple est le croisement entre deux rues perpendiculaires.
- **Les places** : Il arrive fréquemment que l'espace défini par une intersection simple soit élargi pour former ce que nous appellerons une *place* (cf. figures III.1.1-d à f). Une place est généralement de forme circulaire ou rectangulaire, cette forme étant un paramètre supplémentaire pour définir l'intersection. Lorsqu'une place est suffisamment grande, il est possible que les segments de rue ne soient plus concourants (cf. figure III.1.1-f).

L'élément distinctif entre ces deux typologies d'intersections est la taille de la zone d'intersection. Dans une intersection simple, cette zone est réduite et la surface d'échange avec l'atmosphère extérieure est limitée. Dans le cas d'une place, cette zone peut devenir très importante, augmentant ainsi l'échange avec l'extérieur. Le type d'intersection déterminera donc le régime d'écoulement et les échanges de polluants qui se développent à ce niveau. Nous allons revenir sur ce point en nous intéressant maintenant à l'analyse des phénomènes de transport.

III.1.2 Modèle de transport des polluants dans une intersection

L'écoulement et la dispersion à l'intérieur d'une intersection sont des phénomènes particulièrement complexes. La description détaillée de l'écoulement dans différentes configurations,

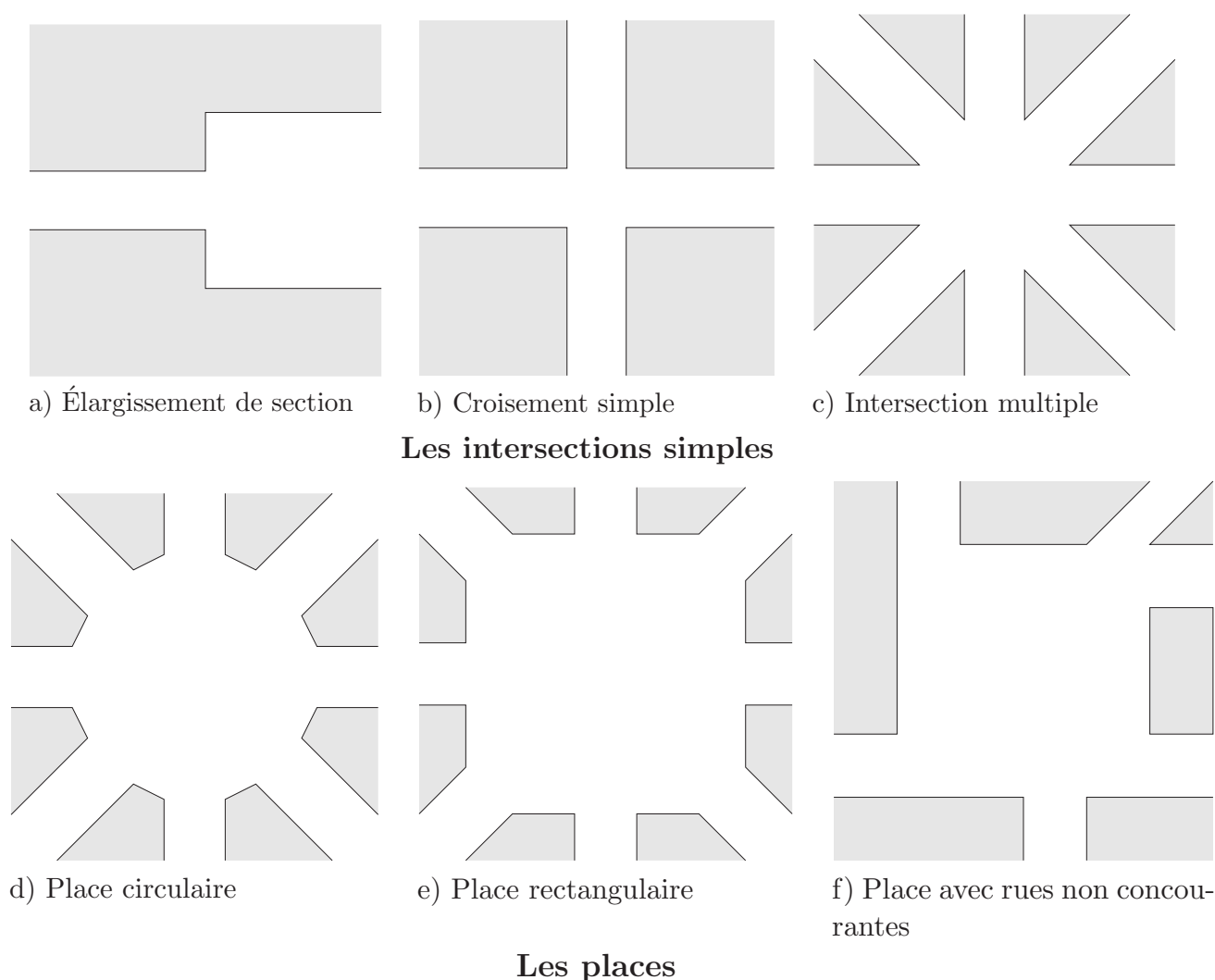


Figure III.1.1 – *Différents types d'intersections: simples (a,b,c), avec place (d,e,f).*

à l'aide de modèles numériques ou d'expériences en soufflerie, fournit une grande quantité d'informations, qui s'avèrent indispensables mais dont il est souvent difficile d'extraire des conclusions générales. Il est donc important de faire une analyse phénoménologique préalable des principaux mécanismes de transport. L'objectif de cette analyse est de construire un modèle simple de transport des polluants dans une intersection.

L'analyse géométrique effectuée précédemment a permis de différencier deux types de carrefours, en fonction de la taille de la *zone d'intersection*. Par analogie à la classification proposée par OKE (1988) pour l'écoulement dans une rue-canyon (cf. chapitre II.2), il est vraisemblable qu'il existe plusieurs régimes d'écoulement dans une intersection, en fonction de la taille de cette zone. Dans le cas d'une intersection simple, l'écoulement interne sera relativement confiné et l'écoulement extérieur peu modifié (ce régime est à rapprocher du régime de *skimming flow* pour la rue). Par contre, dans le cas des grandes places, l'écoulement extérieur sera modifié car il pourra pénétrer plus largement dans l'intersection. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de critère définissant la transition entre ces deux régimes d'écoulement. Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons à des zones d'intersection de petite taille, où l'écoulement interne est confiné. La recherche du critère de transition et la modélisation des places devront faire l'objet d'études ultérieures.

L'objectif principal du modèle d'intersection que nous allons développer est de déterminer les flux de polluants échangés entre les différentes rues connectées. Pour cela, nous proposons de décomposer le problème en deux étapes. Dans une première étape, nous déterminerons quels sont

les flux moyens d'air traversant l'intersection et comment ils s'organisent. Dans une deuxième étape, nous nous intéresserons au transport et à la diffusion turbulente des polluants advectés par ces flux d'air. Ces mécanismes permettront par exemple d'expliquer les hétérogénéités du champ de concentration au sein de l'intersection (HOYDYSH et DABBERDT, 1994) ou le mélange des polluants issus de différentes rues.

III.1.2.1 Écoulement moyen

L'écoulement d'air dans une intersection de rues est un phénomène complexe qui met en jeu des interactions entre les écoulements dans les différentes rues. Au cours de l'analyse des simulations numériques et des expériences en soufflerie que nous avons réalisées, nous illustrerons quelques détails de ce type d'écoulement. Mais pour modéliser les caractéristiques principales de ce problème, il est nécessaire d'effectuer des hypothèses simplificatrices.

La principale hypothèse que nous utiliserons porte sur le découplage entre l'écoulement dans la rue et l'écoulement dans l'intersection. Nous supposerons en effet que l'écoulement qui se développe dans chaque tronçon de rue est indépendant de la présence des intersections. Nous supposerons également que cet écoulement est équivalent à celui que l'on aurait dans une rue de longueur infinie. Dans notre esprit, cette hypothèse s'apparente à un postulat, qui n'a pas de justification a priori. Nous allons construire notre modèle sur ce postulat et nous vérifierons que les conséquences qui en découlent sont approximativement en accord avec les expériences ou les simulations numériques. Néanmoins, il est possible d'interpréter physiquement cette hypothèse du point de vue de l'écoulement dans la rue. Étant donné qu'il n'existe pas de source de quantité de mouvement à l'intérieur de la rue – à l'exception du déplacement des véhicules que nous négligerons en première approximation – l'écoulement dans la rue ne peut être induit que par l'écoulement extérieur ou par une différence de pression entre ses extrémités. L'hypothèse que nous avons effectuée revient à supposer que le premier effet est prépondérant devant le second, principalement en raison de la longueur de la rue (définissant la zone d'échange avec l'écoulement extérieur) qui est grande par rapport à la dimension de ses extrémités.

Il ne faut pas cacher que cette hypothèse est très simplificatrice. En effet, nous avons montré au chapitre II.4 que la présence des intersections aux extrémités d'un tronçon de rue modifie sensiblement les caractéristiques de l'écoulement à l'intérieur de celui-ci. Le modèle proposé constitue donc une première approximation, dans laquelle les phénomènes sont semi-couplés, puisqu'on ne modélise que l'effet des rues sur l'intersection. Dans une étape future, le modèle devra intégrer l'influence de l'intersection sur l'écoulement dans la rue.

III.1.2.1.1 Bilan des flux – Mouvement vertical

Pour effectuer un bilan aérodynamique des flux dans une intersection, définissons un volume de contrôle, constitué de $N + 1$ sections d'entrée ou de sortie (figure III.1.2). Les N sections verticales correspondent aux extrémités des N rues et la section horizontale correspond à l'interface entre l'intersection et l'écoulement extérieur. Aux frontières de ce domaine, nous avons supposé que l'écoulement dans chaque rue est de type rue-canyon et qu'il n'est pas perturbé par la présence de l'intersection. Le débit d'air \dot{V}_i traversant la section située à l'extrémité de la rue i ne dépend donc que des caractéristiques de cette rue et de l'écoulement extérieur. Du point de vue de l'intersection, ce débit est donc une condition imposée, qui peut être déterminée à partir de la vitesse longitudinale moyenne, exprimée au chapitre II.4. Connaissant ainsi le débit d'air sur N sections du volume de contrôle, il est possible de déterminer le flux vertical à travers la dernière section en appliquant l'équation de continuité. Si la somme des débits horizontaux

entrants est égale à la somme des débits horizontaux sortants, alors le flux vertical est nul. Par contre, si ces deux sommes ne sont pas égales, un mouvement vertical pourra apparaître.

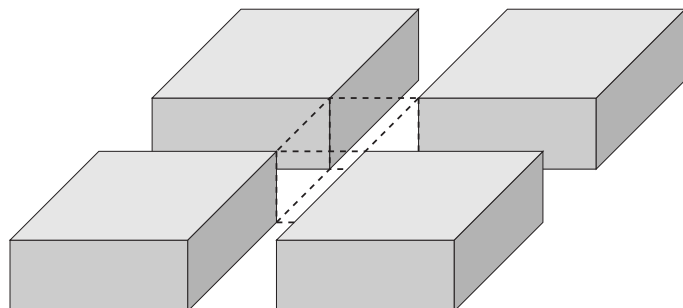


Figure III.1.2 – Volume de contrôle pour le bilan des flux.

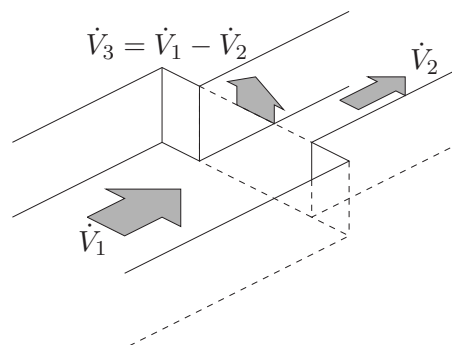


Figure III.1.3 – Exemple d'un flux vertical ascendant ($\dot{V}_1 > \dot{V}_2$).

Nous avons représenté, sur la figure III.1.3, un exemple d'intersection dans laquelle on peut observer la formation d'un mouvement vertical. Nous vérifierons, au paragraphe III.1.3, l'existence d'un tel mouvement.

La présence d'un flux vertical au sein de l'intersection va permettre un échange de polluants entre l'intérieur de la canopée urbaine et l'atmosphère extérieure. Cet échange s'effectuera essentiellement dans la partie supérieure de l'intersection. Dans la partie inférieure, la composante dominante de l'écoulement sera horizontale. Les flux d'air correspondants permettront des échanges de matière entre les différentes rues connectées. Pour modéliser la répartition de ces flux – c'est-à-dire pour déterminer le débit d'air circulant d'une rue vers une autre – nous allons supposer que la composante verticale de la vitesse peut être négligée dans cette partie inférieure. L'écoulement dans l'intersection est alors bidimensionnel. Cette hypothèse très simplificatrice n'a pas de justification a priori; nous vérifierons sa validité dans la suite de ce chapitre. La principale conséquence de cette hypothèse est que les lignes de courant moyennes issues des différentes rues ne peuvent pas se croiser dans l'intersection. Pour décrire ce type d'écoulement, nous allons utiliser un modèle potentiel bidimensionnel.

III.1.2.1.2 Modèle potentiel d'écoulement horizontal

Au cours du chapitre II.2, nous avons rappelé les hypothèses définissant un écoulement potentiel et le formalisme associé à cette notion. Même si ces hypothèses sont très restrictives et rarement vérifiées dans la pratique, l'approche potentielle peut, dans certains cas, constituer une première représentation réaliste des phénomènes observés. C'est pourquoi nous avons développé un modèle basé sur ce concept.

Considérons une intersection quelconque, constituée de N rues, comme celle illustrée sur la figure III.1.4. Le débit d'air entrant ou sortant de chacune des rues est supposé connu. En outre, nous considérerons que la somme des débits entrants est égale à la somme des débits sortants. Dans le cas, évoqué au paragraphe précédent, où les flux ne sont pas équilibrés et où un mouvement vertical apparaît, il est possible de se ramener à une telle situation en soustrayant, pour chaque rue, la part de flux échangé avec l'écoulement extérieur.

Connaissant les conditions limites du problème, il est possible de déterminer l'écoulement dans l'intersection en effectuant une transformation conforme de SCHWARZ-CHRISTOFFEL de la frontière polygonale. Dans le cas général d'une intersection quelconque, l'équation différentielle de SCHWARZ-CHRISTOFFEL n'admet pas de solution analytique simple. Il sera alors nécessaire

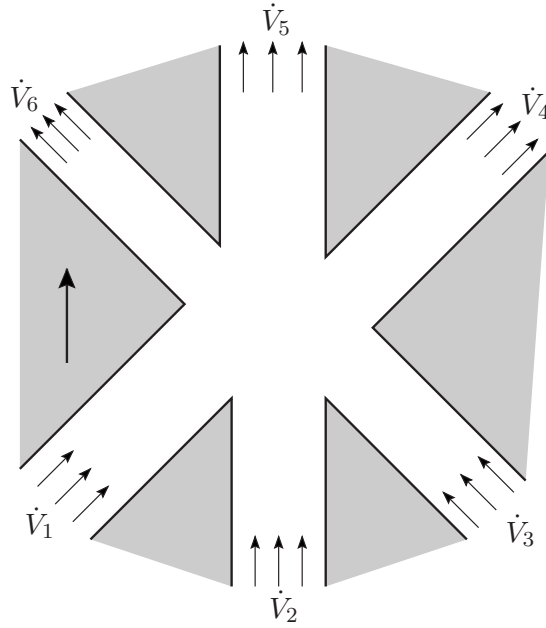


Figure III.1.4 – Représentation bidimensionnelle d'une intersection (la notation \dot{V} correspond au débit volumique de fluide).

d'utiliser la méthode de résolution numérique présentée au chapitre II.2. Cependant, afin de décrire la démarche adoptée sur un exemple concret, nous allons utiliser une solution analytique obtenue dans le cas simple d'un carrefour entre deux rues perpendiculaires.

Considérons l'intersection représentée sur la figure III.1.5, constituée de deux rues orthogonales de largeurs W_1 et W_2 quelconques. On suppose connues les vitesses U_1 et U_2 à l'infini dans chacune des rues. Ces vitesses dépendent de l'orientation du vent extérieur et peuvent être calculées à l'aide du modèle décrit au chapitre II.4. En appliquant une transformation conforme de SCHWARZ-CHRISTOFFEL, le plan physique s peut être projeté vers le plan ζ dans lequel l'image des parois solides est une droite (cf. figure III.1.5).

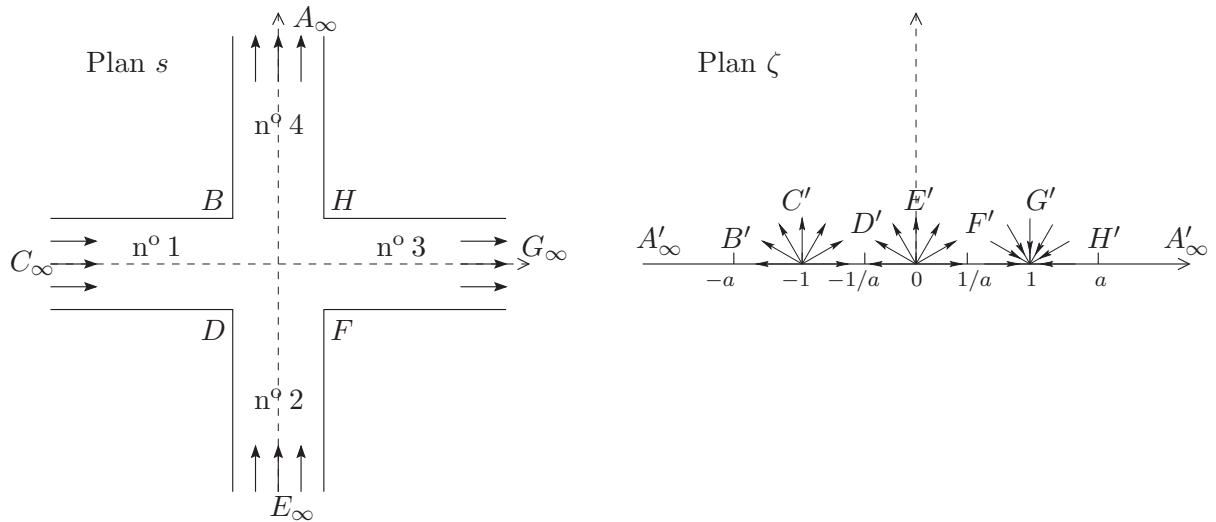


Figure III.1.5 – Écoulement potentiel dans une intersection: Transformation conforme de SCHWARZ-CHRISTOFFEL.

L'équation différentielle correspondante, reliant s et ζ , est fournie par la relation :

$$\frac{ds}{d\zeta} = K \frac{\sqrt{\zeta^2 - a^2} \sqrt{\zeta^2 - 1/a^2}}{\zeta(\zeta^2 - 1)} \quad (\text{III.1.1})$$

où K est une constante liée aux données du problème. En intégrant cette équation, on obtient l'expression suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} s = x + iy = \frac{K}{2} \left[\begin{array}{l} \ln \left(\frac{2a^2\zeta^2 - 1 - a^4}{a} + 2\sqrt{(a^2\zeta^2 - 1)(\zeta^2 - a^2)} \right) + \\ \ln \left(2\frac{a^4\zeta^2 + \zeta^2 - 2a^2}{a^3\zeta^2} - 4\frac{\sqrt{(a^2\zeta^2 - 1)(\zeta^2 - a^2)}}{a^2\zeta^2} \right) + \\ i(a - 1/a) \ln \left(\frac{-4\sqrt{(a^2\zeta^2 - 1)(\zeta^2 - a^2)} + 2i(a^2 - 1)(\zeta^2 + 1)}{(a^2 - 1)^2(\zeta^2 - 1)} \right) \end{array} \right] \\ W_1 = K\pi \frac{a^2 - 1}{2a} \\ W_2 = K\pi \end{array} \right. \quad (\text{III.1.2})$$

Dans l'espace ζ , les conditions de débit dans chaque rue à l'infini sont imposées en introduisant des sources ponctuelles aux points C' et E' et un puits au point G' . L'écoulement dans cet espace est alors déterminé par combinaison linéaire des solutions élémentaires. La fonction potentielle complexe ainsi obtenue s'écrit :

$$F = \phi + i\psi = \frac{U_1 W_1}{2\pi} \ln(\zeta + 1) + \frac{U_2 W_2}{2\pi} \ln(\zeta) - \frac{U_1 W_1}{2\pi} \ln(\zeta - 1) \quad (\text{III.1.3})$$

Finalement, on peut calculer analytiquement la fonction de courant et la fonction potentielle de l'écoulement dans l'espace réel en combinant les équations III.1.2 et III.1.3.

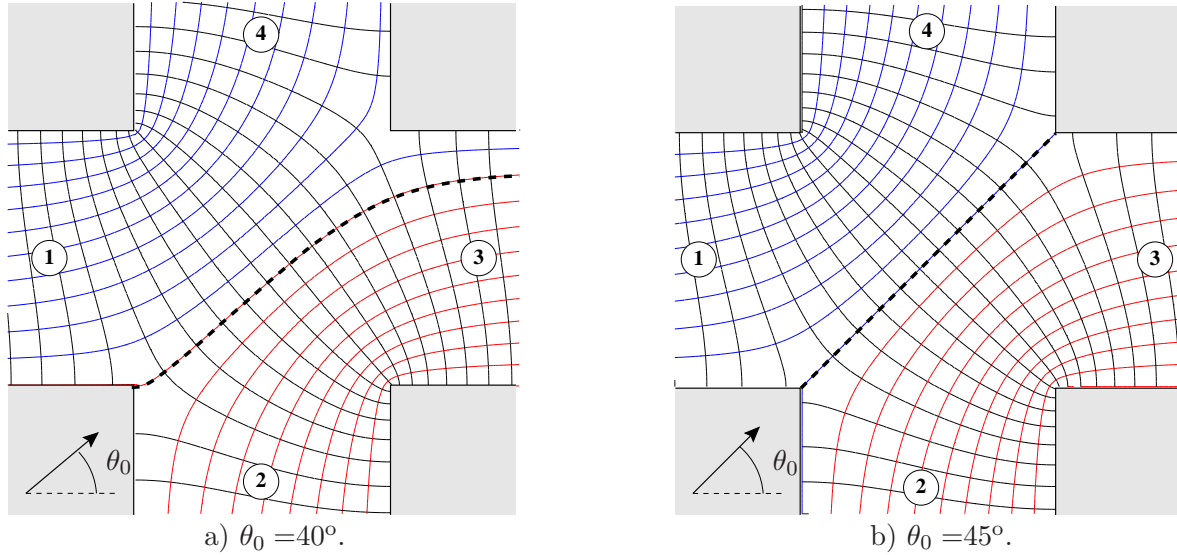


Figure III.1.6 – Écoulement potentiel dans une intersection : lignes de courant (en bleu pour le courant n° 1 et en rouge pour le courant n° 2) et lignes équipotentiels (en noir).

Les lignes de courant et les lignes équipotentiels obtenues par cette méthode sont représentées sur la figure III.1.6. Il est important de souligner que ce modèle d'écoulement n'est représentatif que du cœur de l'intersection ; à l'intérieur des rues, l'écoulement reprend un comportement de type rue-canyon, caractérisé par un mouvement hélicoïdal. Sur la figure III.1.6, on peut vérifier que les courants issus des deux rues amont ne se croisent pas, car l'écoulement est plan. On constate également que le flux circulant d'une rue vers une autre dépend de la direction du vent extérieur. Pour certaines directions du vent, un même courant amont peut alimenter plusieurs

rues aval. Inversement, plusieurs courants amont peuvent alimenter la même rue aval. Le transport convectif des polluants par l'écoulement moyen dépendra directement de ces mécanismes. Le modèle précédent pourra donc être utilisé pour évaluer le flux convectif de polluants circulant d'une rue amont vers une rue aval. On peut également observer, sur la figure III.1.6, la présence d'une ligne de séparation entre les deux courants amont. Cette ligne constitue une interface d'échange qui va permettre l'établissement d'un flux turbulent horizontal de polluants.

Le principe du modèle d'écoulement que nous venons de présenter va donc maintenant être utilisé pour déterminer le transport convectif et turbulent des polluants dans l'intersection.

III.1.2.2 Transport des polluants

Les flux de polluants dans l'intersection sont fortement liés aux différents flux d'air. Les polluants présents dans les rues amont sont advectés par l'écoulement à travers l'intersection jusque dans les rues aval. Lorsqu'il existe un mouvement d'air vertical, les polluants sont transportés par ce mouvement, en créant un échange avec l'atmosphère extérieure.

Les flux entrant dans l'intersection sont généralement connus, dans la mesure où l'on connaît les mouvements d'air et la concentration dans les rues situées en amont. L'objectif d'un modèle d'intersection est de déterminer la concentration – et donc le flux – sortant vers les rues situées en aval. Pour résoudre ce problème, YAMARTINO et WIEGAND (1986) supposent qu'il existe un mélange parfait au sein de l'intersection, de sorte que la concentration est homogène à l'intérieur et que les polluants ressortent uniformément répartis.

Considérons par exemple l'intersection représentée sur la figure III.1.4 et supposons que les rues n° 1, 2 et 3 advectent un polluant, uniformément réparti dans chaque rue, dont la concentration est respectivement C_1 , C_2 et C_3 . À partir de l'hypothèse de YAMARTINO et WIEGAND, la concentration moyenne entrant dans les rues aval est fournie par la relation :

$$C_4 = C_5 = C_6 = \frac{\dot{V}_1 C_1 + \dot{V}_2 C_2 + \dot{V}_3 C_3}{\dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3} \quad (\text{III.1.4})$$

où \dot{V}_i représente le débit d'air entrant dans l'intersection par la rue n° i . Ce modèle repose sur une hypothèse un peu trop simplificatrice ; en effet, plusieurs expériences (HOYDYSH et DABBERDT, 1994 ; SCAPERDAS et COLVILE, 1999) ont montré que la concentration dans une intersection est très hétérogène et que les flux sortant vers les rues aval ne sont pas uniformes.

Pour améliorer cette modélisation, il peut être intéressant de différencier les principaux phénomènes de transport dans l'intersection. On peut ainsi distinguer deux processus antagonistes :

- **L'advection par l'écoulement moyen** qui sera à l'origine des écarts de concentration dans l'intersection et des différences entre les rues situées en aval.
- **La diffusion turbulente** qui aura tendance à uniformiser cette concentration.

L'importance relative de ces deux processus déterminera la nature des comportements observés. Dans un premier temps, nous nous intéresserons au transport convectif en utilisant les résultats du modèle d'écoulement décrit précédemment. Dans un deuxième temps, nous détaillerons les mécanismes de diffusion et nous proposerons un modèle pour les représenter.

III.1.2.2.1 Transport convectif

Nous avons supposé précédemment que l'écoulement dans l'intersection est bidimensionnel. Cela implique que les flux convectifs de polluants, issus des différentes rues, ne peuvent pas se

croiser dans l'intersection. Dans l'exemple de la figure III.1.5, cela signifie que l'on ne peut pas avoir simultanément un flux circulant de la rue n° 1 vers la rue n° 3 et de la rue n° 2 vers la rue n° 4. La répartition des flux de polluants s'effectue alors uniquement en fonction des valeurs des différents débits d'air, comme cela est illustré sur les figures III.1.6-a et b, ou sur le schéma de la figure III.1.7.

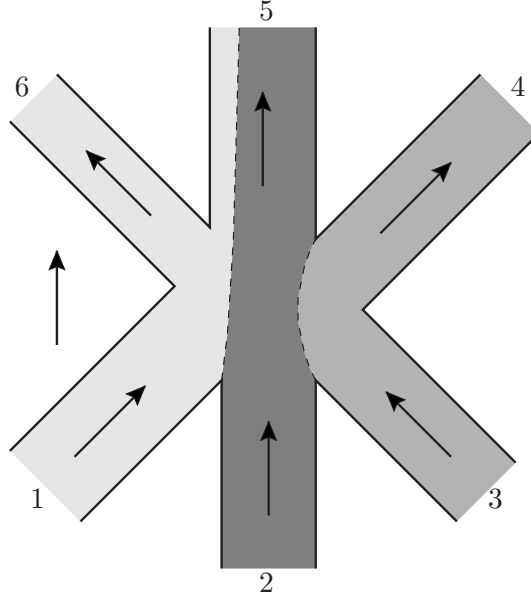


Figure III.1.7 – *Phénomènes de transports internes à l'intersection.*

Le modèle potentiel permet de calculer précisément la position des lignes de séparation entre les courants issus des rues n° 1, 2 et 3 de la figure III.1.7. Cependant, il apparaît clairement que ce modèle n'est pas nécessaire pour déterminer la répartition des flux ; un simple raisonnement explicatif permet d'aboutir au résultat. Sur la figure III.1.7, on constate en effet que la rue entrante la plus à gauche par rapport à la direction du vent (n° 1) commence par alimenter la rue sortante la plus à gauche (n° 6). Étant donné que, dans notre exemple, le débit d'air de la rue n° 1 est supérieur à celui de la rue n° 6, le flux excédentaire provenant de la rue n° 1 alimente également une partie de la rue n° 5. Le reste de cette rue est ensuite alimenté par la rue n° 2. Le raisonnement se poursuit jusqu'aux rues les plus à droite et permet de déterminer précisément les flux à travers chaque section de sortie. Les concentrations correspondantes peuvent alors être calculées à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} C_4 = C_3 \\ C_5 = \frac{(\dot{V}_1 - \dot{V}_6)C_1 + \dot{V}_2C_2}{\dot{V}_5} \\ C_6 = C_1 \end{cases} \quad (\text{III.1.5})$$

Pour obtenir ces expressions, nous avons considéré qu'il n'y avait pas de mouvement vertical d'air. Si ce mouvement existe, on supposera que l'écoulement demeure globalement bidimensionnel et que le flux de polluants associé à ce mouvement vertical est alimenté uniformément par l'ensemble des rues.

Pour généraliser ce formalisme, il est possible de définir un *tenseur d'échange convectif* $\mathcal{Q}(\theta)$, défini par :

$$\alpha_{i,j}(\theta) = \dot{V}_{i \rightarrow j} \quad (\text{III.1.6})$$

où $\alpha_{i,j}$ représente le flux d'air circulant de la rue i vers la rue j . À partir de cette définition, le

flux convectif de polluants pénétrant dans la rue n° j peut être calculé avec l'expression :

$$\mathcal{Q}_{E,j} = \sum_{i=1}^N \alpha_{i,j}(\theta) C_i \quad (\text{III.1.7})$$

Cette relation est très importante car elle définit le transport convectif dans l'intersection. Il faut noter que le tenseur $\mathcal{Q}(\theta)$ dépend de l'orientation θ du vent extérieur, comme on peut le constater en comparant les figures III.1.6-a et III.1.6-b.

III.1.2.2.2 Mécanismes de diffusion

La diffusion turbulente a pour effet d'homogénéiser la concentration en polluants dans l'intersection et dans les rues situées en aval. Les structures tourbillonnaires présentes dans l'écoulement, et susceptibles de participer à cette diffusion, ont des tailles caractéristiques qui varient de l'échelle de KOLMOGOROV (~ 1 mm) à la dimension de la couche limite atmosphérique (quelques centaines de mètres). Cependant, la géométrie de l'intersection, caractérisée par une échelle de longueur d , introduit une séparation dans le spectre des structures turbulentes. On peut en effet distinguer les structures de taille inférieure à d , qui pourront pénétrer dans l'intersection, et les tourbillons de taille supérieure qui seront “filtrés” par la présence des bâtiments. Ces deux gammes d'échelles contribuent de façon différente au mélange des polluants dans l'intersection :

- **Effet des petites structures, inférieures à la taille de l'intersection.** Nous avons montré qu'à l'intérieur de l'intersection, il existe une (ou plusieurs) ligne de séparation entre les courants convectifs provenant des différentes rues. De part et d'autre de cette ligne de séparation, les concentrations en polluants sont différentes. Les structures tourbillonnaires suffisamment petites pour pénétrer dans l'intersection peuvent créer un flux turbulent à travers cette interface, formant ainsi une couche de mélange turbulente. Comme dans le cas de la couche de mélange qui se développe à l'interface rue-atmosphère, seules les structures dont le temps caractéristique est inférieur au temps de convection (cf. chapitre II.1) permettent une diffusion effective.
- **Effet des grandes structures, supérieures à la taille de l'intersection.** Ces grandes structures provoquent une variation “en bloc” du champ de vitesse extérieure, et en particulier de la direction du vent. Or nous avons mis en évidence que la répartition des flux (tenseur $\mathcal{Q}(\theta)$) est sensible à la direction du vent. La fluctuation de θ provoquera donc une oscillation horizontale de la ligne de séparation entre les courants issus des différentes rues. Cette oscillation se traduira alors par une diffusion latérale de la concentration en polluants.

L'importance relative de ces deux mécanismes n'est pas identique. Nous avons en effet montré, au chapitre I.3, que les grosses structures tourbillonnaires contribuent davantage à la diffusion que les petites. Pour illustrer ceci, il peut être intéressant d'exprimer la diffusivité turbulente sous la forme $\kappa = \sigma_v l$, où l est la taille caractéristique des plus grosses structures turbulentes. Si l'on considère que la fluctuation transversale de vitesse σ_v ne dépend pas de la taille des structures turbulentes, on constate que la diffusivité κ est d'autant plus importante que les structures tourbillonnaires de l'écoulement sont grosses. À l'intérieur de l'intersection, la dimension l de ces structures est de l'ordre de la dimension d de l'intersection (~ 10 – 50 m). Par contre, à l'extérieur, l sera beaucoup plus importante (~ 100 – 1000 m).

Pour cette raison, le mécanisme d'oscillation “en bloc” de l'écoulement, provoqué par les grandes structures, sera beaucoup plus efficace que la diffusion à l'intérieur de l'intersection.

C'est pourquoi, dans la suite de notre approche, nous ne modéliserons que le premier phénomène et nous négligerons le second.

III.1.2.2.3 Tenseur d'échange turbulent

Ayant identifié le principal mécanisme de diffusion, nous allons maintenant exprimer un tenseur d'échange prenant en compte les phénomènes turbulents. Pour définir la fluctuation de la direction du vent, introduisons la fonction densité de probabilité $f(\theta - \theta_0)$ de la direction θ du vent extérieur. L'angle θ_0 représente la direction moyenne du vent extérieur et σ_θ l'écart-type de la distribution f .

À partir du tenseur d'échange convectif $\mathcal{Q}(\theta)$, il est possible d'effectuer une intégration sur l'ensemble des directions du vent, afin de déterminer un tenseur d'échange turbulent $\widehat{\mathcal{Q}}(\theta_0)$:

$$\widehat{\mathcal{Q}}(\theta_0) = \int f(\theta - \theta_0) \cdot \mathcal{Q}(\theta) d\theta \quad (\text{III.1.8})$$

En supposant que la répartition des angles vérifie une distribution gaussienne¹, la fonction f s'exprime alors :

$$f(\theta - \theta_0) = \frac{1}{\sigma_\theta \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta - \theta_0}{\sigma_\theta} \right)^2 \right] \quad (\text{III.1.9})$$

Connaissant les coefficients $\alpha_{i,j}(\theta)$ à l'aide de l'équation III.1.6, on peut aisément calculer les coefficients turbulents $\widehat{\alpha}_{i,j}(\theta_0)$. Le tenseur $\widehat{\mathcal{Q}}(\theta_0)$ exprime le flux *moyen* d'air circulant d'une rue vers une autre. Au cours du chapitre III.2, ce tenseur sera appliqué dans le modèle de réseau de rues *SIRANE*, pour représenter les échanges de polluants au sein d'une intersection.

Le paramètre qui joue un rôle prépondérant sur la diffusion dans l'intersection est donc l'écart-type σ_θ de la direction du vent. Pour exprimer ce paramètre, BLACKADAR (1997) propose une formule simple utilisant la fluctuation transversale de vitesse σ_v et la vitesse moyenne \bar{u} :

$$\sigma_\theta \simeq \frac{\sigma_v}{\bar{u}} \text{ où } \sigma_\theta \text{ est exprimé en radians.} \quad (\text{III.1.10})$$

Les valeurs caractéristiques de σ_θ rencontrées dans l'atmosphère ont également été tabulées en fonction des classes de stabilité de PASQUILL. Nous avons reporté dans le tableau III.1.1 les valeurs habituellement utilisées.

Classe de stabilité de PASQUILL	A	B	C	D	E	F
σ_θ	25°	20°	15°	10°	5°	2,5°

Tableau III.1.1 – Écart-type de la direction du vent pour différentes classes de stabilité.

III.1.2.2.4 Application au modèle potentiel

Afin d'illustrer le mécanisme de diffusion décrit précédemment, nous avons utilisé le modèle d'écoulement potentiel pour déterminer l'effet de la dispersion turbulente sur le champ de concentration dans l'intersection.

1. On sait que cette hypothèse n'est pas vérifiée en pratique. En effet, la turbulence n'est pas parfaitement gaussienne, car cela supposerait que tous les moments de vitesse, d'ordre supérieur à 2, puissent être calculés uniquement à partir des deux premiers moments (FRISCH, 1995). Cependant, cette hypothèse constitue souvent une approximation relativement réaliste des phénomènes.

Nous avons vu que le modèle d'écoulement nous permet de déterminer la ligne de séparation entre les courants provenant des différentes rues amont. Connaissant la concentration dans chacune de ces rues, il est facile de déterminer la concentration dans chaque courant – et donc en chaque point de l'intersection – dans l'hypothèse où il n'existe pas d'échange entre ces courants. Soit $c(\theta, x, y)$ la concentration correspondant à une direction de vent θ . Par analogie à l'équation III.1.8, on peut alors exprimer la concentration moyenne, en utilisant l'intégration :

$$\widehat{c}(\theta_0, x, y) = \int f(\theta - \theta_0) \cdot c(\theta, x, y) d\theta \quad (\text{III.1.11})$$

Des champs de concentration obtenus avec cette méthode ont été illustrés sur les figures III.1.8-a et b. On observe que la fluctuation angulaire provoque l'apparition d'une zone de *mélange statistique*, autour de la ligne de courant de séparation. Le terme de *mélange statistique* est employé pour indiquer qu'il n'existe pas de mélange proprement dit, mais plutôt une superposition de mécanismes d'advection pure, d'orientation différente, qui donne l'illusion d'une diffusion lorsque l'on applique une moyenne statistique. Pour $\theta_0 = 40^\circ$, cette diffusion permet à une petite partie des polluants de la rue n° 2 d'être transportés vers la rue n° 4, ce qui n'aurait pas été possible en l'absence de turbulence.

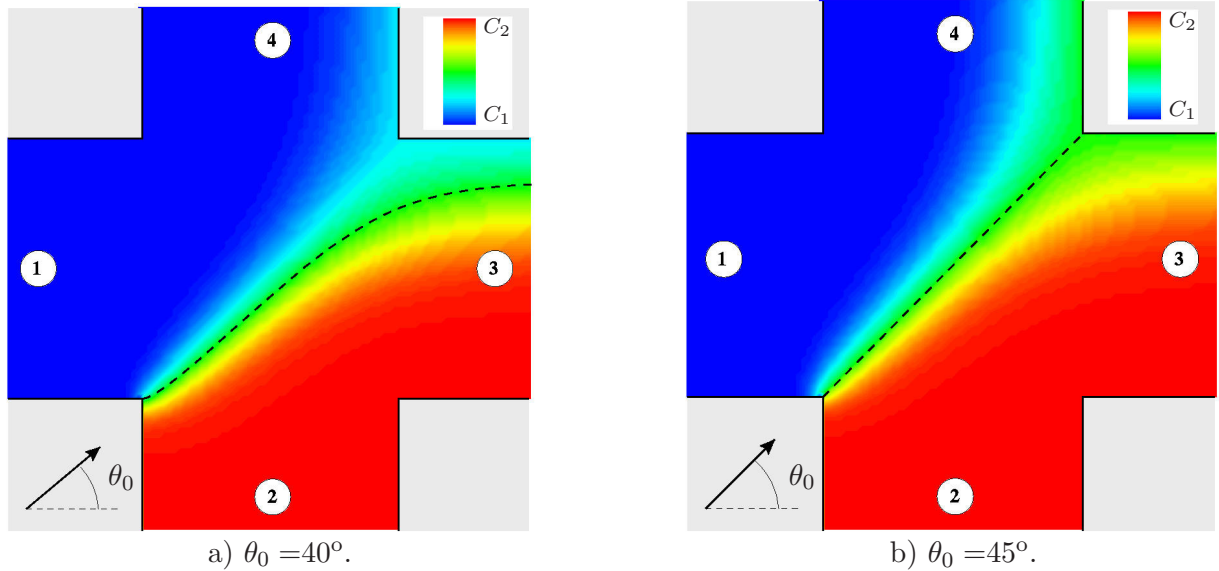


Figure III.1.8 – *Champ de concentration dans une intersection. Application du modèle potentiel pour le calcul de la dispersion ($\sigma_\theta = 7^\circ$).*

III.1.2.3 Bilan

Le modèle que nous venons de présenter permet de décrire les principales caractéristiques de l'écoulement et de la dispersion au sein d'une intersection de rues. L'utilisation d'une approche potentielle nous a permis de mieux comprendre la topologie de l'écoulement et la répartition de la concentration en polluants dans l'intersection. Cependant, nous avons montré que pour estimer les flux de polluants circulant d'une rue vers une autre, cette approche n'est pas nécessaire et l'on peut se contenter de calculer un tenseur d'échange turbulent.

Ce modèle constitue une amélioration sensible par rapport au modèle proposé par YAMARTINO et WIEGAND (1986). Notre modèle permet de distinguer l'advection des polluants – sensible à la topologie de l'écoulement dans l'intersection – et leur dispersion sous l'effet de la fluctuation du vent extérieur.

Ce modèle d'intersection décrit les flux moyens de polluants lorsque la concentration est homogène dans les rues amont. Or, dans les précédents chapitres, nous avons déjà démontré que ce n'est pas le cas en pratique. Il apparaît alors clairement que l'hétérogénéité du champ de concentration amont ne va pas se répartir uniformément dans les rues situées en aval. La modélisation quantitative des phénomènes devient alors difficile avec des modèles simples et nécessite d'utiliser des outils de simulation numérique ou expérimentale.

Dans la suite de ce chapitre, nous proposons de tester les hypothèses de ce modèle, en nous appuyant sur l'analyse de modélisations numériques, réalisées avec le code *MERCURE*, et pour certains cas sur l'analyse d'expériences en soufflerie. Nous nous limiterons principalement à l'étude des intersections simples. Malgré cette restriction et malgré l'utilisation d'une géométrie simplifiée, le problème reste dépendant de nombreux paramètres. Il n'est donc pas envisageable de faire une étude de sensibilité systématique sur tous ces paramètres. C'est pourquoi nous avons choisi de nous limiter à l'étude de quelques configurations caractéristiques, mettant en évidence les principaux mécanismes de transport des polluants au sein d'une intersection. Ce travail constitue donc un premier pas dans l'étude de la dispersion des polluants au niveau des intersections.

Dans un premier temps, nous étudierons le cas d'une variation de section d'une rue, afin de mettre en évidence les mouvements d'air verticaux. Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons au cas d'un carrefour entre deux rues perpendiculaires, afin d'étudier les différents flux horizontaux d'air et de polluants. Enfin, dans un troisième temps, nous présenterons quelques résultats concernant le cas d'une place de petite taille.

III.1.3 Variation de section d'une rue

Pour mettre en évidence les mouvements verticaux dans une intersection, nous allons étudier, dans ce paragraphe, une intersection constituée par la jonction de deux rues de sections différentes, orientées dans la direction du vent. Les variations brusques de section ont été beaucoup étudiées dans le cas des écoulements en conduites (ROSCHÉ et BLACK, 1976 ; MOON et RUDINGER, 1977). Ces travaux ont mis en évidence l'importance de la forme géométrique de la transition de section sur la perte de charge induite sur l'écoulement (BLEVINS, 1984).

Dans le cas d'un écoulement atmosphérique, les phénomènes physiques sont différents car la possibilité d'un mouvement vertical modifie la nature de l'écoulement. Cependant, la forme de la transition de section reste certainement très importante. Dans notre étude, nous nous limiterons aux cas d'un rétrécissement et d'un élargissement brusque.

III.1.3.1 Description

Les deux configurations géométriques étudiées sont représentées sur les figures III.1.9 et III.1.10. Le rapport d'aspect H/W de la rue la plus large est de 0,5 et celui de la rue la plus étroite est de 1. Les rues sont délimitées par des bâtiments de même hauteur et sans toit en pente. La hauteur des bâtiments utilisés dans cet exemple est de 20 mètres.

Les résultats présentés par la suite ont été obtenus numériquement avec le code *MERCURE*. L'écoulement extérieur est défini par un profil de couche limite dont la hauteur de déplacement est égale à la hauteur des bâtiments et dont la rugosité aérodynamique est de 5 cm. Compte tenu de la symétrie du problème, seul un demi-espace (correspondant à $y \geq 0$) a été simulé. Les caractéristiques des maillages utilisés sont résumées en annexe B.

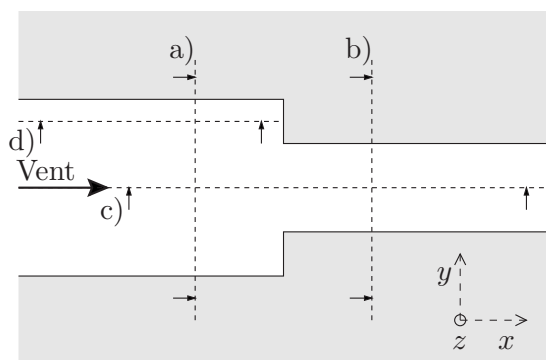


Figure III.1.9 – Rétrécissement de rue. Les plans de coupe de la figure III.1.11 sont représentés en pointillés.

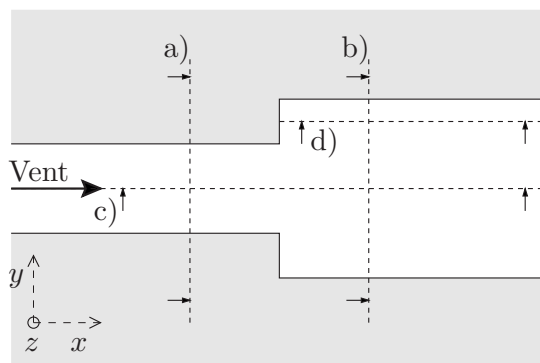


Figure III.1.10 – Élargissement de rue. Les plans de coupe de la figure III.1.12 sont représentés en pointillés.

III.1.3.2 Rétrécissement de rue

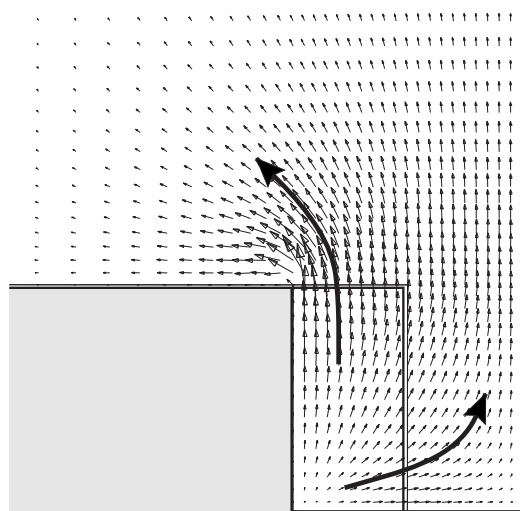
L'écoulement à l'intérieur des rues, loin de l'intersection, présente des caractéristiques analogues à celles d'un écoulement dans des rues équivalentes, de longueur infinie. Au voisinage de la jonction, le champ de vitesse se modifie. En raison de la différence de section entre l'amont et l'aval de l'intersection, le débit d'air dans les deux rues est différent. Il en résulte un mouvement d'air vertical de l'intérieur vers l'extérieur de l'intersection, permettant de garantir l'équation de continuité. Ce mouvement apparaît nettement sur les coupes transversales III.1.11-a et b. L'air présent dans la partie basse de la rue amont converge dans la rue aval (figure III.1.11-e), tandis que l'air présent dans la partie haute s'élève pour sortir de la rue (figure III.1.11-d). Cette distinction est importante car la pollution est généralement localisée dans la partie basse de la rue. Le mouvement vertical est faible sur l'axe de la rue (figure III.1.11-c) et il est plus important sur le côté, au niveau du décrochement (figure III.1.11-d). Ce phénomène s'explique par l'influence des effets visqueux, qui empêchent la perturbation, induite sur les côtés par le rétrécissement, de se propager immédiatement vers le centre de la rue.

Le mouvement vertical s'accompagne de quelques écoulements secondaires. Juste à l'amont du bâtiment aval (figure III.1.11-d) se forme un tourbillon qui s'étire en forme de fer à cheval jusque dans la rue aval (figure III.1.11-b). Au-dessus des toits, en aval de l'intersection (figure III.1.11-b), un autre tourbillon est généré par le mouvement vertical de l'air provenant de la rue. Dans le cas d'un rétrécissement brusque à l'intérieur d'un tuyau cylindrique, on observe généralement un phénomène de décollement des lignes de courant juste en aval du rétrécissement. Ce phénomène, appelé *vena contracta*, n'a pas été observé dans le cas de notre écoulement. Cela est certainement dû à la présence d'un mouvement vertical vers l'écoulement extérieur. Finalement, la structure générale de l'écoulement observé est résumée sur le schéma de la figure III.1.11-f.

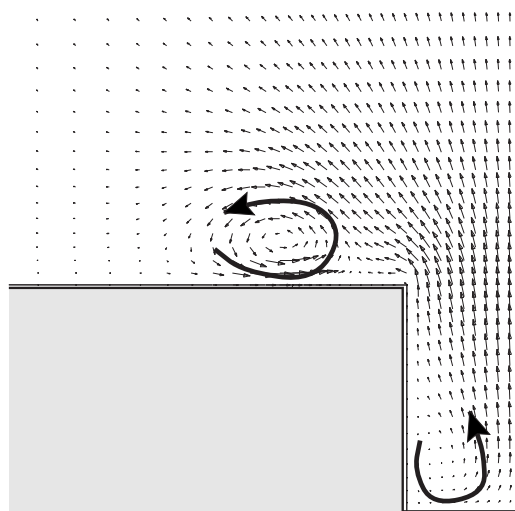
III.1.3.3 Élargissement de rue

La nature de l'écoulement dans un élargissement de section est assez différente de celle observée dans un rétrécissement. Comme dans le cas précédent, l'écoulement dans les rues, loin de l'intersection, est analogue à un écoulement dans une rue infinie.

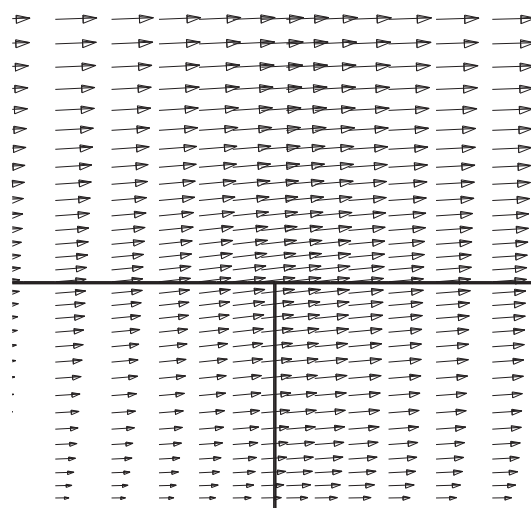
La différence de section entre l'amont et l'aval de l'intersection génère un mouvement vertical de l'extérieur vers l'intérieur (figures III.1.11-a et b). Ce mouvement est négligeable au centre de la rue (figure III.1.11-c) ; il devient important sur les côtés, dans la zone d'élargissement (figure III.1.11-d). Au niveau de cette zone se forme une recirculation, constituée de la superposition d'un tourbillon dans le plan vertical (figure III.1.11-d) et d'un tourbillon dans le plan horizontal (figure III.1.11-e). L'extension de cette zone de recirculation est de 40 mètres, soit quatre fois la taille de la marche d'élargissement dans le plan horizontal.



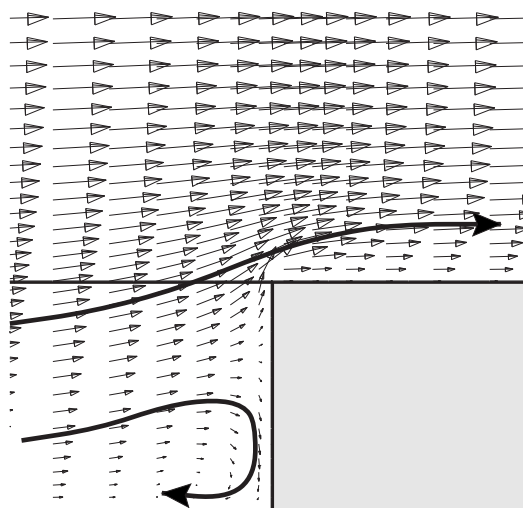
a) Section verticale transversale y-z en amont de l'intersection ($x = -20$ m).



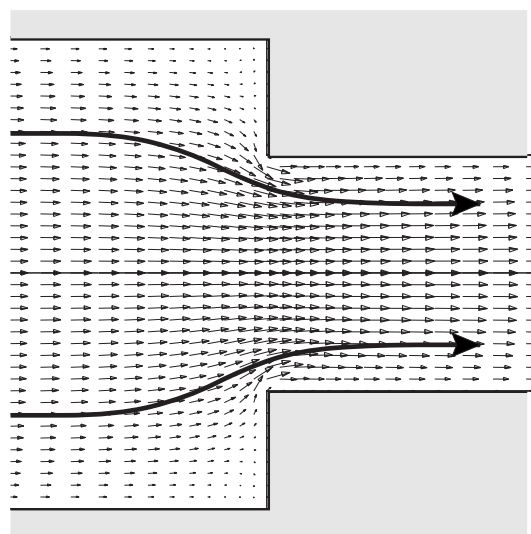
b) Section verticale transversale y-z en aval de l'intersection ($x = 20$ m).



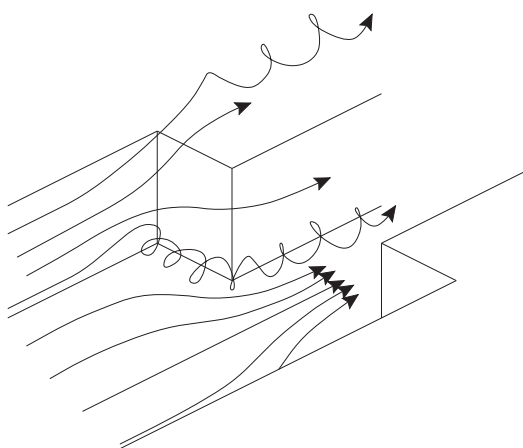
c) Section verticale longitudinale x-z sur l'axe de la rue ($y = 0$).



d) Section verticale longitudinale x-z à $y = 15$ m.

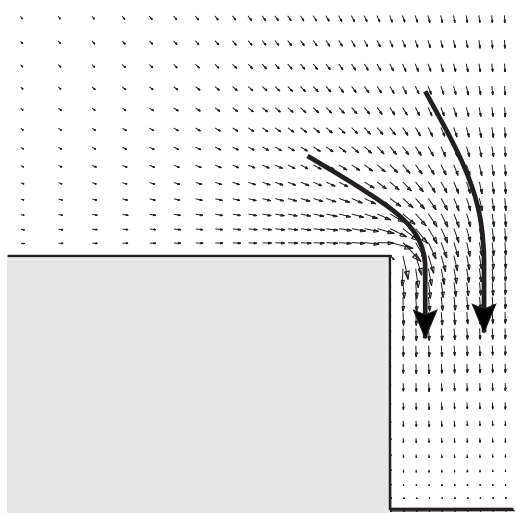


e) Section horizontale x-y à $z = 10$ m.

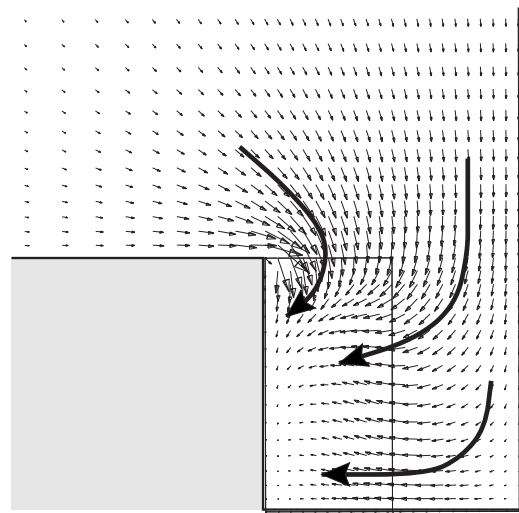


f) Schéma de principe de l'écoulement.

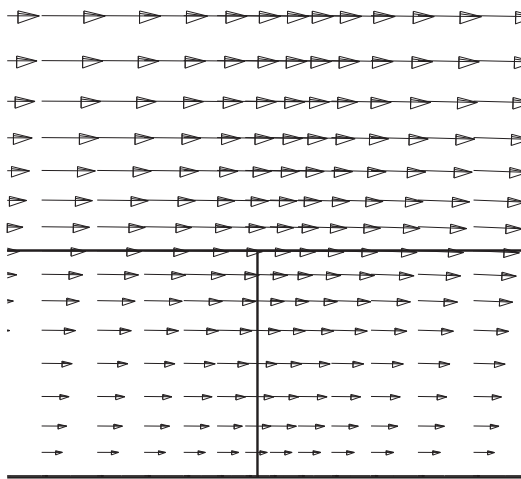
Figure III.1.11 – Écoulement dans un rétrécissement de rue (Simulation MERCURE). Champ de vent dans différentes sections et schéma de synthèse de l'écoulement.



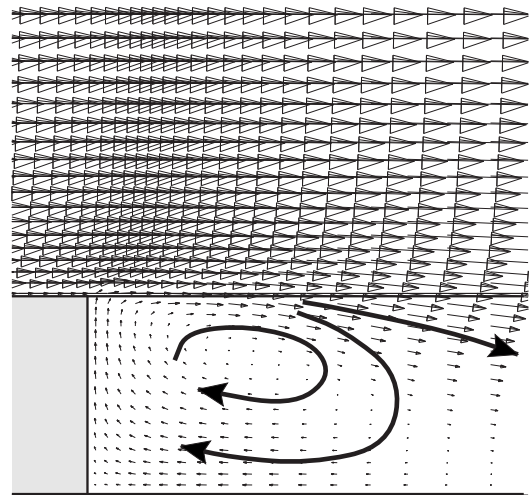
a) Section verticale transversale y - z en amont de l'intersection ($x = -20$ m).



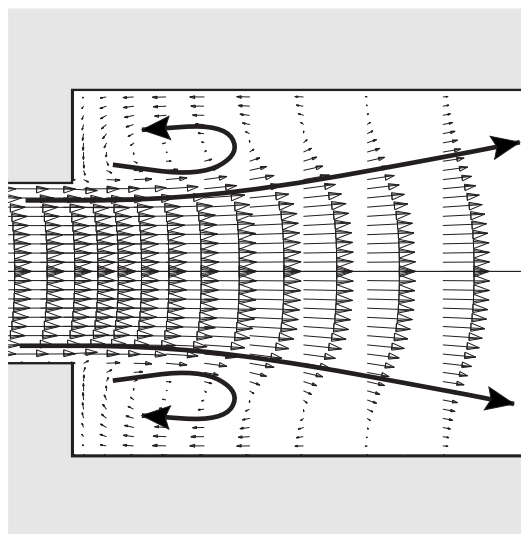
b) Section verticale transversale y - z en aval de l'intersection ($x = 20$ m).



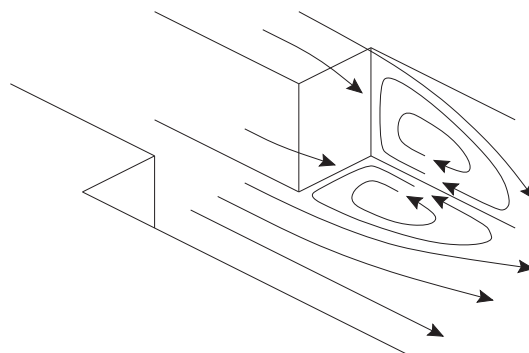
c) Section verticale longitudinale x - z sur l'axe de la rue ($y = 0$).



d) Section verticale longitudinale x - z à $y = 15$ m.



e) Section horizontale x - y à $z = 10$ m.



f) Schéma de principe de l'écoulement.

Figure III.1.12 – Écoulement dans un élargissement de rue (Simulation MERCURE). Champ de vent dans différentes sections et schéma de synthèse de l'écoulement.

La structure générale de l'écoulement est synthétisée sur la figure III.1.12-f. Le comportement observé s'apparente à l'écoulement d'un jet confiné. L'air sortant de la rue amont entraîne dans le jet le fluide situé sur les côtés. Parallèlement, la vitesse moyenne au centre de la rue diminue jusqu'à ce que l'écoulement s'établisse dans la rue aval. Dans le cas similaire d'un jet plan placé entre deux parois (CHERDRON *et al.*, 1978), des expériences ont montré l'apparition d'une instabilité qui provoque le déplacement du jet vers l'une des parois (phénomène expliqué par l'effet COANDA). Dans notre simulation, la condition de symétrie, imposée numériquement, empêche la formation de ce phénomène. On peut cependant penser – mais cela reste à vérifier – que même sans cette condition de symétrie, l'entraînement par l'écoulement extérieur aurait un effet stabilisant qui limiterait l'apparition d'un déplacement latéral.

III.1.3.4 Bilan

Les résultats obtenus numériquement sur des variations de section de rue nous ont essentiellement permis de vérifier le comportement suivant. *Lorsque les largeurs des rues sont telles que le débit d'air circulant dans les rues situées à l'amont de l'intersection est différent de celui circulant dans les rues en aval, il apparaît un mouvement vertical résultant de la conservation de la masse.* Ce résultat vient conforter le modèle d'intersection proposé au début de ce chapitre.

III.1.4 Intersection entre deux rues perpendiculaires

Le cas d'un carrefour entre deux rues perpendiculaires constitue la configuration la plus courante d'intersection. Pour cette raison, nous avons effectué une étude particulièrement détaillée de cette situation, en utilisant des simulations numériques et des expériences en soufflerie. L'intersection étudiée expérimentalement est placée à l'intérieur d'un réseau de rues, afin de s'affranchir des effets aérodynamiques apparaissant à l'amont des obstacles. Par contre, il est préférable numériquement d'étudier une intersection isolée, afin de limiter le temps de calcul nécessaire. Il existe donc une légère différence entre les deux configurations étudiées. Cependant, on constate de manière générale que les résultats obtenus avec les deux approches sont en assez bon accord, même si des différences apparaissent localement. Dans la présentation des résultats, nous alternerons les figures obtenues avec les deux méthodes, en fonction des spécificités de chacune, et nous présenterons plusieurs points de comparaison.

Dans un premier temps, nous avons étudié le cas d'un carrefour orienté dans la direction du vent. Dans un deuxième temps, nous avons effectué une étude de sensibilité au rapport d'aspect des rues et à la direction du vent.

III.1.4.1 Description

Le schéma de la géométrie utilisée dans le code *MERCURE* est représenté sur la figure III.1.13. En raison du temps de calcul nécessaire et du nombre important de cas à traiter, le domaine de calcul a été limité à une seule intersection. La hauteur caractéristique des bâtiments est de 20 mètres. La longueur des rues simulées est égale à cinq fois leur hauteur. Les caractéristiques détaillées de ce maillage sont fournies en annexe B. Des conditions de périodicité ont été utilisées sur les faces latérales du domaine pour permettre de déterminer une condition limite acceptable à l'entrée de ce domaine, en particulier lorsque l'orientation du vent est quelconque.

La configuration géométrique utilisée en soufflerie est représentée sur la figure III.1.14. Un des avantages de la soufflerie est de pouvoir facilement simuler des géométries complexes. Pour situer l'intersection dans un environnement plus réaliste, nous avons donc modélisé un petit quartier constitué d'un alignement de bâtiments. La hauteur des bâtiments est de 10 cm, ce qui

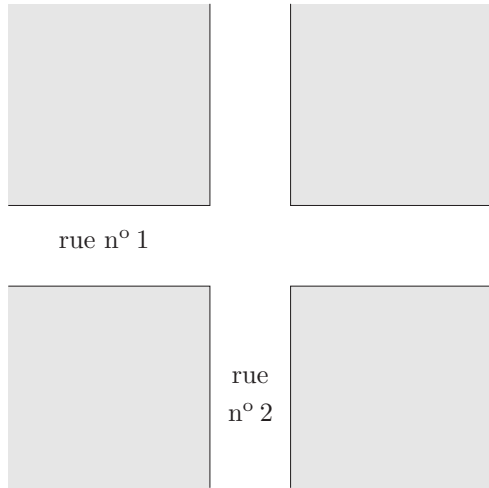


Figure III.1.13 – Géométrie utilisée avec le code *MERCURE*.

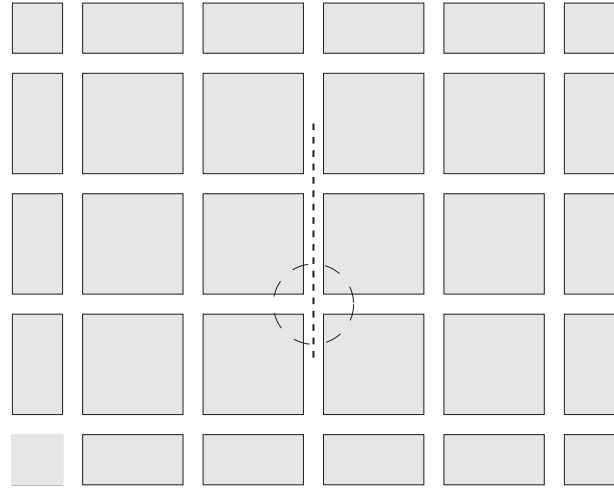


Figure III.1.14 – Géométrie utilisée en soufflerie. La source est symbolisée en pointillés. L'intersection étudiée est entourée par un cercle.

reproduit la simulation du code *MERCURE* à une échelle de $1/200^\circ$. La longueur L de chaque rue est égale à $5H$.

La source de traceur est placée sur l'axe de l'une des rues. Sa longueur est de $2L$, de sorte qu'elle couvre également l'intersection. Cette source (MERONEY *et al.*, 1996) émet un débit uniforme sur toute sa longueur.

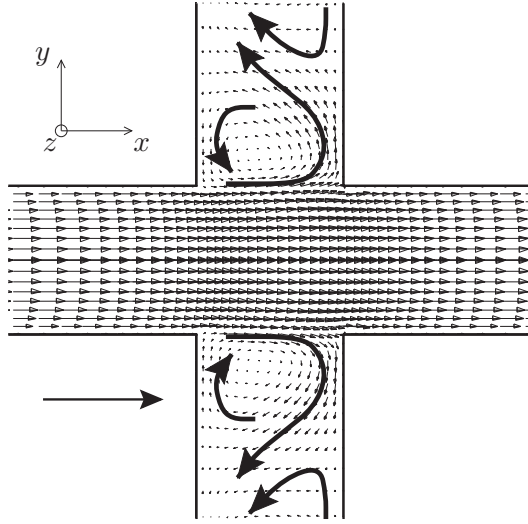
III.1.4.2 Étude d'un carrefour

Pour débiter, nous allons décrire en détail l'écoulement et la dispersion dans un carrefour lorsque le vent est parallèle à l'une des rues. Dans la suite, cette rue portera le n° 1 et la rue perpendiculaire le n° 2.

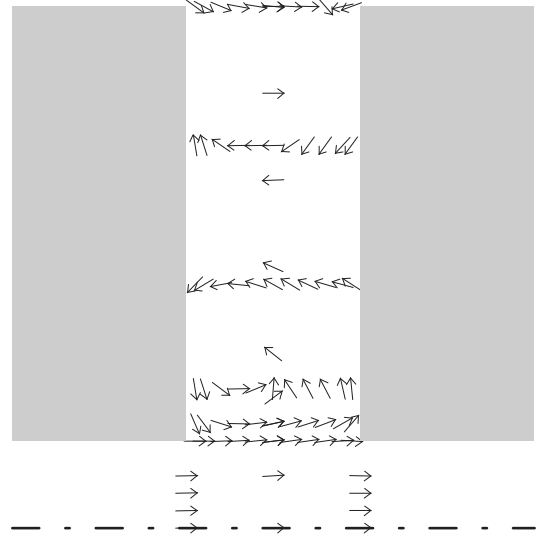
III.1.4.2.1 Topologie de l'écoulement

L'allure générale de l'écoulement dans l'intersection est représentée sur les figures III.1.15-a et III.1.15-b par une coupe horizontale du champ de vitesse à $z = H/2$. Les résultats obtenus numériquement et expérimentalement sont en bon accord. L'écoulement dans la rue n° 1 et dans l'intersection est parallèle à l'axe de la rue. On constate que l'écoulement dans l'intersection est très proche de l'écoulement dans une rue parallèle au vent, avec un écart de vitesse par rapport à cette configuration de l'ordre de 7 %. À l'intérieur de la rue n° 1, on peut considérer qu'il n'y a quasiment pas d'effet de l'intersection sur l'écoulement.

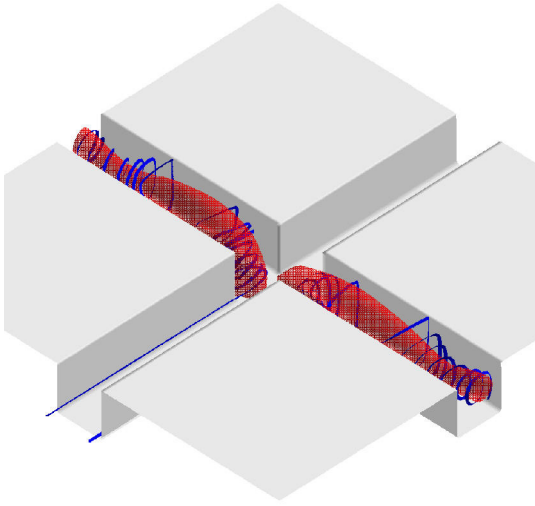
À l'extrémité de la rue n° 2 se forme un tourbillon d'axe vertical, généré par le mouvement dans la rue n° 1. Ce comportement est en accord avec les résultats numériques de HUNTER *et al.* (1990). Ce tourbillon s'étend à l'intérieur de la rue sur une distance de l'ordre de la largeur W de celle-ci. Au-delà de cette distance, on retrouve dans la rue n° 2 une recirculation d'axe horizontal, entraînée par l'écoulement qui circule au-dessus des toits. En fait, la transition entre ces deux recirculations n'est pas brutale puisqu'elles ne forment en réalité qu'un unique tourbillon coudé. Pour visualiser cet effet, nous avons réalisé sur la figure III.1.15-c une représentation tridimensionnelle de l'écoulement dans l'intersection. Le mouvement tourbillonnaire est illustré par une iso-surface de faible pression (en rouge), correspondant au cœur de cette recirculation, et par une ligne de courant particulière (en bleu). On observe nettement l'existence d'un filament tourbillonnaire, d'axe vertical au niveau de l'intersection, qui s'incurve pour devenir horizontal à l'intérieur de la rue et former la recirculation classique d'une rue-canyon perpendiculaire au vent. Cette topologie est schématisée simplement sur la figure III.1.15-d.



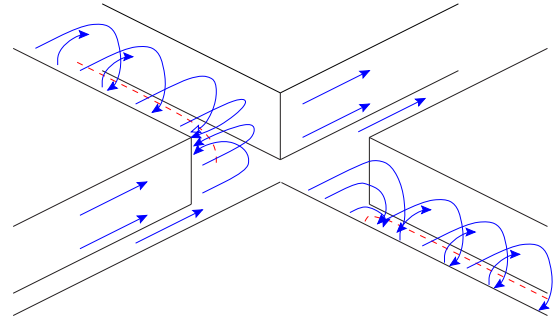
a) Champ de vitesse à $z = H/2$ (MERCURE).



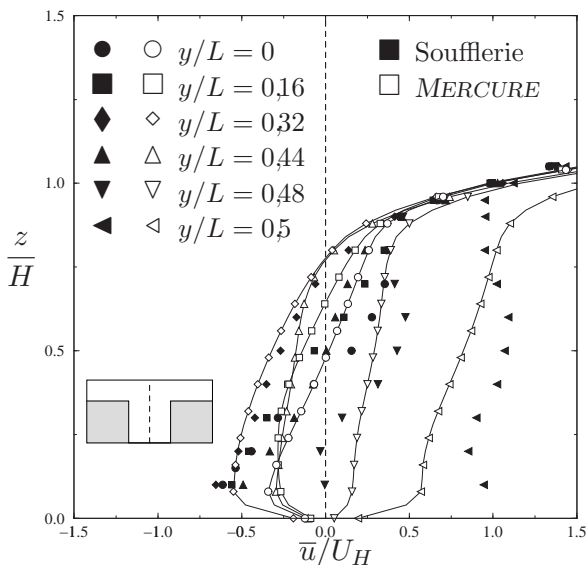
b) Champ de vitesse à $z = H/2$ (soufflerie). Les vecteurs représentent uniquement la direction de l'écoulement.



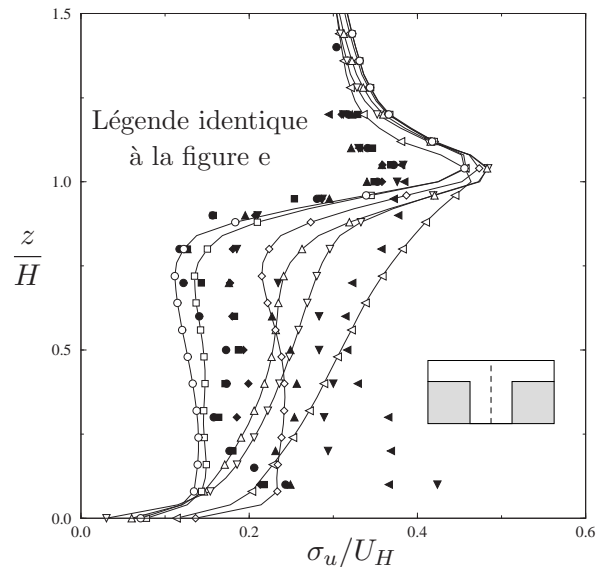
c) Vue 3D de l'écoulement (MERCURE). En rouge est représentée une iso-surface de basse pression et en bleu une ligne de courant.



d) Schéma de principe de l'écoulement.



e) Profils de vitesse moyenne dans la rue perpendiculaire pour différentes positions transversales y/L . Comparaison soufflerie-MERCURE.



f) Profils de fluctuation de vitesse dans la rue perpendiculaire pour différentes positions transversales y/L . Comparaison soufflerie-MERCURE.

Figure III.1.15 – Écoulement dans une intersection de rues. Visualisations et comparaisons soufflerie-MERCURE.

La structure de ce tourbillon tridimensionnel génère, dans la rue n° 2, plusieurs écoulements secondaires non négligeables (voir par exemple le haut de la figure III.1.15-a). Il est important de noter qu'au voisinage du sol, là où les polluants sont émis, il existe un mouvement orienté de l'intersection vers l'intérieur de la rue. Ce mouvement reste important jusqu'à une distance $2W$ de l'intersection, c'est-à-dire presque jusqu'au centre de la rue. Il est évident qu'un tel mouvement aura des effets importants sur la dispersion. Nous reviendrons sur son origine dans l'analyse des flux (paragraphe suivant).

Au chapitre II.2, nous avons étudié en détail l'écoulement dans une rue bidimensionnelle, perpendiculaire à l'écoulement extérieur. Il est donc intéressant d'étudier comment la présence de l'intersection modifie la solution bidimensionnelle dans la rue n° 2. Pour cela, nous avons tracé sur la figure III.1.15-e les profils numériques et expérimentaux de vitesse moyenne dans différentes sections de cette rue. Au centre de la rue ($y/L = 0$), on trouve un mouvement tourbillonnaire d'axe horizontal. Ce mouvement se maintient globalement jusqu'à $y/L = 0,44$. Au-delà, l'influence du tourbillon d'axe vertical devient prépondérante. La comparaison des deux approches indique la même tendance d'évolution. Cependant, on constate des écarts de vitesse qui révèlent des différences importantes dans le détail de l'écoulement. En ce qui concerne la fluctuation de vitesse longitudinale σ_u , le cisaillement de l'écoulement à l'extrémité de la rue n° 2 génère de la turbulence, qui est advectée par la structure tourbillonnaire vers l'intérieur de la rue. Cette fluctuation vient renforcer la turbulence créée par le cisaillement à l'interface rue-atmosphère. Cette contribution supplémentaire est importante au voisinage de l'intersection et devient négligeable pour $y/L < 0,32$.

Ces différents éléments nous permettent de conclure que la présence de l'intersection influence principalement la rue n° 2. Il se forme un tourbillon vertical à l'extrémité de cette rue. La recirculation caractéristique d'une rue bidimensionnelle est présente sur une grande partie de la rue, mais des écoulements secondaires non négligeables se superposent à ce mouvement.

III.1.4.2.2 Bilan des flux

Pour comprendre les échanges de matière entre les différentes rues, il peut être intéressant de faire un bilan des flux d'air aux limites de l'intersection. En accord avec ce que nous avons pu observer sur l'écoulement, la majorité du flux ($\simeq 90\%$) s'écoule de la rue n° 1-amont vers la rue n° 1-aval. Cependant, il existe également un flux convectif moyen non nul allant de l'intersection vers l'intérieur de la rue n° 2 (cf. schéma de la figure III.1.16). Ce mouvement est caractérisé par une vitesse de débit très faible, de l'ordre de quelques centimètres par seconde. Cependant il a été observé à la fois numériquement et expérimentalement, si bien que l'on peut considérer qu'il s'agit d'un comportement réel.

Ce flux entrant dans la rue n° 2 est illustré par la figure III.1.20-b. Sur cette figure, on constate qu'une partie des lignes de courant provenant de la rue n° 1-amont pénètrent dans la rue n° 2 (en bleu). Inversement, la totalité des lignes de courant traversant l'extrémité de la rue n° 2 proviennent de la rue n° 1-amont. Par contre, il n'existe aucun flux moyen de la rue n° 2 vers la rue n° 1.

Avant de rechercher une explication à ce phénomène, il faut tout d'abord constater qu'il entraîne une conséquence importante. En effet, puisqu'il existe un écoulement entrant par les deux extrémités de la rue n° 2, on doit pouvoir observer, en vertu de l'équation de continuité, un flux résultant sortant par la face supérieure de la rue. Nous avons effectué une analyse des simulations numériques qui confirme la présence d'un tel flux.

D'un point de vue topologique, cela signifie que les lignes de courant de l'écoulement moyen à l'intérieur de la rue n° 2 ne sont pas délimitées par une surface fermée. Ceci est en accord avec

les résultats de HUNT *et al.* (1978), qui ont montré qu’une zone de recirculation tridimensionnelle est nécessairement ouverte du point de vue de la topologie de l’écoulement. Cependant, comme nous l’avons remarqué au chapitre II.1, ce flux convectif, qui “traverse” la recirculation, est très faible. Il aura donc peu d’effet sur l’échange de polluants entre la rue et l’environnement extérieur (l’atmosphère ou les intersections). En effet, les vitesses de débit observées restent négligeables devant les échanges induits par les fluctuations turbulentes au niveau des interfaces. Par contre, le mouvement généré par ce flux convectif, orienté des extrémités vers le centre de la rue, aura des conséquences importantes sur la répartition de concentration en polluants à l’intérieur de la rue.

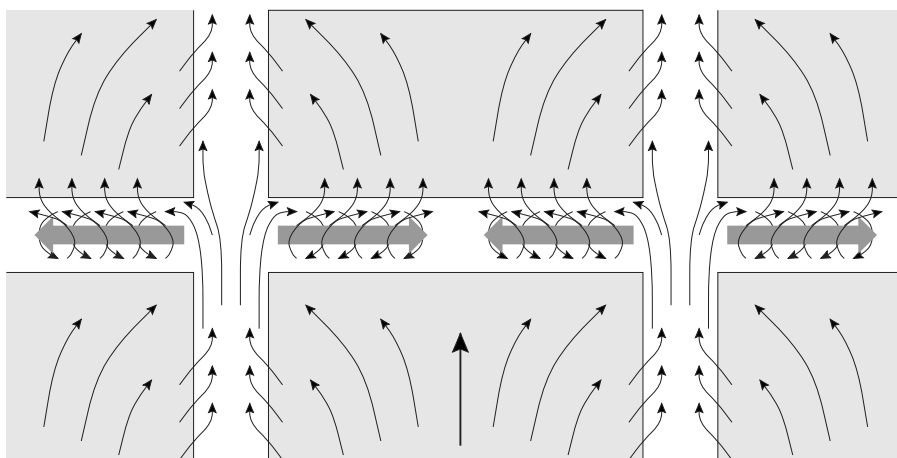


Figure III.1.16 – Flux transversal dans la rue perpendiculaire au vent extérieur.

Pour expliquer la présence d’un flux moyen orienté de l’intersection vers l’intérieur de la rue n° 2 (rue perpendiculaire au vent extérieur), nous proposons un raisonnement basé sur l’entraînement de fluide par l’écoulement extérieur. Dans le sillage d’un obstacle placé dans un écoulement turbulent, la zone de recirculation est généralement caractérisée par une pression plus faible que celle de l’écoulement extérieur. On peut expliquer cet effet en considérant qu’au niveau du point de décollement, l’écoulement principal se comporte comme un jet qui, par effet d’entraînement, “aspire” l’air présent dans la recirculation et crée ainsi une dépression. Une simple analyse dimensionnelle nous amène à poser que cette dépression est proportionnelle au carré de la vitesse dans l’écoulement extérieur.

Dans le cas d’une cavité rectangulaire bidimensionnelle, il apparaît une dépression due à la circulation du fluide au-dessus de la cavité. Dans le cas d’un segment de rue tridimensionnel, perpendiculaire à l’écoulement (cas de la rue n° 2), le problème devient un peu plus complexe, dans la mesure où il existe une circulation de fluide au-dessus de la rue (écoulement extérieur) et une autre au niveau des extrémités (écoulement provenant de la rue n° 1). Ces deux circulations vont chacune avoir pour effet d’aspirer l’air de la rue dans des directions différentes : la circulation extérieure aspire le fluide vers le haut ; l’écoulement dans la rue n° 1 aspire le fluide vers les intersections. Or il est peut probable que ces deux effets s’équilibrent parfaitement. En effet, on constate tout d’abord que les “sections d’aspiration” sont différentes, la surface supérieure de la rue étant généralement plus importante que les extrémités. Ensuite, la vitesse caractéristique de l’écoulement extérieur – et donc la dépression qu’il entraîne – est par nature plus élevée que la vitesse circulant dans les intersections. Pour ces deux raisons, l’aspiration par l’écoulement extérieur est plus importante que l’aspiration par les extrémités. On peut donc en conclure, comme nous l’avons observé, qu’il existe un flux d’air entrant dans la rue par les intersections et ressortant par la face supérieure.

Le comportement de l’écoulement est représenté sur la figure III.1.16. Les flèches utilisées

illustrent qualitativement le sens de l'écoulement mais il faut garder à l'esprit que le mouvement dans la rue est avant tout constitué d'une recirculation. Nous avons également indiqué sur ce schéma les écoulements induits sur les toits des bâtiments pour compenser le flux précédent. Le modèle phénoménologique proposé sera utilisé par la suite pour comprendre l'évolution du flux transversal pour des rapports d'aspect différents ou dans le cas d'une intersection avec place.

III.1.4.2.3 Dispersion

Pour étudier la dispersion à proximité de l'intersection, nous avons simulé deux configurations distinctes. Dans un premier cas, nous avons placé une source au sol, sur l'axe de la rue n° 1, de sorte que la source traverse l'intersection. Dans un deuxième cas, nous avons étudié la même configuration² mais pour une source placée dans la rue n° 2.

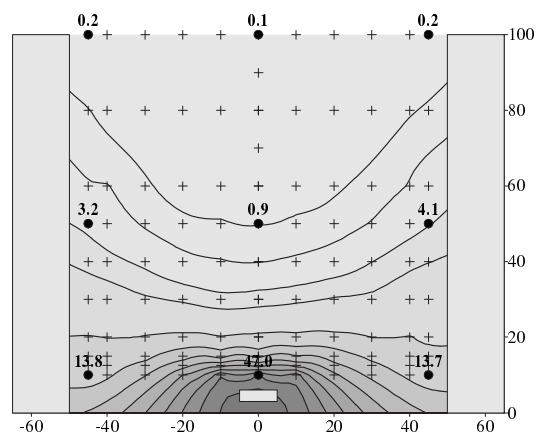
Source dans la rue n° 1

Le champ de concentration dans la rue n° 1 est décrit sur les figures III.1.17-a à f. La figure III.1.17-a représente le champ de concentration expérimental dans la section située au centre du segment de rue. La concentration est maximale au niveau de la source et diminue avec la distance (figures III.1.17-b et c). Dans les coins de la rue, les iso-contours s'incurvent en raison de la présence des parois verticales. Ces différents comportements sont en accord avec les résultats obtenus au chapitre II.3. L'analyse des profils de concentration met en évidence un bon accord entre la soufflerie et le code *MERCURE* au niveau du profil vertical au centre de la rue. Par contre, il semble que les deux approches ne fournissent pas le même étalement latéral du panache. La valeur plus importante en soufflerie peut être expliquée par la présence d'une plaque sur la source qui favorise l'étalement initial des polluants.

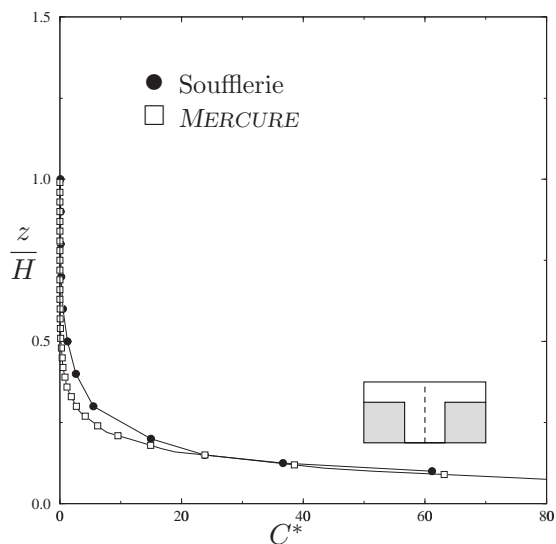
Il faut noter que la répartition de la concentration dans une section quelconque (y quelconque) reste similaire à la répartition observée dans la section centrale. Par contre, on constate que les valeurs de concentration augmentent avec la distance y (direction de l'écoulement), comme cela est illustré par la figure III.1.17-d. L'évolution obtenue ici est similaire à l'évolution observée sur la figure II.3.15 dans le cas d'une rue de longueur infinie. On constate également que la soufflerie et le code *MERCURE* fournissent des résultats semblables.

Si ce champ de concentration est très proche de celui observé dans une rue de longueur infinie, un détail permet cependant de discerner l'effet des intersections. Dans la partie supérieure de la rue, on peut noter que la concentration est plus forte près des parois que sur l'axe de la rue (cf. figure III.1.17-a). Ce phénomène n'est pas observé dans une rue de longueur infinie. Pour en expliquer l'origine, nous proposons le scénario suivant, qui semble être validé par les simulations effectuées avec le code *MERCURE*. Compte tenu de la longueur de la source, le panache a déjà traversé une intersection lorsqu'il coupe la section de mesure. Au niveau de cette intersection, une partie des polluants est transportée vers la rue n° 2 par les flux transversaux décrits précédemment. À l'intérieur de cette rue, ces polluants sont advectionnés par la structure tourbillonnaire et la concentration s'homogénéise dans tout le segment de rue. En particulier, le mouvement hélicoïdal ascendant transporte les polluants vers le haut de la rue. Or il n'existe pas de mouvement ascendant équivalent dans la rue n° 1, si bien que dans la partie supérieure de l'intersection, la concentration est plus forte dans la rue n° 2 que dans la rue n° 1. Ce paradoxe a pour effet de créer dans cette partie un flux diffusif de la rue n° 2 vers l'intersection. Dans la rue n° 1-aval, la concentration en altitude est alors plus importante près des parois qu'au centre de la rue.

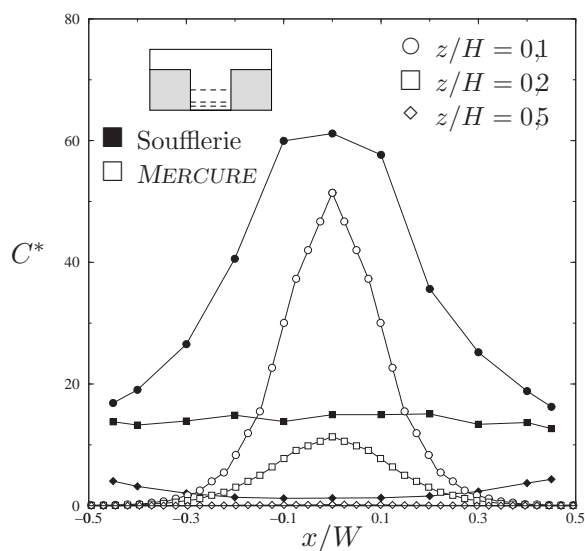
2. Il est à noter qu'en soufflerie, cette configuration a été obtenue en faisant tourner la maquette de 90°.



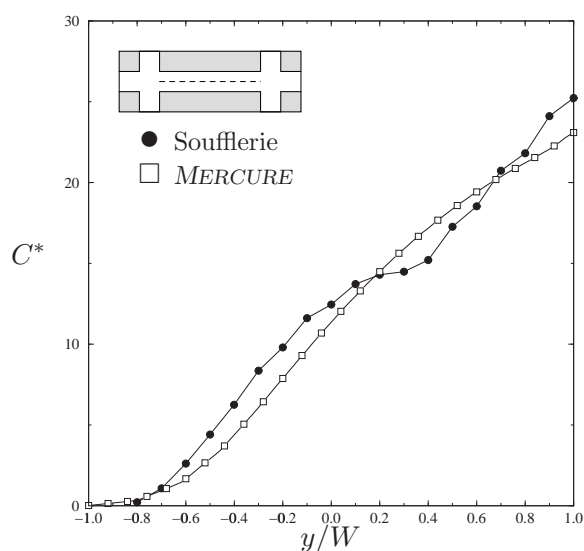
a) Champ de concentration dans la rue n° 1 (soufflerie). Les croix représentent les points de mesure.



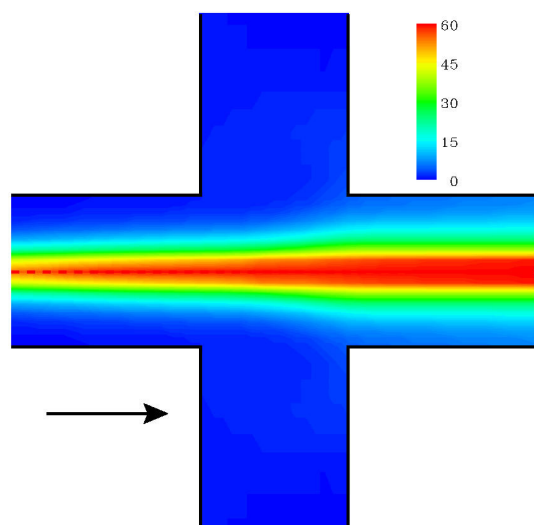
b) Profils verticaux de concentration $C^* = CU_H WL/Q$ à $x/W = 0$ et $y/L = 0$.



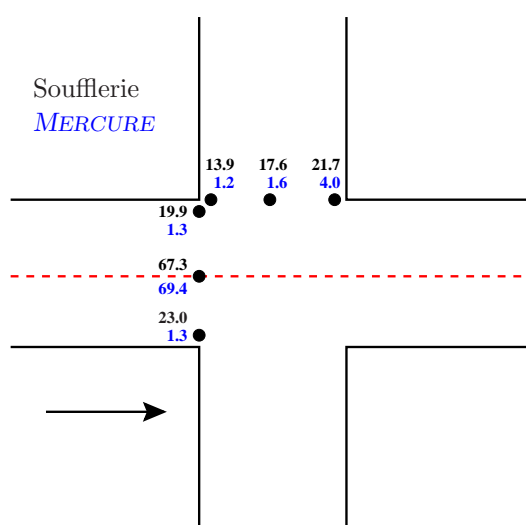
c) Profils horizontaux de concentration $C^* = CU_H WL/Q$ à $y/L = 0$.



d) Profils horizontaux de concentration $C^* = CU_H WL/Q$ à $x/W = 0$ et $z/H = 0.2$.

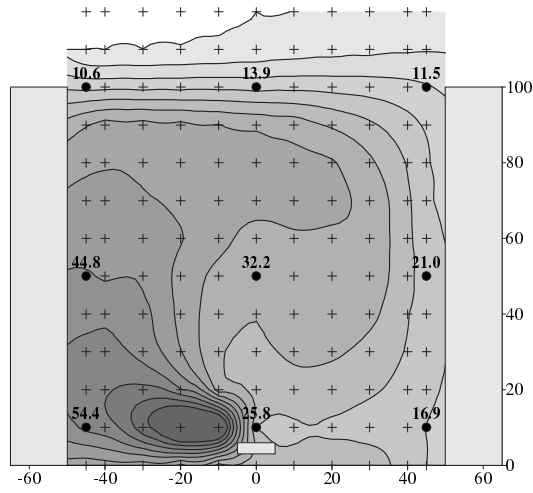


e) Champ de concentration C^* au sol (simulation MERCURE).

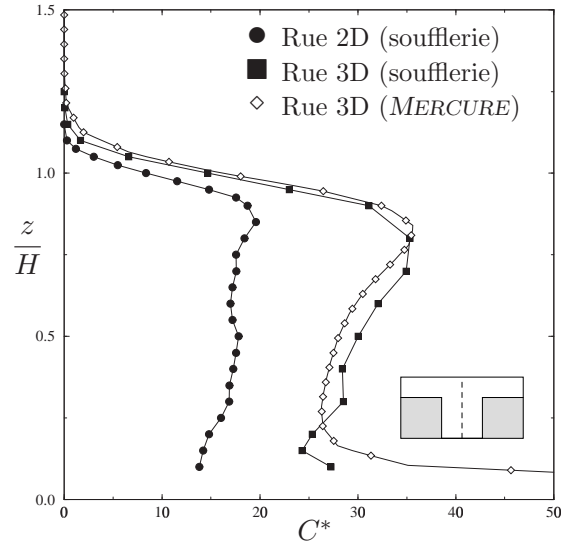


f) Valeurs de concentration C^* au sol.

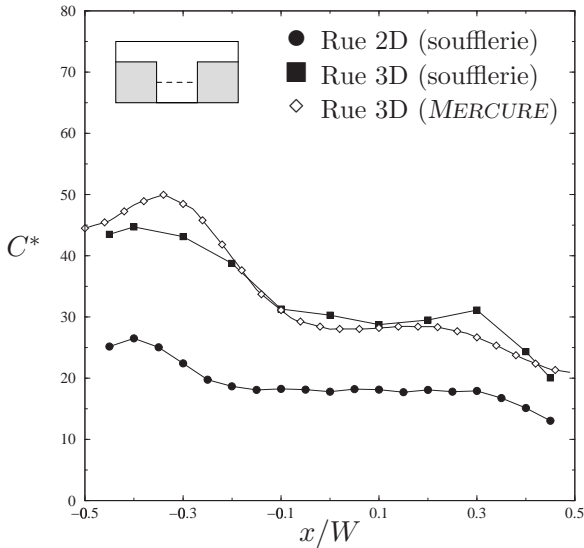
Figure III.1.17 – Dispersion dans une intersection de rue. Source linéique dans la rue n° 1.



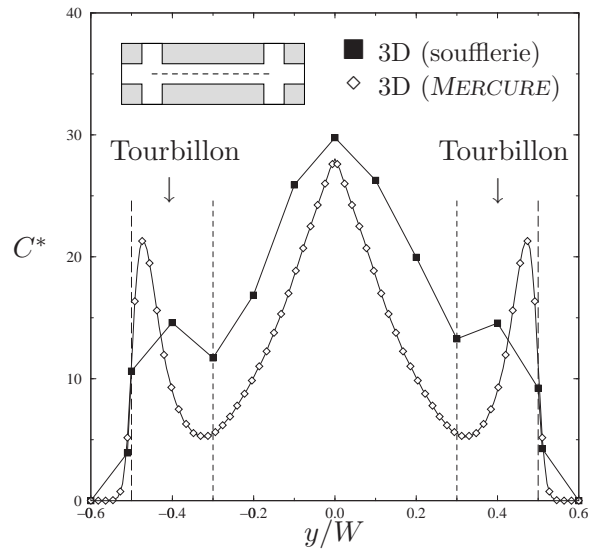
a) Champ de concentration dans la rue n° 2 (soufflerie). Les croix représentent les points de mesure.



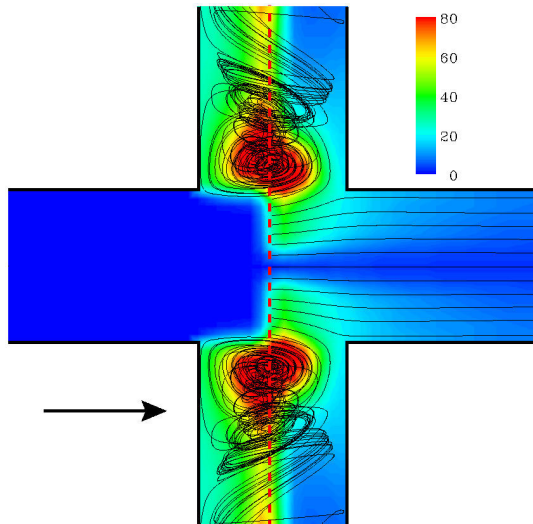
b) Profils verticaux de concentration $C^* = CU_H WL/Q$ à $x/W = 0$ et $y/L = 0$.



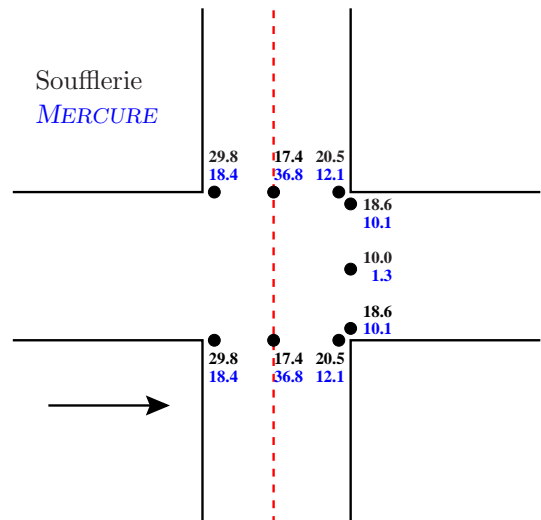
c) Profils horizontaux de concentration $C^* = CU_H WL/Q$ à $z/H = 0.5$.



d) Profils horizontaux de concentration $C^* = CU_H WL/Q$ à $x/W = 0$ et $z/H = 0.5$.



e) Champ de concentration C^* au sol (simulation MERCURE).



f) Valeurs de concentration C^* au sol.

Figure III.1.18 – Dispersion dans une intersection de rue. Source linéique dans la rue n° 2.

Le phénomène décrit précédemment est cependant marginal dans la mesure où les concentrations concernées sont faibles. Sur la figure III.1.17-e, on observe qu’au niveau du sol, le maximum de concentration du panache est principalement advecté le long de la rue n° 1. On constate également que le panache n’est quasiment pas perturbé lors de la traversée de l’intersection. Nous avons reporté, sur la figure III.1.17-f, quelques valeurs de concentration dans l’intersection. La comparaison des deux approches confirme les résultats précédents, avec un bon accord sur l’axe de la rue et une différence d’étalement latéral.

Source dans la rue n° 2

Le champ de concentration expérimental au centre de la rue n° 2 est représenté sur la figure III.1.17-a. L’allure de ce champ est caractéristique d’un mouvement de recirculation. Le comportement généralement observé dans une rue bidimensionnelle semble donc être reproduit au centre de la rue, au moins qualitativement. Des profils horizontaux et verticaux de concentration dans cette section – notés “3D”, en référence à la géométrie tridimensionnelle de la rue en présence des intersections – sont comparés, sur les figures III.1.17-b et c, aux profils équivalents obtenus dans une cavité bidimensionnelle (notés “2D”). Dans le cas 3D, les résultats numériques et expérimentaux s’accordent assez bien. En comparant les cas 2D et 3D, on constate que qualitativement, il existe une similitude entre les profils. Par contre, les valeurs de concentration sont quasiment deux fois plus élevées dans le cas 3D.

Pour expliquer ces différences, il est intéressant d’étudier le profil transversal présenté sur la figure III.1.17-d. La concentration n’est pas du tout homogène transversalement : elle est maximale au centre et décroît lorsque l’on se rapproche des intersections. Ce phénomène, observé numériquement et expérimentalement, est dû au flux transversal, évoqué au paragraphe précédent, qui ramène les polluants vers le centre de la rue. Cela explique pourquoi la concentration est plus importante à ce niveau-là.

Aux extrémités de la rue n° 2, on constate que la concentration augmente à nouveau (cf. figure III.1.17-d). Cette accumulation de concentration est provoquée par la présence du tourbillon d’axe vertical, qui limite l’advection des polluants. Ceci est nettement illustré par le comportement des lignes de courant sur la figure III.1.17-e.

D’un point de vue quantitatif, les valeurs de concentration dans l’intersection (cf. figure III.1.17-f) mettent en évidence des écarts importants entre le code *MERCURE* et la soufflerie. Étant donné que les profils présentaient des comportements similaires, ces écarts sont certainement attribuables à de fines différences au niveau de l’écoulement dans le carrefour. Cela révèle cependant la grande sensibilité des phénomènes considérés et la difficulté de prévoir avec précision la concentration dans une intersection.

III.1.4.2.4 Bilan

La modélisation de cette intersection de rues a mis en évidence les modifications des champs de vitesse et de concentration, principalement dans la rue perpendiculaire au vent. Ces modifications portent essentiellement sur l’apparition d’un flux transversal qui affecte la répartition de concentration. Cependant, d’un point de vue qualitatif, nous avons observé que les principaux comportements observés dans des rues infiniment longues restent vérifiés.

La configuration présentée précédemment constitue un cas particulier. Pour généraliser les résultats obtenus, nous avons effectué une étude de sensibilité, en faisant varier le rapport d’aspect des rues et la direction du vent.

III.1.4.3 Influence du rapport d'aspect

Pour étudier l'influence du rapport d'aspect, nous avons simulé numériquement l'écoulement dans trois configurations différentes avec le code *MERCURE*. Les rapports d'aspect des différentes rues sont fournis dans le tableau suivant :

H/W	Rue n° 1	Rue n° 2
Cas n° 1	1	1
Cas n° 2	1	2
Cas n° 3	2	1

Tableau III.1.2 – *Caractéristiques des rues simulées avec le code MERCURE.*

III.1.4.3.1 Topologie de l'écoulement

Une coupe horizontale du champ de vitesse à $z = H/2$ (figures III.1.20-a, c et e) nous permet de constater que la topologie de l'écoulement est analogue dans les trois cas. En effet, dans chaque cas, l'écoulement dans la rue n° 1 et dans l'intersection est orienté dans la direction du vent. À l'extrémité de la rue n° 2 se forme une structure tourbillonnaire similaire à celle décrite au paragraphe précédent.

III.1.4.3.2 Bilan des flux

La principale différence entre les trois cas porte sur les flux d'air à l'extrémité de la rue n° 2. Les échanges entre cette rue et l'intersection sont illustrés sur les figures III.1.20-b, d et f. Quel que soit le cas étudié, ce flux est toujours orienté de l'intersection vers l'intérieur de la rue. Ainsi, aucune ligne de courant moyenne ne relie la rue n° 2 à la rue n° 1-aval.

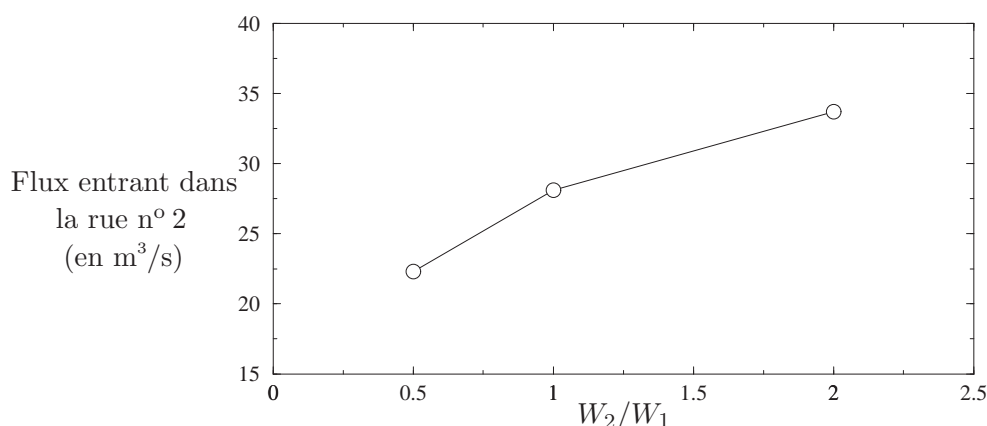
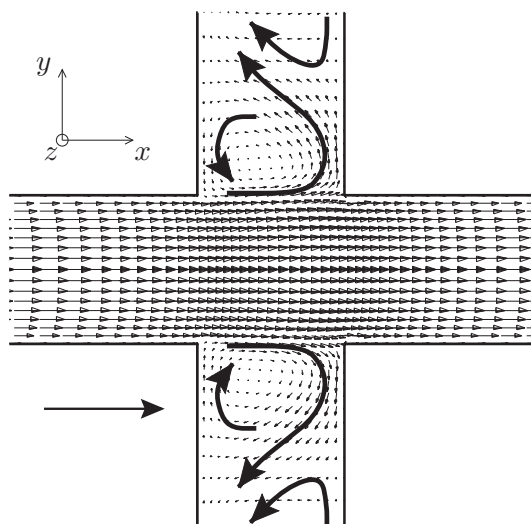
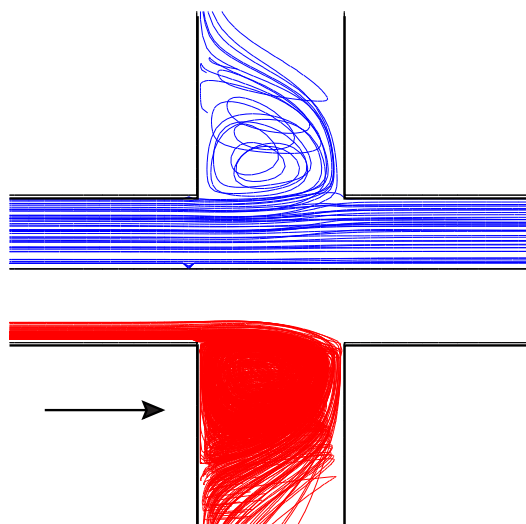


Figure III.1.19 – *Flux transversal en fonction du rapport des largeurs des rues n° 1 et n° 2.*

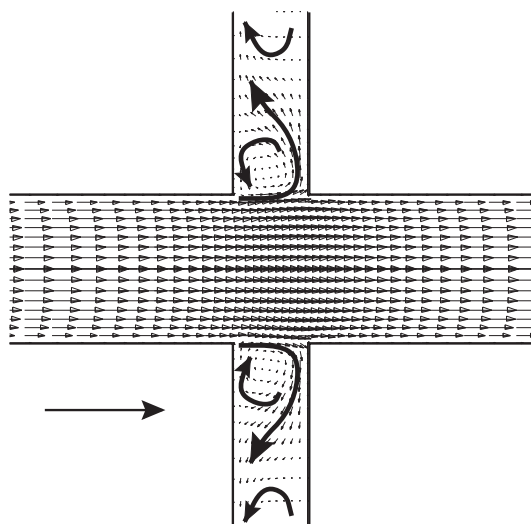
D'un point de vue quantitatif, nous avons représenté, sur la figure III.1.19, le débit entrant dans la rue n° 2 en fonction du rapport W_2/W_1 des largeurs des rues n° 2 et n° 1. Nous observons que plus la rue n° 2 est large par rapport à la rue n° 1, plus le flux qui y pénètre est important. Du point de vue du transport des polluants dans l'intersection, ce comportement a une conséquence importante. Lorsque la rue parallèle au vent est large (une avenue par exemple) et croisée par de petites rues perpendiculaires, la plupart des polluants émis dans la rue principale sont advectionnés dans cette même rue (cf. figure III.1.20-d) et seulement une faible partie est transportée latéralement, dans les rues adjacentes. Dans le cas contraire, lorsque la rue principale est perpendiculaire au vent (rue n° 2) et que les petites rues sont orientées dans la direction de



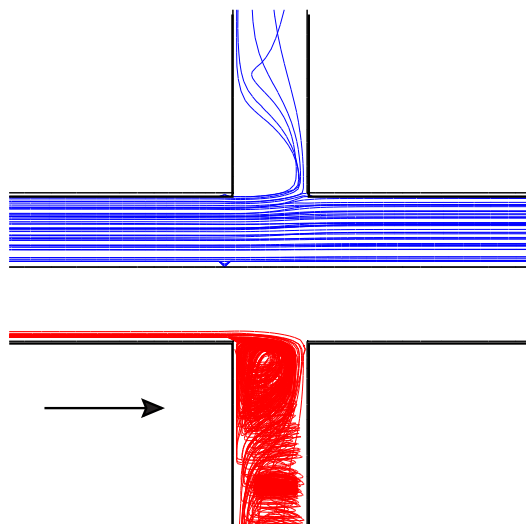
a) Cas n° 1: Champ de vitesse à $z = H/2$.



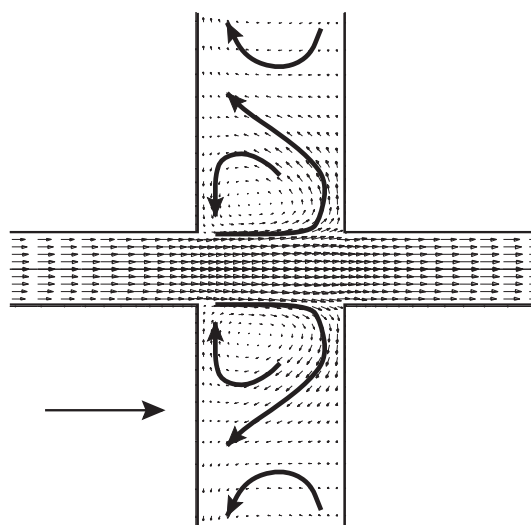
b) Cas n° 1: Lignes de courant. En bleu sont représentées les lignes de courant traversant l'extrémité de la rue n° 1, en rouge celles traversant l'extrémité de la rue n° 2.



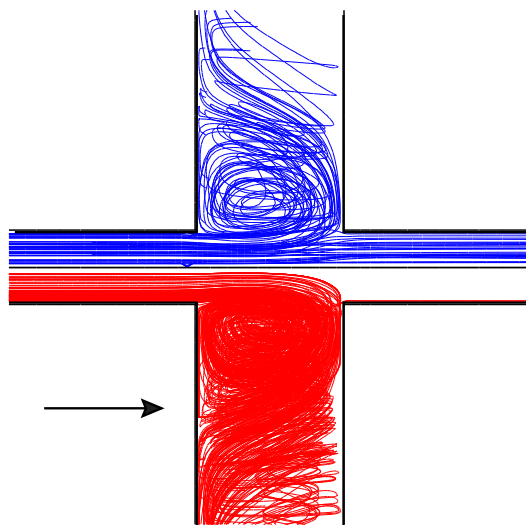
c) Cas n° 2: Champ de vitesse à $z = H/2$.



d) Cas n° 2: Lignes de courant.



e) Cas n° 3: Champ de vitesse à $z = H/2$.



f) Cas n° 3: Lignes de courant.

Figure III.1.20 – Écoulement dans une intersection de rues (simulation MERCURE). Influence du rapport d'aspect des différentes rues. Champ de vitesse et lignes de courant.

l'écoulement (rues n° 1), une partie importante des polluants émis dans ces ruelles est transportée latéralement vers la rue principale, au niveau de l'intersection (cf. figure III.1.20-f).

Ces comportements sont confirmés qualitativement par les résultats expérimentaux de HOYDYSH et DABBERDT (1994), reproduits sur les figures III.1.21-a et b. Ces résultats correspondent à une mesure de la concentration, intégrée sur la verticale, par une méthode de visualisation. La figure III.1.21-a correspond qualitativement à notre cas n° 2, puisque la rue n° 2 est plus étroite que la rue n° 1. Dans ce cas-là, on constate que la majeure partie du panache est transportée dans la rue principale et que seule une petite partie de celui-ci diffuse dans les rues transversales. La figure III.1.21-b correspond au cas n° 3. Contrairement au cas précédent, une grande partie des polluants émis dans la rue n° 1-amont est transportée vers la rue n° 2 et paradoxalement, la rue n° 1-aval est moins polluée³. Cette figure est à rapprocher de la figure III.1.20-f.

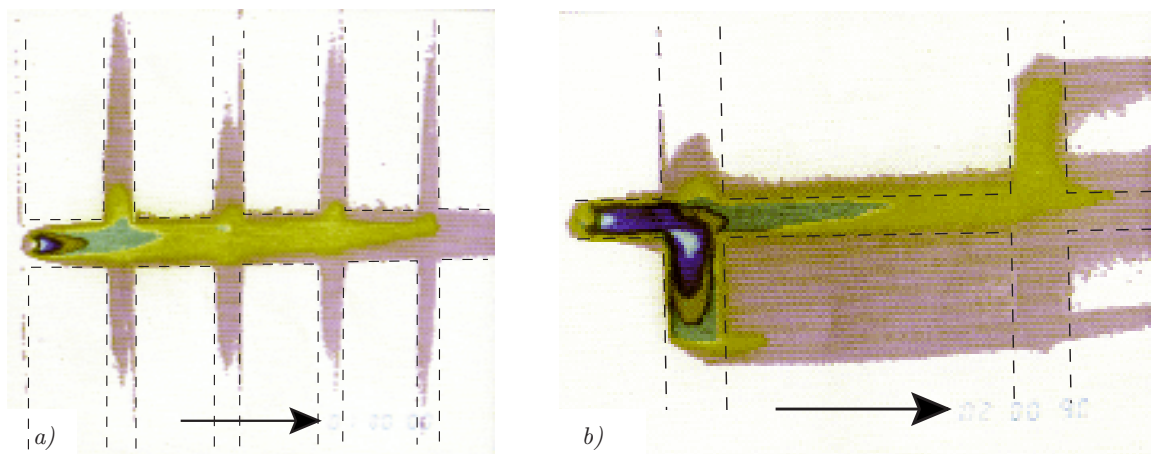


Figure III.1.21 – *Champ expérimental de concentration dans un quartier (d'après HOYDYSH et DABBERDT, 1994, figure 2-a(1) et 2-d(2)). La figure représente une intégration de la concentration sur la verticale.*

Pour expliquer l'évolution du flux transversal en fonction du rapport W_2/W_1 , reprenons le raisonnement fondé sur l'entraînement par l'écoulement extérieur. La différence d'entraînement entre la face supérieure et les extrémités de la rue n° 2 induit une différence de pression qui est à l'origine du flux transversal. Pour le même écart de pression, plus la rue n° 2 est large (et donc W_2/W_1 grand), plus le débit induit dans cette rue doit être important. Cela explique le comportement observé sur la figure III.1.19.

III.1.4.3.3 Bilan

Les différences de rapport d'aspect entre les rues d'une intersection influencent essentiellement les échanges avec la rue perpendiculaire à l'écoulement. Plus la rue n° 2 est large par rapport à la rue n° 1, plus le flux qui y pénètre est important. Les résultats observés sont en bon accord avec ceux de HOYDYSH et DABBERDT (1994).

3. On peut remarquer sur la figure III.1.21-b qu'il n'y a pas symétrie du panache par rapport à la direction de l'écoulement. Cela est probablement dû à un léger défaut d'orientation de la maquette ou à un décalage dans le positionnement de la source.

III.1.4.4 Influence de l'orientation du vent

Les résultats précédents nous ont permis de comprendre un certain nombre de phénomènes dans le cas d'un carrefour axé sur la direction de l'écoulement. Pour généraliser ces résultats, nous allons maintenant étudier l'influence de l'orientation de l'écoulement extérieur.

Les deux rues constituant le carrefour étudié ont un rapport d'aspect $H/W = 1$. Nous avons travaillé sur trois directions particulières (15° , 30° , 45°). Compte tenu des symétries du problème, ces trois cas, ajoutés au cas étudié précédemment, permettent de reconstituer une rose des vents de 360° , avec un pas de 15° . Pour cette étude, nous présentons conjointement des résultats numériques et des résultats d'expériences en soufflerie.

III.1.4.4.1 Topologie de l'écoulement

L'inclinaison du vent par rapport à l'axe de l'intersection génère un écoulement particulièrement complexe. Nous nous attacherons simplement à en décrire les principales caractéristiques, communes aux différentes directions. Pour cela, nous distinguerons trois zones : les segments de rue situés à l'amont de l'intersection, les segments de rue situés en aval et le cœur de l'intersection.

Nous avons montré, au chapitre II.4, que l'écoulement dans une rue infinie, inclinée par rapport au vent extérieur, est constitué d'un mouvement hélicoïdal, superposition d'un mouvement tourbillonnaire transversal et d'un mouvement longitudinal. On observe que ce mouvement est présent dans les rues situées à l'amont de l'intersection. Ce mouvement persiste quasiment jusqu'à la limite de l'intersection.

Dans les rues situées en aval, on constate sur les figures III.1.22-a, c et e la formation d'une recirculation dans le plan horizontal, qui s'amorce à l'angle d'un bâtiment. L'extension de cette zone de recirculation varie en fonction de la direction du vent. Lorsque le vent est presque perpendiculaire à la rue, sa taille est maximale et cette recirculation devient similaire à celle observée lorsque le vent est parfaitement perpendiculaire. Plus le vent devient parallèle à la rue et plus sa taille diminue. Au-delà de cette zone de recirculation, l'écoulement retrouve un comportement hélicoïdal. La zone d'influence de l'intersection est donc beaucoup plus importante dans les rues situées en aval de l'intersection que dans celles situées en amont.

Au cœur de l'intersection, il s'établit un écoulement imposé par le transit des flux d'air entre les différentes rues. Le mouvement hélicoïdal a disparu et la direction de l'écoulement varie peu avec l'altitude. En effet, on peut noter que la variation verticale de la direction de l'écoulement au centre de l'intersection est relativement faible ($\pm 7^\circ$ pour $\theta = 15^\circ$, $\pm 11^\circ$ pour $\theta = 30^\circ$ et $\pm 0^\circ$ pour $\theta = 45^\circ$). Ceci tend à démontrer que la topologie de l'écoulement au sein du carrefour est relativement constante en fonction de la hauteur, ce qui valide l'utilisation d'un modèle plan pour représenter les flux dans l'intersection.

L'étude du transport des polluants dans un tel écoulement est particulièrement délicate. Nous verrons, au paragraphe III.1.4.4.3, que la succession des trois zones précédentes génère des lignes de courant très complexes. Avant d'entrer dans ce niveau de détail, nous proposons d'effectuer une analyse plus globale sur la répartition des flux entre les différentes rues.

III.1.4.4.2 Bilan des flux

Le modèle que nous avons développé pour décrire les échanges au niveau d'une intersection est basé sur l'équilibre des flux entrant et sortant du carrefour. Dans ce modèle, nous calculons le débit circulant dans chaque rue et, en supposant que la topologie de l'écoulement dans l'intersection est bidimensionnelle, nous en déduisons les coefficients d'échange d'une rue vers l'autre.

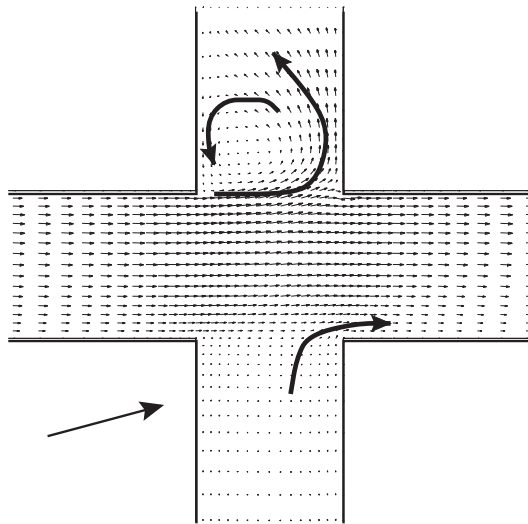
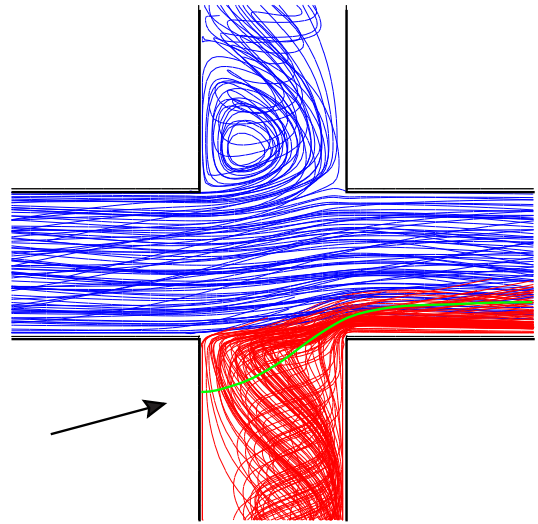
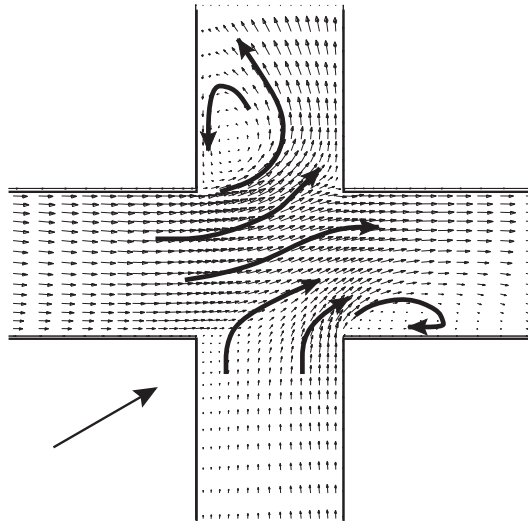
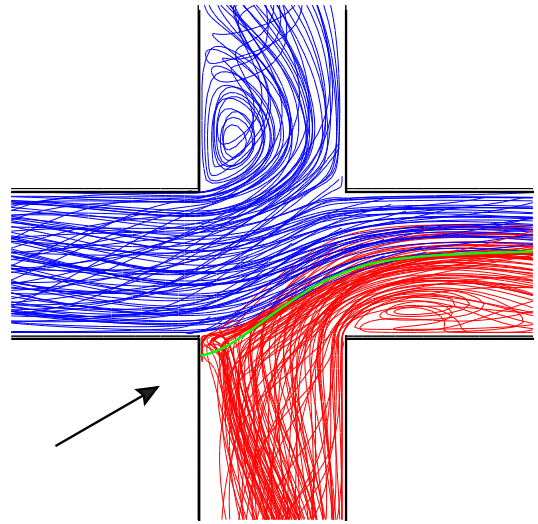
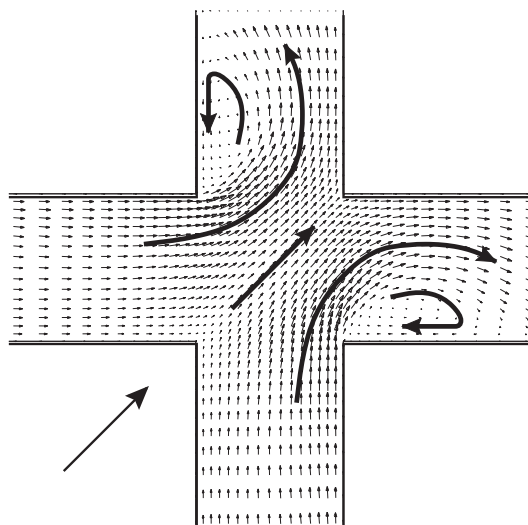
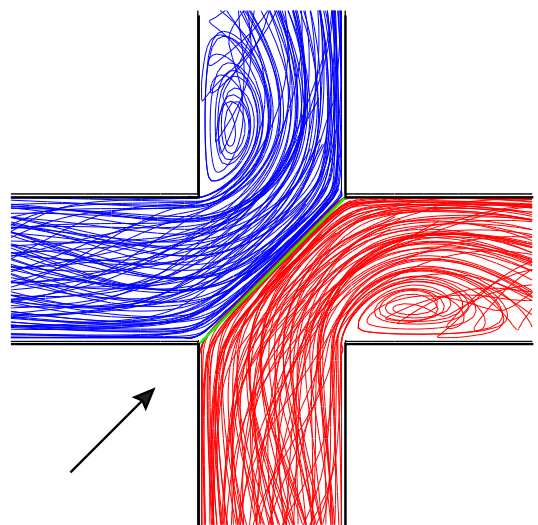
a) $\theta = 15^\circ$: Champ de vitesse à $z = H/2$.b) $\theta = 15^\circ$: Lignes de courant.c) $\theta = 30^\circ$: Champ de vitesse à $z = H/2$.d) $\theta = 30^\circ$: Lignes de courant.e) $\theta = 45^\circ$: Champ de vitesse à $z = H/2$.f) $\theta = 45^\circ$: Lignes de courant.

Figure III.1.22 – Écoulement dans une intersection de rues (simulation MERCURE). Sensibilité à la direction du vent. Champ de vitesse et lignes de courant. Sur les figures de droite, la ligne verte représente la ligne de séparation calculée à l'aide du modèle potentiel d'intersection.

Pour valider le comportement du modèle, il faut donc avant tout vérifier les valeurs des flux d'air entrant et sortant de l'intersection.

Pour cela, nous avons calculé, à partir des simulations numériques, les débits aux frontières de l'intersection, en fonction de la direction du vent. Le calcul a été effectué à l'extrémité des rues. Les résultats sont exprimés sous forme de vitesse moyenne à travers la section. Ces valeurs ont été représentées sur la figure III.1.23, en fonction du cosinus de l'angle d'incidence de la rue considérée. En effet, nous avons montré au chapitre II.4 que la vitesse moyenne à l'intérieur d'une rue infinie est proportionnelle au cosinus de l'angle d'incidence. La relation théorique correspondante (équation II.4.5) est à la base du calcul des débits dans le modèle d'intersection. Nous allons donc vérifier si les résultats, obtenus numériquement en présence d'une intersection, s'accordent avec cette relation.

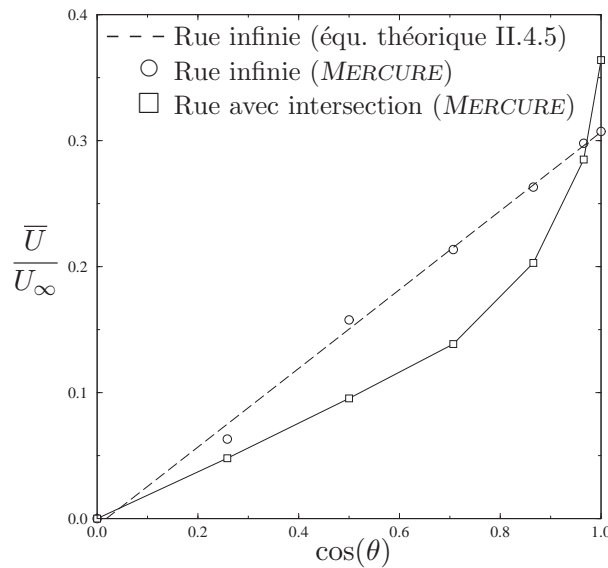
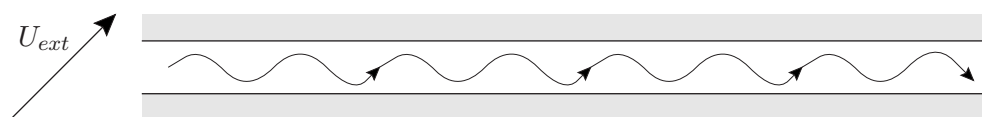


Figure III.1.23 – Vitesse moyenne à travers une section de rue. Comparaison entre une rue infinie et une rue connectée à une intersection.

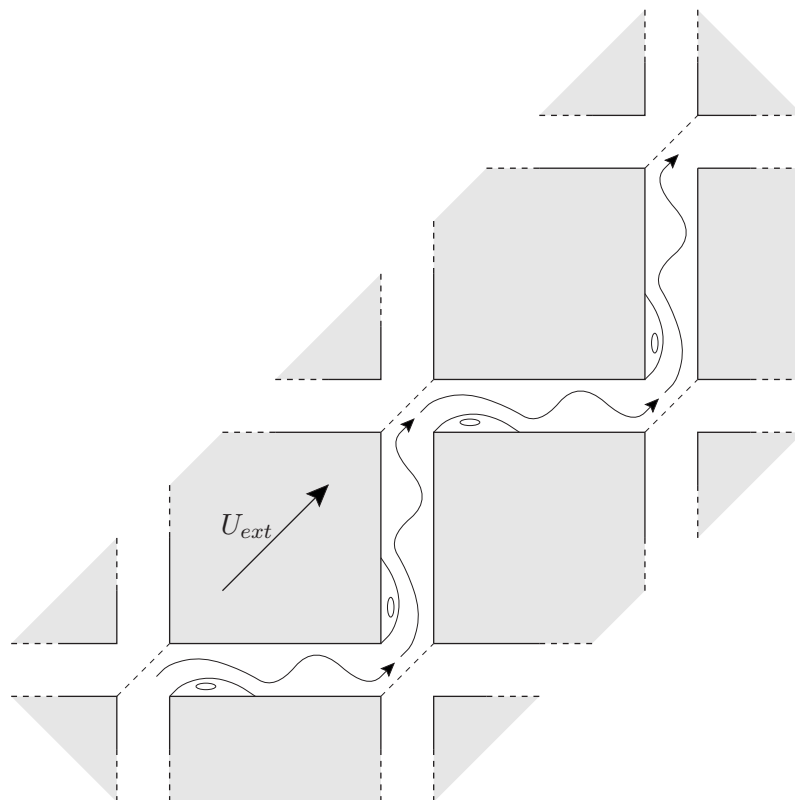
On constate que la vitesse moyenne, à la limite de l'intersection, augmente avec $\cos \theta$. Cependant, cette relation n'est pas linéaire comme le prévoit le modèle. Pour des valeurs intermédiaires de θ , les vitesses obtenues avec intersection sont plus faibles que celles obtenues pour une rue de longueur infinie.

Pour expliquer ce résultat, nous avons comparé, sur les figures III.1.24-a et b, le trajet de l'écoulement dans les cas sans intersection et avec intersection. Pour simplifier le raisonnement, nous nous sommes placés dans la situation d'un vent extérieur orienté à 45° . Le raisonnement que nous allons présenter pourrait cependant être généralisé à une situation quelconque.

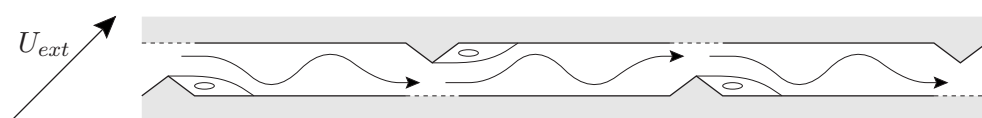
Dans une rue infinie (cf. figure III.1.24-a), nous avons montré au chapitre II.4 que l'écoulement est hélicoïdal. Ce mouvement est entraîné par le cisaillement qui apparaît à l'interface rue-atmosphère. En présence des intersections (cf. figure III.1.24-b), l'orientation du vent par rapport à chaque tronçon de rue est la même que dans le cas d'une rue infinie. Cela signifie que l'entraînement par l'écoulement extérieur est équivalent. La principale différence entre les deux situations réside dans le fait qu'en présence des intersections, l'écoulement est dévié de 90° à chaque carrefour. Si l'on fait l'analogie avec l'écoulement dans un tuyau, la présence des carrefours induit donc une perte de charge supplémentaire. En effet, le changement de direction provoque un décollement des lignes de courant à l'angle du bâtiment, ce qui a pour effet de dissiper davantage d'énergie. De plus, pour des angles intermédiaires (par exemple 45°), l'intersection constitue un étranglement pour l'écoulement. En effet, la section diagonale de l'intersection est



a) Écoulement dans une rue infinie.



b) Écoulement dans une série de rues de longueur finie.



c) Représentation formelle de l'écoulement dans une série de rues.

Figure III.1.24 – Représentation comparative de l'écoulement dans une rue finie et infinie, lorsque l'orientation du vent est quelconque.

plus étroite que la somme des sections des rues incidentes. Ce phénomène est nettement visible sur le schéma III.1.24-b. La réduction de la section offerte à l'écoulement vient ajouter une perte de charge supplémentaire.

Pour résumer ces différents points, on peut dire qu'en présence des intersections, le moteur de l'écoulement dans la rue est le même que dans le cas d'une rue infinie, alors que les pertes de charge qui s'exercent sur cet écoulement sont plus importantes. Pour bien apprécier la comparaison entre les deux cas, nous avons effectué, sur la figure III.1.24-c, une représentation formelle de l'écoulement dans la série de tronçons, en "dépliant" le trajet du fluide. En comparant à la figure III.1.24-a, on met ainsi nettement en évidence les pertes de charges induites par la présence des intersections. Finalement, étant donné que le moteur de l'écoulement est le même et que les pertes de charges sont plus importantes, il devient clair que la vitesse moyenne à l'intérieur de la rue fictive de la figure III.1.24-c doit être plus faible que la vitesse moyenne dans une rue infinie.

Le comportement observé sur la figure III.1.23 infirme donc en partie l'hypothèse du découplage entre l'écoulement dans la rue et l'écoulement dans l'intersection. Il semble en effet que la présence de l'intersection modifie le débit d'air moyen à l'intérieur des rues qui la composent. En première approximation, ce phénomène a été négligé dans le modèle que nous avons proposé mais il devra être pris en compte dans le cadre de développements futurs.

Pour compléter l'analyse des flux d'air, il est important d'étudier leur trajet dans l'intersection. Pour cela, nous avons représenté avec des couleurs différentes les lignes de courant provenant des deux rues situées en amont (cf. figures III.1.22-b, d et f). Il est intéressant de constater la similitude entre ces figures, obtenues à partir des résultats du code *MERCURE*, et les figures III.1.6-a et b, obtenues avec un modèle simple d'écoulement potentiel. On observe en effet que les courants issus des deux rues amont ne se croisent quasiment pas, comme nous l'avions présupposé. À l'intérieur de l'intersection, leur comportement est approximativement similaire à celui d'un écoulement plan, ce qui valide l'hypothèse effectuée dans le modèle que nous avons proposé.

Pour compléter la comparaison avec le modèle potentiel, nous avons représenté en vert la ligne de courant de séparation obtenue avec ce modèle. Dans le cas d'un angle de 45° , l'accord entre les deux approches est excellent. Par contre, pour des angles de 30° et surtout 15° , on constate que le modèle potentiel ne localise pas le point de décollement exactement à l'arête du bâtiment. Cette erreur est d'autant plus importante que l'orientation du vent est faible. Cependant, lorsque l'on s'éloigne du point de décollement, la comparaison entre le modèle potentiel et le code *MERCURE* redevient acceptable. La répartition des flux dans la rue aval est alors bien respectée. Le modèle proposé semble donc relativement bien adapté pour décrire la répartition des flux convectifs au sein de l'intersection. Comme le modèle de diffusion n'est qu'une intégration, sur plusieurs directions du vent, du modèle d'advection, on peut donc penser que cette diffusion sera également assez bien représentée.

En conclusion, il ressort de cette analyse que le modèle phénoménologique proposé pour décrire les flux au sein d'une intersection est relativement réaliste. Cependant, on peut noter que la vitesse moyenne dans un tronçon de rue n'est pas très bien décrite par un modèle de rue bidimensionnelle, dans la mesure où ce tronçon est fortement influencé par la présence de l'intersection.

III.1.4.4.3 Dispersion

Pour terminer cette étude de sensibilité à la direction du vent, nous allons présenter quelques résultats concernant la dispersion de polluants à partir d'une source linéique. Pour les trois directions de vent, nous avons simulé les cas d'une source linéique placée alternativement dans chacune des rues. Les résultats numériques et expérimentaux sont présentés sur les figures III.1.25 et III.1.26.

Sur les figures de gauche, nous avons représenté le champ de concentration au sol et les lignes de courant issues de la source, simulés avec le code *MERCURE*. Sur les figures de droite sont indiquées les valeurs numériques et expérimentales de concentration au voisinage du sol, à $z = H/10$. Avant de décrire plus amplement les résultats, on peut tout d'abord remarquer la complexité des champs obtenus avec le code *MERCURE*. Pour de telles configurations, les simulations numériques constituent un outil d'appoint particulièrement intéressant pour comprendre et interpréter les expériences en soufflerie. Lorsque le vent est quasiment parallèle à la source (figures III.1.25-a et c), le panache est transporté principalement dans la rue contenant cette

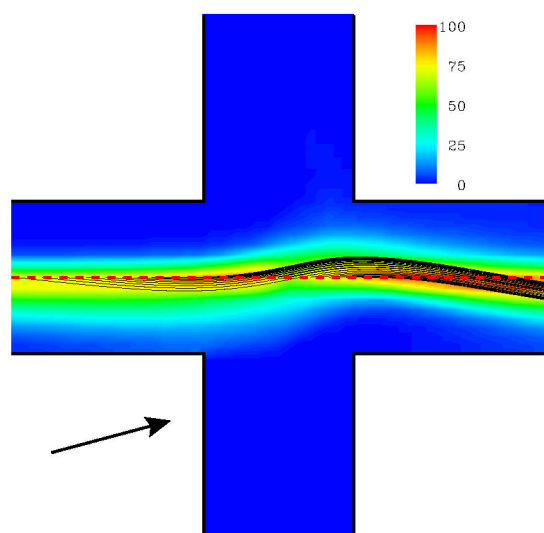
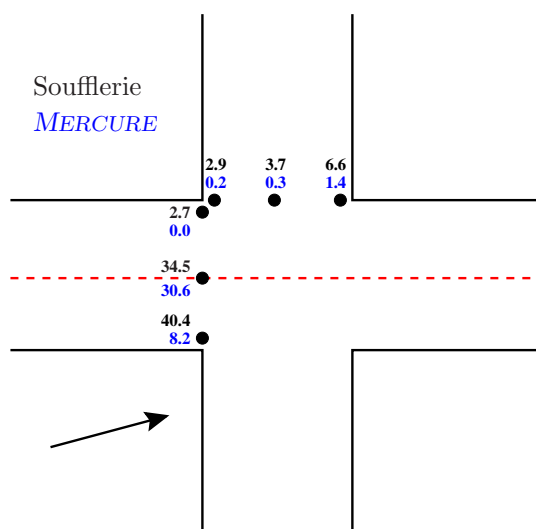
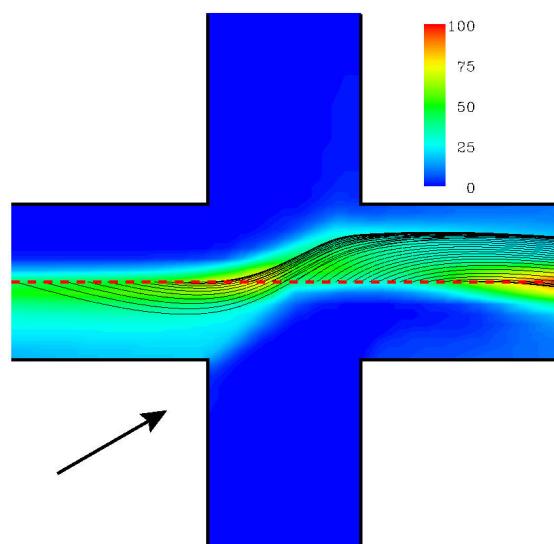
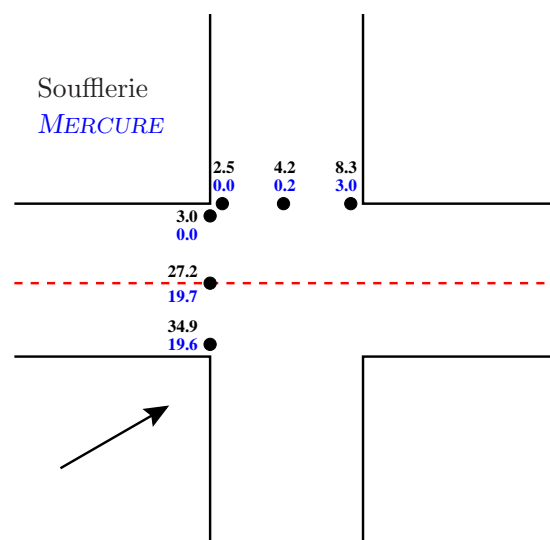
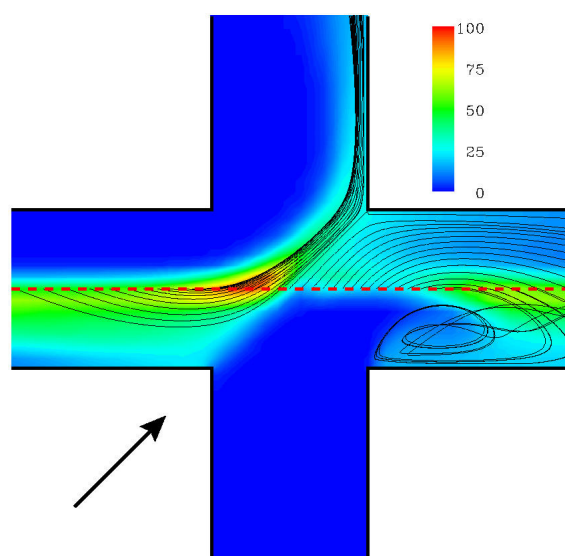
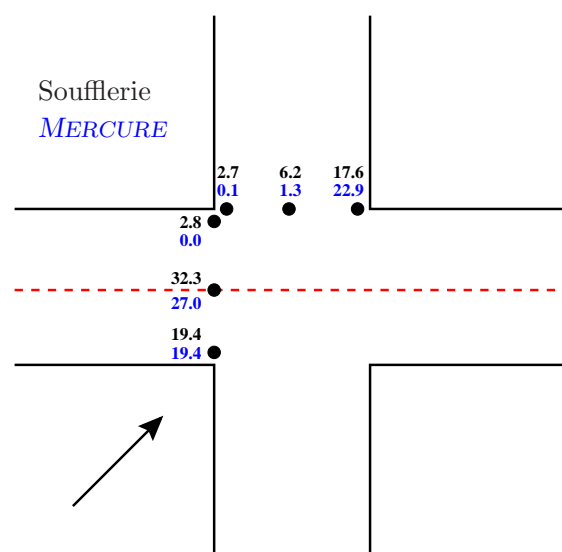
a) $\theta = 15^\circ$: MERCURE.b) $\theta = 15^\circ$: Soufflerie et MERCURE.c) $\theta = 30^\circ$: MERCURE.d) $\theta = 30^\circ$: Soufflerie et MERCURE.e) $\theta = 45^\circ$: MERCURE.f) $\theta = 45^\circ$: Soufflerie et MERCURE.

Figure III.1.25 – Source linéique dans la rue n° 1. Sensibilité à la direction du vent. À gauche, simulations MERCURE : champ de concentration C^* au sol et lignes de courant issues de la source. À droite, valeurs numériques et expérimentales de la concentration C^* au niveau du sol.

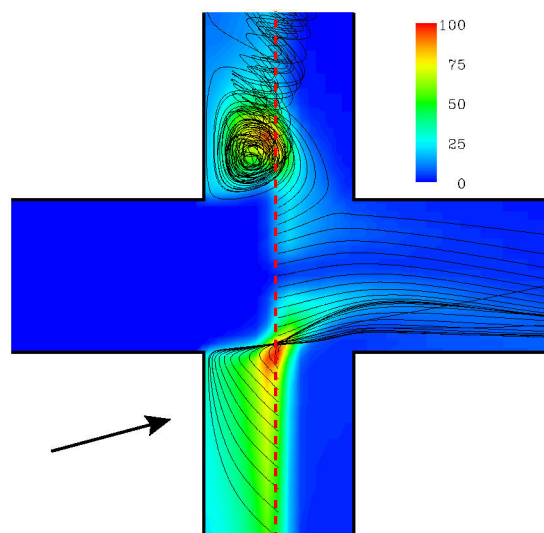
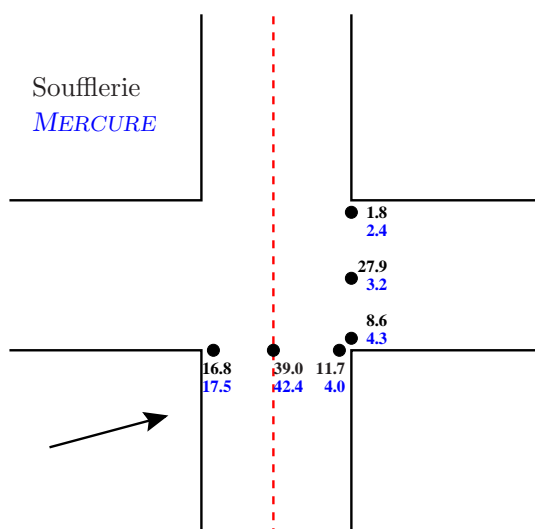
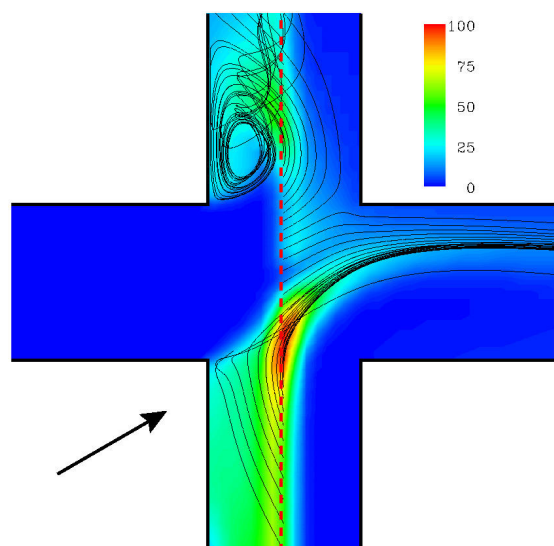
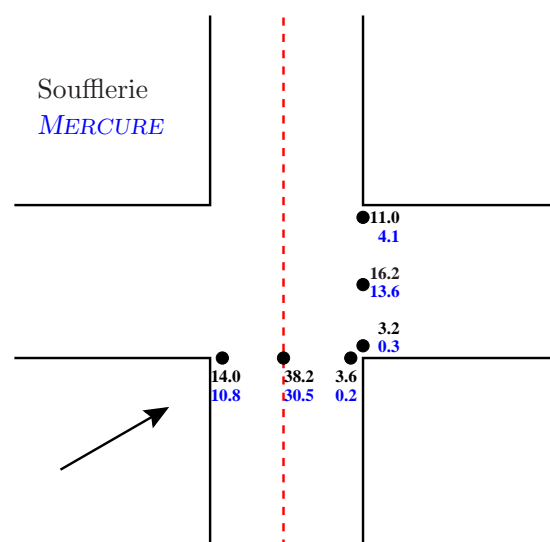
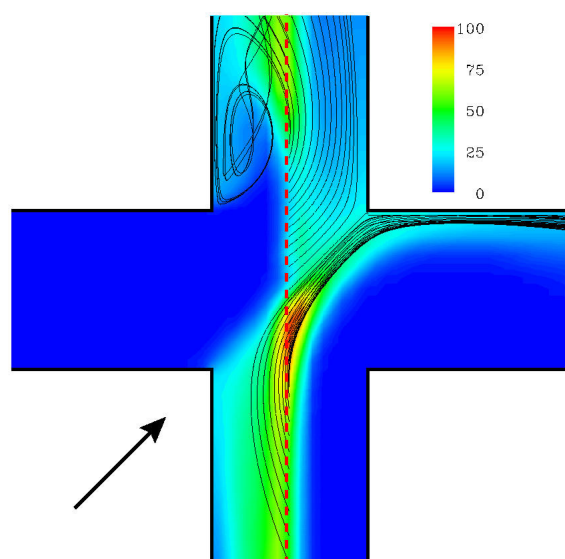
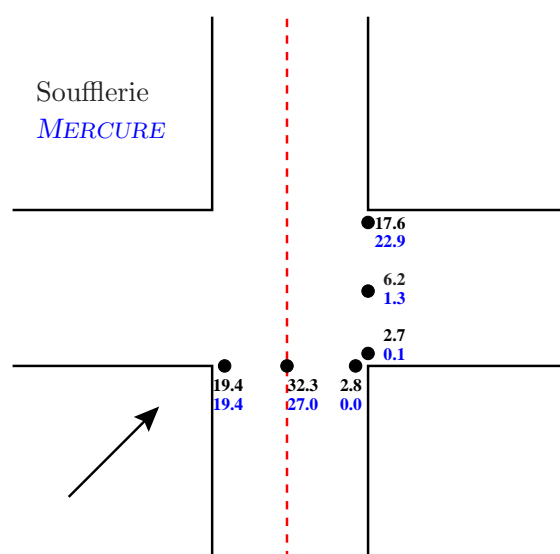
a) $\theta = 15^\circ$: MERCURE.b) $\theta = 15^\circ$: Soufflerie et MERCURE.c) $\theta = 30^\circ$: MERCURE.d) $\theta = 30^\circ$: Soufflerie et MERCURE.e) $\theta = 45^\circ$: MERCURE.f) $\theta = 45^\circ$: Soufflerie et MERCURE.

Figure III.1.26 – Source linéique dans la rue n° 2. Sensibilité à la direction du vent. À gauche, simulations MERCURE : champ de concentration C^* au sol et lignes de courant issues de la source. À droite, valeurs numériques et expérimentales de la concentration C^* au niveau du sol.

source et une infime partie parvient à diffuser dans la rue perpendiculaire. Lorsque l'angle d'incidence devient plus important, le panache se décompose en deux parties. Les polluants émis à l'amont de l'intersection sont transportés dans la rue perpendiculaire. Les polluants émis en aval sont advectés à l'intérieur de la rue dans laquelle ils ont été émis.

L'analyse des lignes de courant issues de la source nous permet de comprendre la répartition de la concentration. À l'amont de l'intersection, le mouvement hélicoïdal ramène les polluants du côté de la rue situé sous le vent. Dans l'intersection, la concentration est principalement localisée au centre si bien que dans la rue située en aval, c'est le côté au vent qui est le plus pollué, formant ainsi une zone protégée sur la face opposée. Lorsque la portion de la source, située en aval de l'intersection, se trouve au cœur de la zone de recirculation, les polluants sont advectés et dispersés par celle-ci.

Les mesures de concentration, réalisées en soufflerie en quelques points de l'intersection (figures III.1.25-b, d, f et III.1.26-b, d, f), confirment dans l'ensemble relativement bien les comportements décrits précédemment, en particulier dans la localisation des maxima et des minima de concentration. La comparaison quantitative entre les mesures et les simulations n'est pas totalement satisfaisante et des écarts importants sont observés. En particulier, la comparaison est généralement meilleure au voisinage de la source que dans la rue perpendiculaire à celle-ci.

Les valeurs obtenues indiquent également que des écarts d'un facteur supérieur à 10 peuvent exister entre deux points d'une même intersection. Ces écarts sont liés au croisement d'un flux d'air pollué, provenant de la rue contenant la source, et d'un flux d'air frais provenant de la rue perpendiculaire. Les résultats expérimentaux (en soufflerie) de HOYDYSH et DABBERDT (1994), obtenus à l'intersection d'une rue et d'une avenue, révèlent des écarts du même ordre.

Les résultats précédents ont une application directe dans l'étude de la représentativité des capteurs de pollution. En effet, un grand nombre de ces capteurs sont situés au voisinage ou à l'intérieur d'une intersection. Notre étude fournit de nombreux éléments pour comprendre et interpréter ce type de mesures.

III.1.5 Intersection avec place

Pour clore cette étude sur les intersections de rues, nous allons traiter le cas d'une place. Il s'agit ici de montrer, si besoin était, comment la configuration géométrique de l'intersection peut compliquer fortement la nature de l'écoulement.

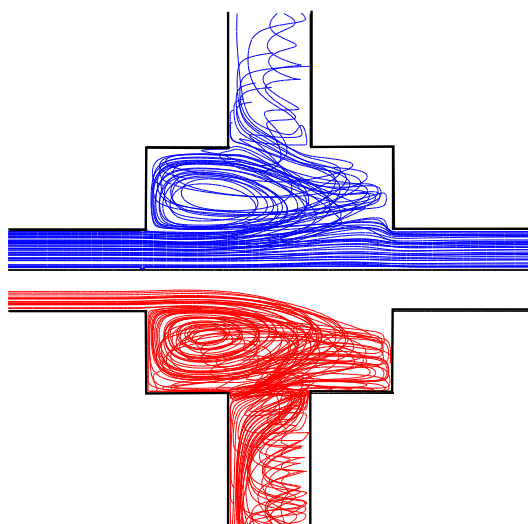
III.1.5.1 Description

Nous avons simulé numériquement deux intersections de tailles différentes, décrites sur la figure III.1.29.

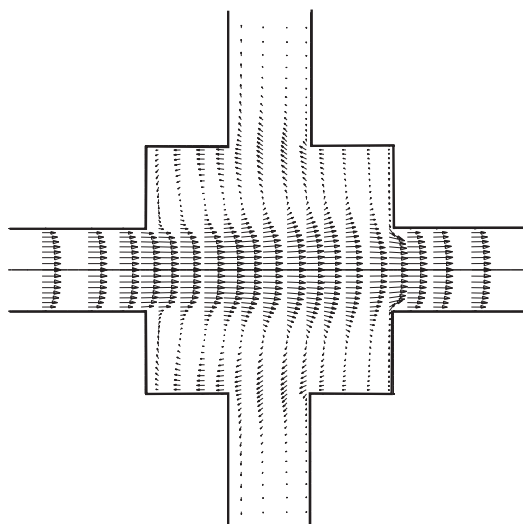
Les rues qui se croisent sont perpendiculaires, de rapport d'aspect $H/W = 1$. La place est de forme carrée ; son côté mesure $3W$ dans le cas n° 1 et $5W$ dans le cas n° 2. Les caractéristiques des maillages sont fournies en annexe B. Pour cette étude, nous nous sommes limités à une direction de vent parallèle à la rue n° 1.

III.1.5.2 Topologie de l'écoulement

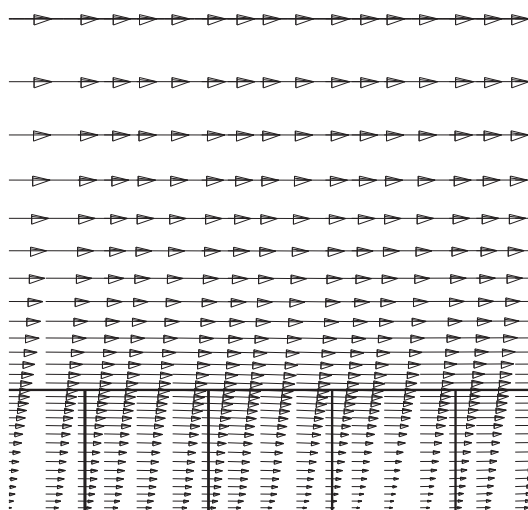
Le champ de vitesse à l'intérieur de la place est représenté sur les figures III.1.27 et III.1.28. De manière générale, l'écoulement est similaire dans les cas n° 1 et n° 2. Dans la rue n° 1, l'écoulement n'est quasiment pas perturbé par la présence de l'intersection. Dans la rue n° 2 (cf. figures III.1.27-e et III.1.28-e), il se forme une recirculation d'axe horizontal, analogue à celle



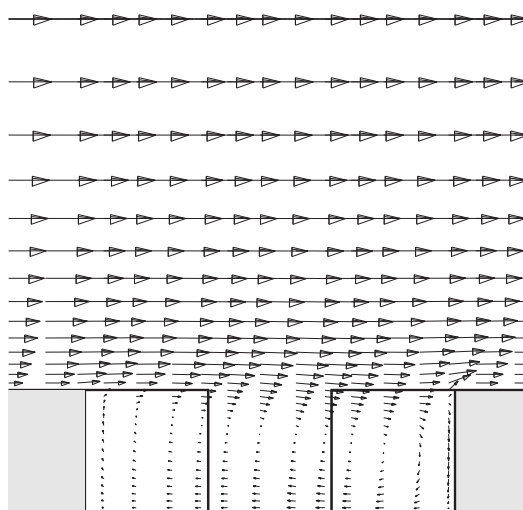
a) Lignes de courant. En bleu sont représentées les lignes de courant traversant l'extrémité de la rue n° 1, en rouge celles traversant l'extrémité de la rue n° 2.



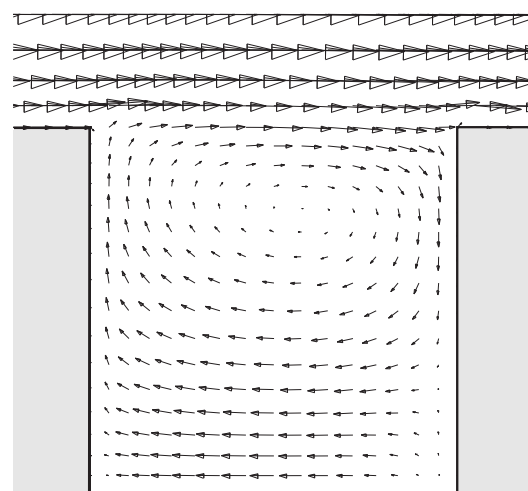
b) Section horizontale $x-y$ à $z = H/2$.



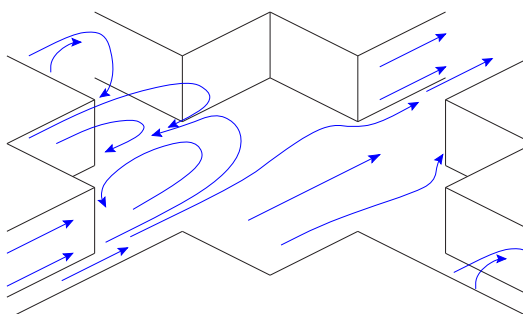
c) Section verticale longitudinale à $y = 0$.



d) Section verticale longitudinale à $y = 20$ m.

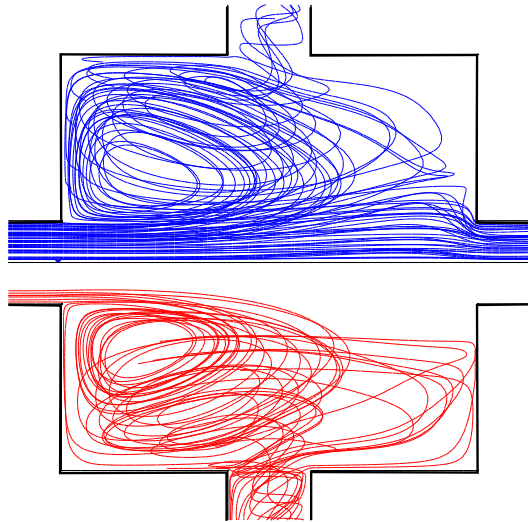


e) Section verticale longitudinale à $y = 30$ m (extrémité de la rue n° 2).

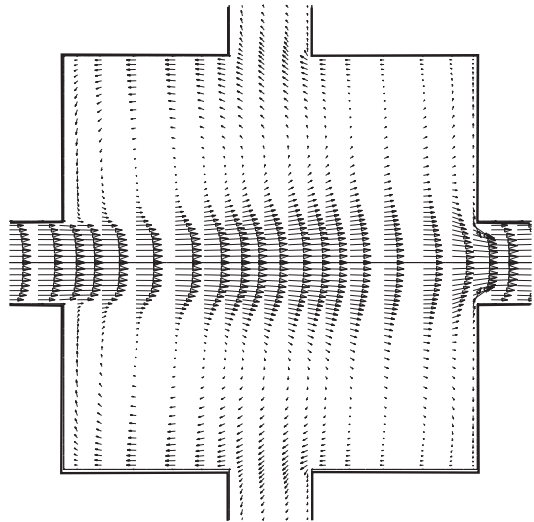


f) Schéma de principe de l'écoulement.

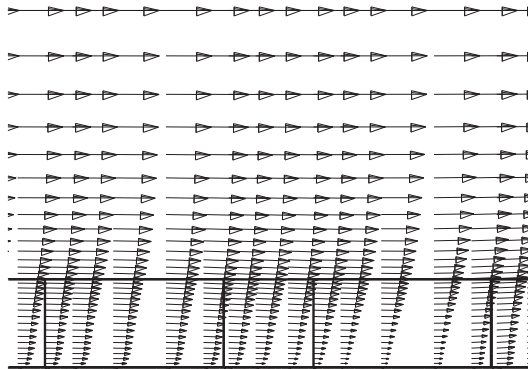
Figure III.1.27 – Écoulement à l'intérieur d'une place : Cas n° 1 (simulation MERCURE).



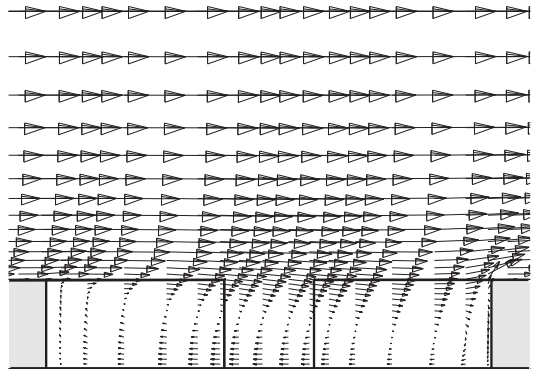
a) Lignes de courant. En bleu sont représentées les lignes de courant traversant l'extrémité de la rue n° 1, en rouge celles traversant l'extrémité de la rue n° 2.



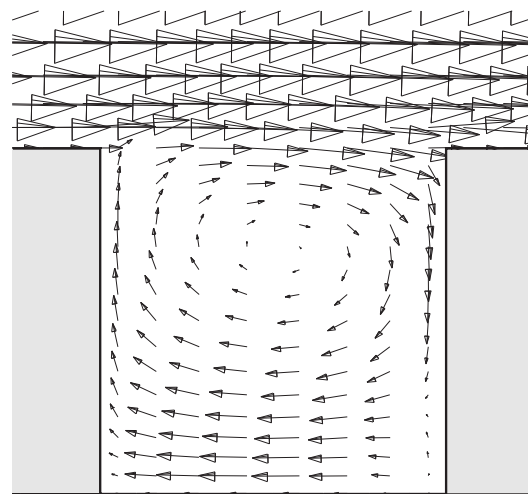
b) Section horizontale $x-y$ à $z = H/2$.



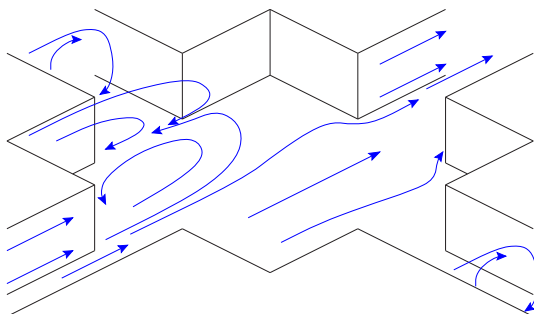
c) Section verticale longitudinale à $y = 0$.



d) Section verticale longitudinale à $y = 30$ m.

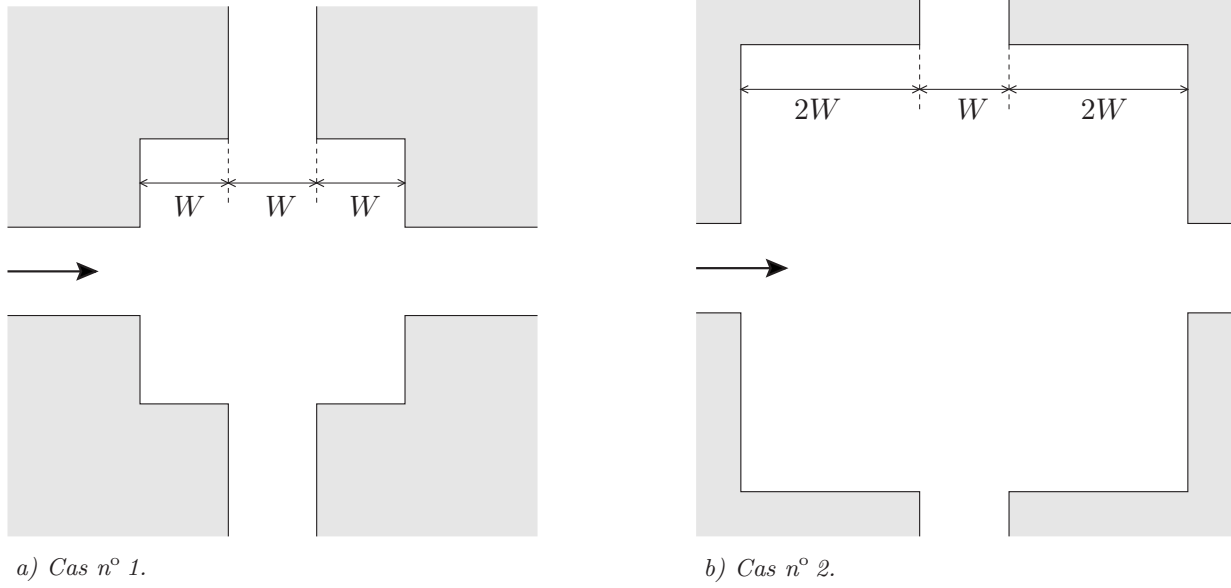


e) Section verticale longitudinale à $y = 50$ m (extrémité de la rue n° 2).



f) Schéma de principe de l'écoulement.

Figure III.1.28 – Écoulement à l'intérieur d'une place : Cas n° 2 (simulation MERCURE).

Figure III.1.29 – *Intersections avec place.*

observée dans une rue infinie. Contrairement au cas d'une intersection simple (cf. §III.1.4), cette recirculation est présente jusqu'à l'extrémité de la rue. Au niveau de cette extrémité, le flux d'air est orienté de l'intersection vers l'intérieur de la rue ; ce flux se combine à la recirculation pour former un mouvement hélicoïdal entrant.

La majeure partie des perturbations sont localisées à l'intérieur de la place. L'écoulement principal traverse cette place, dans l'axe de la rue n° 1 (cf. figures III.1.27-c et III.1.28-c). Cet écoulement génère une recirculation tridimensionnelle dans la partie latérale (cf. figures III.1.27 et III.1.28, b et d). Cette recirculation est à rapprocher de celle observée à l'extrémité de la rue n° 2, dans le cas d'une intersection simple. Le schéma de principe de l'écoulement est représenté sur les figures III.1.27-f et III.1.28-f.

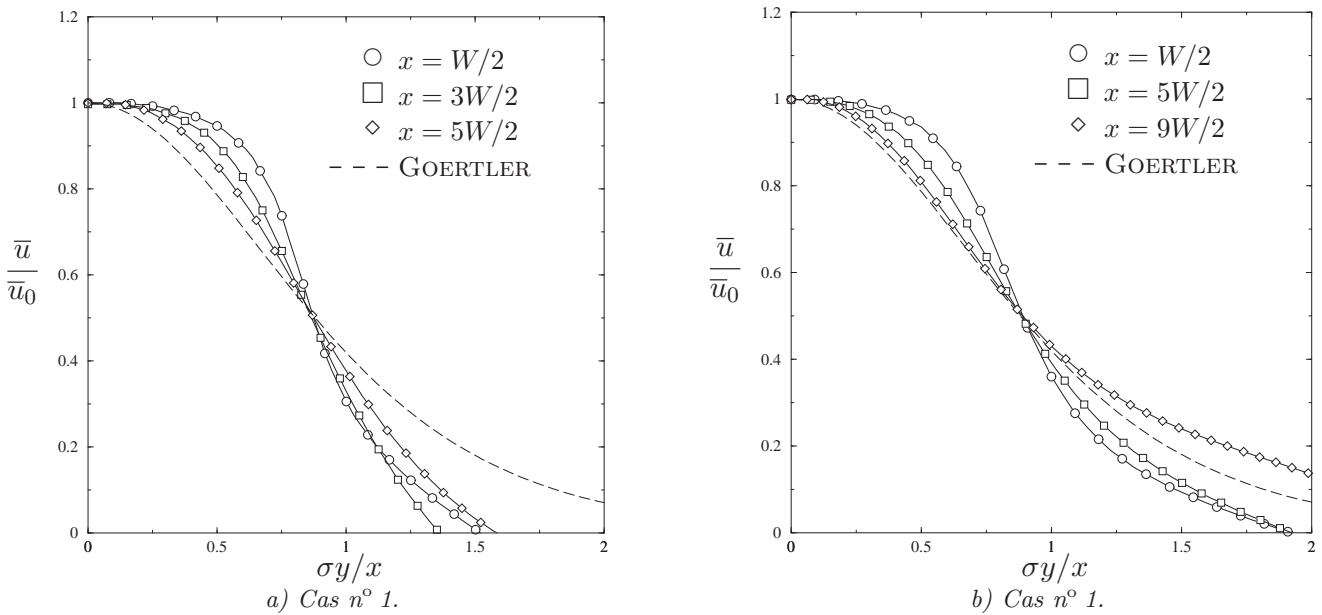


Figure III.1.30 – *Profil transversal (selon y) de vitesse \bar{u} à $z = H/2$. Comparaison à la solution analytique de GOERTLER (1942) pour un jet plan. Les positions x des profils sont indiquées par rapport à l'entrée de la place.*

L'écoulement provenant de la rue n° 1 et pénétrant dans la place peut être interprété qualitativement comme un jet horizontal. Les mécanismes physiques ne sont pas rigoureusement les mêmes que pour un jet plan car l'entraînement par l'écoulement extérieur joue ici un rôle important. Il est cependant intéressant de se demander si la diffusion latérale de quantité de mouvement s'effectue de manière analogue à celle d'un jet. Pour cela, nous avons représenté, sur la figure III.1.30, l'évolution des profils transversaux de vitesse \bar{u} , adimensionnée par la vitesse \bar{u}_0 sur l'axe. On constate que le profil de vitesse a tendance à se rapprocher d'un profil de jet plan (solution analytique de GOERTLER, 1942) dans la partie aval de la place. Par contre, dans la partie amont, ce comportement n'est pas vérifié.

L'explication de cet écart réside dans la longueur de développement du jet dans notre écoulement. En effet, cette longueur est inférieure à $6W$ (6 fois la largeur initiale du jet), qui correspond à la longueur du cône potentiel (RAJARATNAM, 1976). Or la solution analytique de GOERTLER n'est valable qu'au-delà de cette zone, dans la partie pleinement développée du jet. C'est pourquoi les profils de la figure III.1.30 tendent vers un profil de jet lorsque x devient grand. Par certains aspects, l'écoulement à l'intérieur de la place ressemble donc à celui d'un jet plan. L'entraînement induit par ce jet est à l'origine des recirculations observées dans les parties latérales.

Il apparaît en conclusion que la présence d'une place au niveau de l'intersection a pour effet de localiser les perturbations dans cette zone, de sorte que l'écoulement dans les différentes rues est moins perturbé que dans le cas d'une intersection simple. Du point de vue de la topologie de l'écoulement, il n'existe pas de différence notable entre les deux places étudiées. Ces deux cas correspondent à des configurations d'écoulement confiné, la dimension de la place n'étant pas suffisante pour permettre à l'écoulement extérieur d'y pénétrer de façon sensible.

III.1.5.3 Analyse des flux

Les flux d'air entre les différentes rues sont illustrés sur les figures III.1.27-a et III.1.28-a. On constate que qualitativement, le comportement des flux est similaire à celui observé dans le cas d'une intersection simple. Une partie de l'écoulement de la rue n° 1-amont pénètre dans la rue n° 2. Par contre, il n'existe pas de flux de la rue n° 2 vers la rue n° 1-aval.

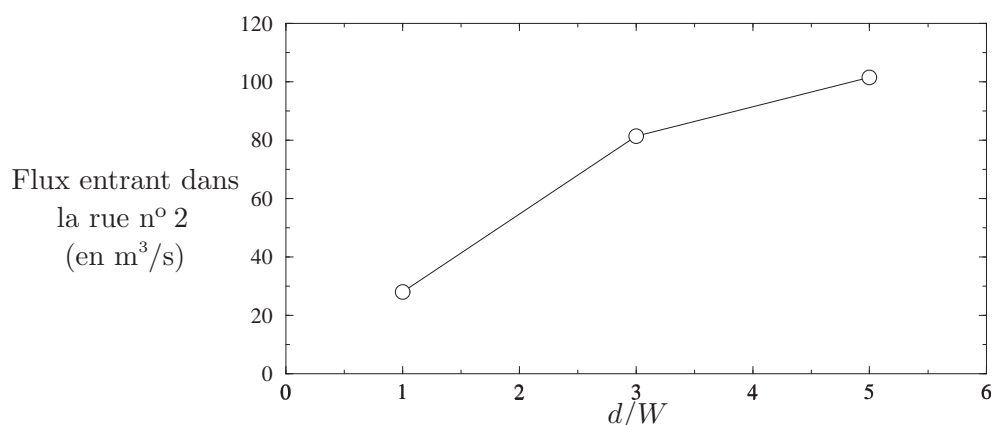


Figure III.1.31 – Flux transversal en fonction du rapport taille de la place / largeur des rues. Le premier point correspond au cas d'une intersection simple.

Nous avons représenté, sur la figure III.1.31, l'évolution du flux transversal en fonction de la taille d de la place. On constate que ce flux est d'autant plus important que la place est grande. Comme dans le cas d'une intersection simple, l'explication de ce phénomène réside dans la notion d'entraînement. En effet, plus la place est grande, plus le jet issu de la rue n° 1 diffuse

à l'intérieur de la place. La vitesse moyenne de l'écoulement à l'intérieur de la place devient alors plus faible et, par conséquent, la pression exercée à l'extrémité de la rue n° 2 devient plus importante. L'air présent dans la rue n° 2 est alors d'autant plus aspiré par l'entraînement à l'interface rue-atmosphère. Il en résulte que le flux transversal est plus important.

III.1.5.4 Bilan

En présence d'une place de petite taille, les perturbations induites par l'intersection sont principalement localisées à l'intérieur de cette place. L'écoulement dans la rue perpendiculaire est beaucoup moins influencé que dans le cas d'une intersection simple. Le comportement général des flux d'air est peu modifié par la présence de la place. L'air pénètre dans la rue perpendiculaire à l'écoulement avec un débit qui est d'autant plus important que la place est grande.

III.1.6 Conclusion

Nous avons proposé, dans ce chapitre, un modèle analytique simple pour décrire une intersection de rues. Ce modèle est basé sur un couplage direct entre la notion de rue et la notion d'intersection (l'effet de l'intersection sur l'écoulement dans la rue n'est pas pris en compte). À partir d'un bilan de masse sur le volume de l'intersection, nous avons mis en évidence l'existence d'un mouvement vertical. L'utilisation d'une approche potentielle permet de modéliser le mouvement horizontal à travers une représentation bidimensionnelle de l'intersection. Cette hypothèse est utilisée pour déterminer un tenseur d'échange entre les différentes rues connectées. Les mécanismes de diffusion ont ensuite été étudiés et reliés à la fluctuation de la direction du vent.

Les simulations numériques et les expériences réalisées en soufflerie ont permis de valider les principales hypothèses de ce modèle. Dans les cas d'une variation de section, nous avons mis en évidence l'apparition de mouvements verticaux. Les caractéristiques des flux horizontaux ont été étudiées sur un carrefour entre deux rues perpendiculaires. Ces résultats ont été généralisés au cas d'une place de petite taille. Si les principaux phénomènes sont en accord avec le modèle proposé, nous avons cependant mis en évidence l'influence non négligeable de l'intersection sur l'écoulement dans les rues adjacentes. Dans le futur, il semble donc important d'envisager un modèle utilisant un couplage inverse entre les rues et les intersections.

Les résultats obtenus jusqu'à maintenant sur une rue bidimensionnelle (cf. partie II) et sur une intersection (au cours de ce chapitre) ont permis de mieux comprendre les mécanismes de transport et de dispersion des polluants à l'intérieur de ces deux géométries élémentaires de la topographie urbaine. L'étape suivante de notre démarche de modélisation va consister à coupler ces deux types de géométrie, afin d'étudier un ensemble de rues inter-connectées formant un quartier. À cette échelle, les méthodes de modélisation classique, prenant en compte explicitement la présence des bâtiments, sont difficiles à mettre en œuvre en raison du nombre d'obstacles à considérer et de leur complexité. Par ailleurs, les méthodes basées sur une approche implicite (modèle de rugosité de paroi) ne sont pas encore utilisables. C'est pourquoi il est nécessaire de développer des outils de modélisation adaptés à cette échelle. Ce problème fait l'objet du chapitre suivant.

III.2 Modèle d'écoulement et de dispersion dans un réseau de rues

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la dispersion des polluants à l'échelle d'un quartier. Après avoir rappelé les principaux travaux sur le sujet, nous introduisons le concept de réseau de rues. Un nouveau modèle de dispersion dans un quartier, basé sur ce concept, est ensuite présenté en détail. Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, des résultats de simulations numériques, réalisées avec le code MERCURE, permettent de mettre en évidence les principaux mécanismes de dispersion dans un quartier et fournissent une validation du modèle proposé.

III.2.1 Introduction

Les résultats présentés au cours des chapitres précédents ont mis en évidence les limitations du concept de *rue infinie isolée*. Nous avons pu observer que les phénomènes liés aux intersections affectent sensiblement le comportement de l'écoulement et de la dispersion à l'intérieur de la rue. Sur le plan pratique, de nombreuses situations illustrent les carences des modèles rue-canyon simples. À titre d'exemple, nous pouvons nous demander comment estimer la pollution dans une rue piétonne (ce type de rue a d'ailleurs tendance à se multiplier en raison même des problèmes de pollution) dans laquelle la circulation automobile est inexistante. Dans ce cas, peut-on raisonnablement négliger la contribution des rues voisines dans le calcul de la concentration ? Ces éléments de réflexion illustrent la nécessité de modéliser les interactions entre plusieurs rues. Pour cela, nous allons introduire la notion de *réseau de rues*.

Les études sur les réseaux de rues sont très rares dans la littérature, où l'hypothèse d'une rue isolée est encore couramment utilisée. Pourtant, les rues considérées dans ces études sont très souvent situées au sein d'un réseau, en particulier lors d'expériences in situ ou en soufflerie. Malheureusement, les mesures effectuées et l'analyse des résultats sont généralement limitées à une seule rue. À notre connaissance, la seule étude de terrain concernant plusieurs rues voisines a été réalisée dans un quartier de Londres par CROXFORD (1995 ; 1996 ; 1998). Cette étude a essentiellement été analysée sous l'angle de la *syntaxe spatiale* du quartier et de sa corrélation à la pollution. Les données fournissent donc peu d'information sur la dispersion des polluants dans le réseau.

Les expériences en soufflerie sont assez bien adaptées pour étudier les réseaux de rues, dans lesquels il est nécessaire de considérer un grand nombre de bâtiments. Pourtant, là encore, très peu d'études ont pu être recensées. Lors d'expériences sur plusieurs intersections de rues,

HOYDYSH et DABBERDT (1994) ont effectué des visualisations de la dispersion d'un panache de polluants à l'intérieur d'un réseau. Même si ces résultats sont qualitatifs, ils illustrent nettement les interactions entre plusieurs rues en fonction de la direction du vent. Ils montrent en particulier que l'étalement *topologique*, associé à l'organisation du réseau, devient prépondérant devant la dispersion proprement dite. En particulier, l'étalement du panache est plus ou moins important selon que le vent est parallèle, perpendiculaire ou incliné par rapport au réseau. Dans ce dernier cas, l'étalement est maximum car l'écoulement suit une trajectoire sinueuse pour contourner les bâtiments. Ce comportement est à rapprocher de l'effet topologique rencontré dans les groupes d'obstacles organisés en quinconce (FUNG et HUNT, 1991). Ces observations sont confirmées par les expériences de WEDDING *et al.* (1977). Ces auteurs ont mesuré l'étalement d'un panache dans un réseau régulier de rues. Ils ont mis en évidence que l'étalement est maximum pour un vent orienté à 45° par rapport au réseau, et minimum lorsqu'il est parallèle à la rue contenant la source. Ces résultats démontrent clairement que les polluants circulent dans un réseau de rues et qu'ils peuvent être transportés d'une rue à l'autre. Cela souligne la nécessité de prendre en compte ces phénomènes, non seulement pour calculer la concentration dans une rue, mais également pour déterminer l'étalement d'un panache de polluants dans un quartier.

En ce qui concerne la modélisation, il n'existe quasiment pas d'études sur le sujet. Les modèles numériques sont difficiles à utiliser pour ce type de problèmes en raison de la quantité de mailles nécessaires pour représenter les nombreux bâtiments. Seuls quelques modèles rue-canyon simplifiés traitent en partie le problème. Le modèle CPBM (YAMARTINO et WIEGAND, 1986) permet de décrire le champ de concentration dans une rue en tenant compte des échanges au niveau des intersections. Nous avons cependant montré, au chapitre précédent, que la paramétrisation de ces échanges est trop simplifiée pour pouvoir décrire la réalité des phénomènes. Par analogie, le modèle SBLINE (NAMDEO et COLLS, 1996) décrit l'ensemble d'un réseau de rues, en décomposant la concentration dans chaque rue en deux termes : la contribution de la rue elle-même est représentée avec le modèle CPBM ; la contribution des rues voisines est prise en compte par un modèle gaussien, en supposant que le panache de polluants est transporté comme s'il n'y avait pas de bâtiments. Cette approche n'est pas très satisfaisante car elle ne traite pas les échanges entre les rues, au niveau des intersections.

Ce rapide aperçu de la littérature sur le sujet met en évidence l'absence d'outils de modélisation adaptés pour décrire la dispersion des polluants dans un réseau de rues, et le manque de données expérimentales et numériques pour valider ces outils. Par contre, il faut noter que de nombreuses données topographiques nécessaires à cette modélisation sont d'ores et déjà disponibles et ne sont pas pleinement exploitées. Au cours de ce chapitre, nous proposons d'étudier le problème de la modélisation à cette échelle. Dans un premier temps, nous détaillerons les principes d'un nouveau modèle appliqué, destiné à modéliser un réseau de rues. Ce modèle sera fondé sur un certain nombre de modélisations et de résultats présentés dans les chapitres précédents. Il permettra en particulier de réunir les concepts de *rue* et d'*intersection*, et constituera, en quelque sorte, une synthèse des résultats de notre travail.

Dans un deuxième temps, nous présenterons des résultats de simulations numériques, réalisées avec le code *MERCURE*, sur un réseau de rues idéalisé. Ces résultats seront analysés et comparés au modèle développé.

III.2.2 Présentation du modèle

III.2.2.1 Principe – Description topologique du réseau

En raison de l'organisation du bâti à l'intérieur des villes, la plupart des informations relatives aux transports urbains sont organisées et stockées à l'aide de la notion de *réseau* ou de *graphe*

des rues. Les données informatiques des *Systèmes d'Information Géographique* (SIG) fournissent par exemple le trafic automobile (flux de véhicules, vitesse moyenne) pour chaque tronçon d'un réseau de circulation, qui correspond plus ou moins au réseau des rues. Pour concevoir un modèle appliqué de dispersion des polluants émis par les transports urbains, il serait donc intéressant de fonder ce modèle sur cette même notion de réseau.

La difficulté du problème réside alors dans la quantité d'informations géométriques à traiter si l'on souhaite pouvoir modéliser un réseau de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de rues. Nous montrerons au paragraphe III.2.3 que le maillage, utilisé pour modéliser avec le code *MERCURE* un petit quartier de quelques rues, est de plusieurs centaines de milliers de points. Pour étudier une seule situation météorologique, le temps de calcul est alors de plusieurs dizaines d'heures sur une station de travail. Il n'est donc pas envisageable d'utiliser ce type de modélisation pour des applications pratiques. Afin de résoudre ce problème, il est intéressant de faire une analogie avec d'autres domaines de la mécanique des fluides, dans lesquels la notion de réseau est couramment utilisée. C'est le cas des écoulements dans les canaux ou dans les tuyaux. Dans l'Antiquité, lorsque les premiers réseaux d'irrigation sont apparus (d'abord en Égypte et en Mésopotamie, puis chez les Grecs et les Romains qui développèrent l'utilisation des aqueducs), des méthodes empiriques servaient déjà à dimensionner des dizaines de canaux, bien des siècles avant l'invention du premier ordinateur. En s'inspirant de ces méthodes simples, on peut espérer construire un modèle rapide, nécessitant peu de ressources informatiques. Les réseaux de tuyaux ont des applications encore plus diverses, allant de la circulation cardio-vasculaire à l'adduction d'eau, en passant par les systèmes industriels. Pour calculer l'écoulement dans un circuit de tuyaux, la méthode itérative de HARDY-CROSS (1936) a certainement été la méthode la plus utilisée, même si elle est aujourd'hui remplacée par des approches plus performantes.

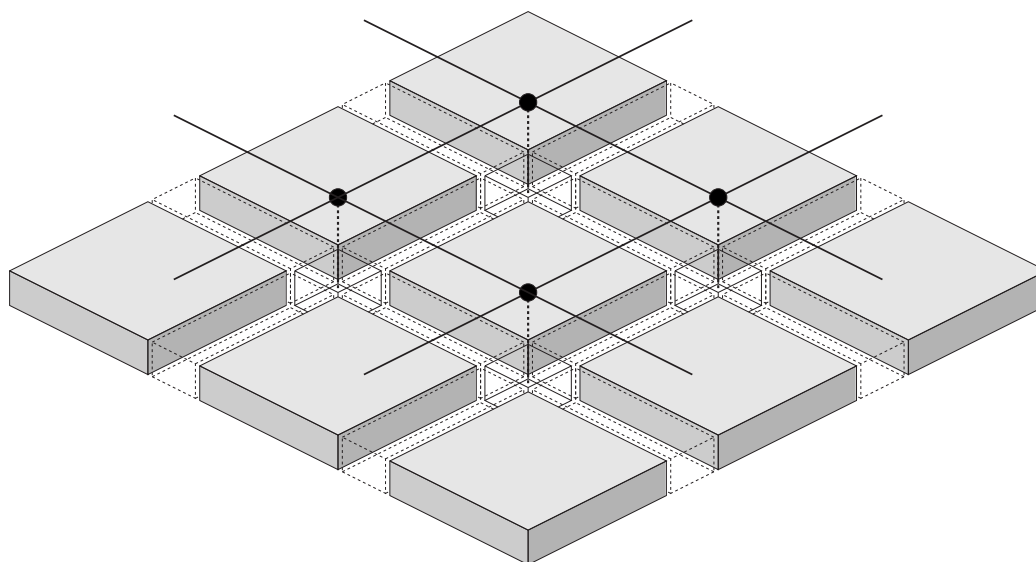


Figure III.2.1 – Topologie d'un réseau de rues. On distingue les segments de rue et les nœuds d'intersection.

Pour représenter un réseau, ces méthodes utilisent les concepts de *segment* (ou *arc*) et de *nœud*. Il est possible d'appliquer ces concepts à un réseau de rues (cf. figure III.2.1). Chaque tronçon de rue peut être représenté par un segment et chaque intersection par un nœud. Le principe des méthodes utilisées pour les tuyaux ou les canaux est d'établir un bilan des pertes de charge sur chaque segment et de garantir la conservation des débits en chaque nœud. C'est globalement le principe que nous allons reprendre dans notre modèle.

Cependant, il existe des différences importantes entre l'écoulement dans la canopée urbaine et l'écoulement dans des tuyaux ou des canaux. Dans un tuyau, le fluide est contraint à entrer et sortir par les extrémités. Le moteur de l'écoulement est la différence de charge (en l'occurrence de pression) entre ces extrémités. Dans le cas d'un canal, on suppose généralement que le fluide ne déborde pas du canal. Le moteur de l'écoulement est la force de gravité (ou la différence d'altitude), que l'on peut également exprimer sous forme d'une différence de charge. Dans les deux cas précédents, la différence de charge est une grandeur qui doit être équilibrée sur l'ensemble du réseau. Dans le cas de la canopée urbaine, l'air a la possibilité de s'échapper verticalement de la rue. Par ailleurs, nous avons montré que l'écoulement dans la rue est entraîné par le cisaillement avec le vent extérieur. Cela signifie que d'un point de vue aérodynamique, une rue dépend davantage de l'écoulement extérieur que de l'écoulement dans les autres rues. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser la notion de charge pour équilibrer les efforts moteurs dans tout le réseau.

C'est pour cette raison que nous avons développé une méthode spécifique pour modéliser l'écoulement et la dispersion dans un réseau de rues. Cette méthode est essentiellement basée sur l'utilisation de modèles de boîte pour décrire chaque segment de rue et chaque nœud d'intersection. Les grandeurs calculées pour chaque rue seront les valeurs de la vitesse et de la concentration moyennées sur le volume de la rue. Un tel modèle permet donc de déterminer la répartition de la pollution entre les différentes rues mais ne permet pas de déterminer la répartition de concentration à l'intérieur même d'une rue. Pour cela, un couplage avec les modélisations de la deuxième partie sera nécessaire. Au cours des paragraphes suivants, nous allons décrire les différents éléments de ce modèle :

- La modélisation d'un tronçon de rue.
- La modélisation d'une intersection.
- La modélisation de l'écoulement extérieur.
- La résolution numérique du problème.

III.2.2.2 Modélisation d'un tronçon de rue

Chaque tronçon de rue est schématiquement défini par un volume parallélépipédique (cf. figure III.2.1) de longueur L , de largeur W et de hauteur H (on suppose que les bâtiments de chaque côté de la rue sont de même hauteur). On considère également que les caractéristiques de l'écoulement au-dessus de la rue (vitesse et direction du vent) sont connues.

III.2.2.2.1 Écoulement moyen

Pour déterminer la vitesse moyenne à l'intérieur du volume précédemment défini, il est nécessaire d'utiliser les propriétés du champ de vitesse, évoquées dans la deuxième partie. Nous avons montré que la composante de l'écoulement dans le plan perpendiculaire correspond à un mouvement tourbillonnaire. Cela signifie que la composante transversale moyenne de l'écoulement dans la rue est nulle. Nous avons également montré que la composante longitudinale moyenne, notée U_{rue} , ne dépend que de l'entraînement par l'écoulement extérieur. Cette vitesse moyenne peut être calculée à l'aide du modèle d'écoulement décrit au chapitre II.3.

En intégrant les relations II.3.8 et II.3.19 sur une section de la rue, on obtient une relation de la forme :

$$U_{rue} = u_* \cos(\theta_\infty) \cdot h(H/W, z_i/W) \quad (\text{III.2.1})$$

En réalité, le calcul exact de l'intégrale est impossible en raison de la présence de fonctions de BESSEL. En utilisant la solution approchée II.3.14 (loi logarithmique) pour exprimer la vitesse

dans la zone II, il est possible de calculer la fonction h et de corriger l'erreur par un coefficient multiplicatif. La vitesse moyenne dépend alors des paramètres suivants :

- La projection $u_* \cos(\theta_\infty)$ de la vitesse de frottement de l'écoulement extérieur sur l'axe de la rue.
- Le rapport d'aspect H/W de la rue.
- Le rapport z_i/W entre la rugosité des parois et la largeur de la rue.

Nous avons représenté, sur les figures III.2.2-a et b, l'évolution de la fonction h en fonction des deux derniers paramètres. On constate que plus la rue est étroite et les parois rugueuses, plus la vitesse longitudinale moyenne est faible.

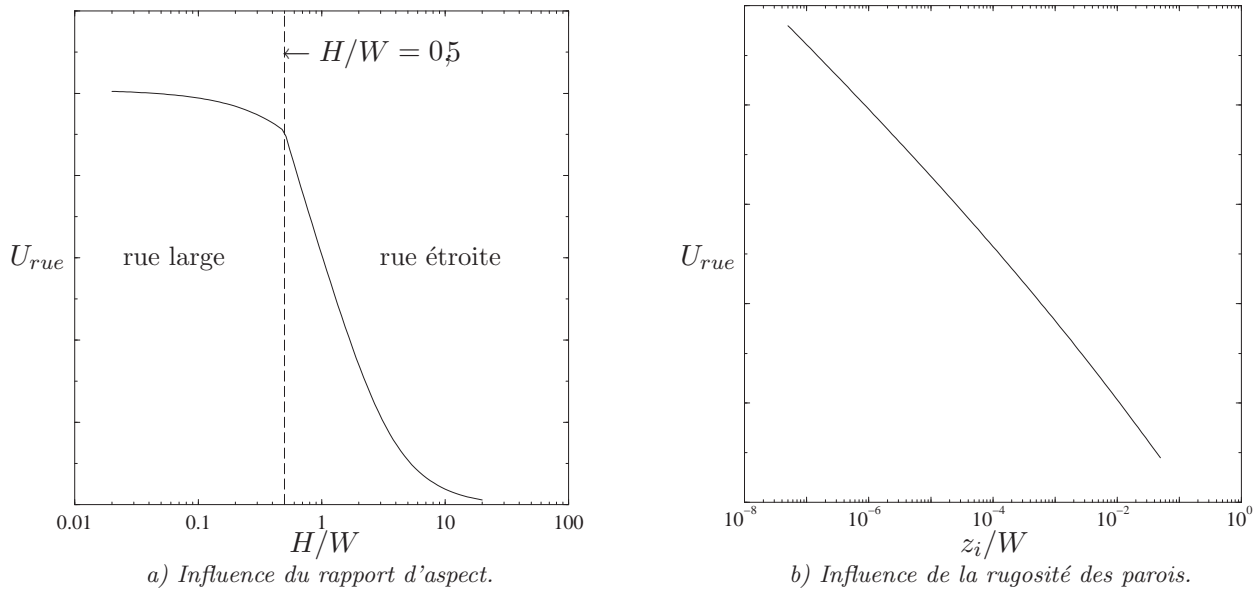


Figure III.2.2 – Évolution de la vitesse en fonction du rapport d'aspect H/W et de la rugosité des parois de la rue z_i .

Il est important de noter que dans ce modèle, l'influence des intersections sur l'écoulement dans la rue n'a pas été prise en compte, si bien que l'écoulement moyen dans chaque tronçon de rue est calculé indépendamment. La modélisation du couplage rue-intersection devra être abordée lors d'études ultérieures.

III.2.2.2.2 Bilan de la quantité de polluants

Pour modéliser la concentration moyenne à l'intérieur de la rue, nous allons reprendre le modèle de boîte qui a été décrit au paragraphe II.4.3.1.3. Considérons le segment de rue représenté sur la figure III.2.3. La concentration moyenne à l'intérieur de la rue est notée C_{rue} et la concentration extérieure au-dessus de cette rue est notée C_{ext} . La vitesse moyenne U_{rue} évacue un flux de polluants $HWU_{rue}C_{rue}$ à travers l'extrémité aval de la rue. Dans le même temps, un flux Q_E pénètre par l'extrémité amont. Le flux turbulent Q_s à travers l'interface supérieure est modélisé par l'équation II.4.10. Si on note Q le débit total des sources situées dans la rue, l'équation-bilan stationnaire sur le volume s'écrit :

$$Q + Q_E - HWU_{rue}C_{rue} + \frac{\sigma_w WL}{\sqrt{2\pi}}(C_{ext} - C_{rue}) = 0 \quad (\text{III.2.2})$$

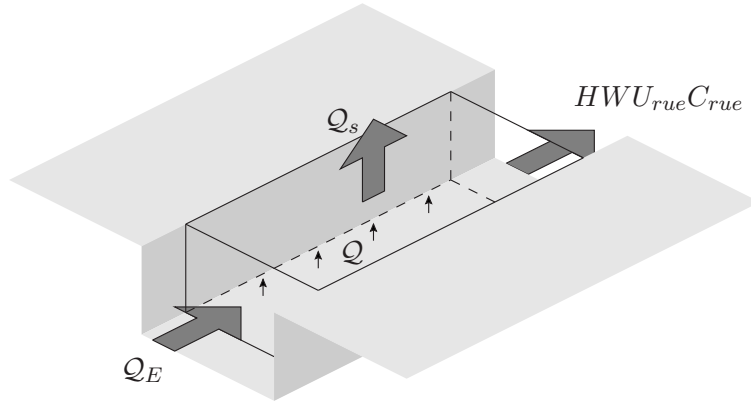


Figure III.2.3 – Bilan des flux sur le volume de la rue.

Si l'on suppose que σ_w est connu, cette équation fait intervenir trois inconnues : le flux Q_E et les concentrations C_{ext} et C_{rue} . Le flux Q_E , provenant de l'extrémité amont, sera déterminé à partir du modèle d'intersection présenté au paragraphe III.2.2.3. La concentration au-dessus de la rue est due aux polluants transportés à l'extérieur de la canopée. Elle sera modélisée au paragraphe III.2.2.4. L'équation III.2.2 constitue donc la première équation d'un système couplé, reliant les différentes rues, les intersections et l'atmosphère extérieure. Le modèle de boîte précédent a été repris par MENSINK *et al.* (1999) pour étudier une rue isolée. Ces auteurs ont comparé notre approche, ainsi que les modèles STREET et OSPM, à des mesures in situ réalisées à Anvers (Belgique). Cette étude indique que notre modèle de boîte fournit des résultats comparables, voire parfois meilleurs, par rapport aux autres modèles.

III.2.2.3 Modélisation d'une intersection

III.2.2.3.1 Bilan aérodynamique

Pour modéliser une intersection, nous allons utiliser l'approche proposée au chapitre III.1. Considérons une intersection constituée par la jonction de N_I segments de rues. Chaque rue d'indice i est caractérisée par sa largeur W_i , sa hauteur H_i et sa vitesse moyenne $U_{rue,i}$, comptée positivement si l'écoulement entre dans l'intersection. Le calcul de chaque vitesse $U_{rue,i}$ est effectué indépendamment à l'aide de la relation III.2.1. Comme l'égalité des flux horizontaux entrant et sortant de l'intersection n'est pas garantie a priori, un mouvement vertical résultant peut apparaître. Citons par exemple le cas d'un rétrécissement ou d'un élargissement de section d'une rue (cf. §III.1.3). L'orientation de ce mouvement, ascendante ou descendante, dépend du signe du déséquilibre des flux horizontaux. Le débit \dot{V}_v correspondant au mouvement vertical dans l'intersection est alors défini par la relation :

$$\dot{V}_v = \sum_{i=1}^{N_I} H_i W_i U_{rue,i} \quad (\text{III.2.3})$$

III.2.2.3.2 Flux de polluants

Nous avons montré, au chapitre III.1, que les flux d'air (et donc de polluants) entre les rues d'une intersection se répartissent en fonction de la position relative de ces différentes rues (cf. figure III.1.7). Pour quantifier cet effet, nous avons défini un *tenseur d'échange turbulent* $\widehat{\mathcal{Q}}(\theta_0)$, où $\widehat{\alpha}_{i,j}(\theta_0)$ représente le débit d'air moyen circulant de la rue i vers la rue j . Ces coefficients sont déterminés en utilisant le raisonnement décrit au paragraphe III.1.2. Il faut noter que le tenseur $\widehat{\mathcal{Q}}(\theta_0)$ dépend de la direction θ_0 du vent extérieur.

À partir de la répartition des flux d'air, il est possible de déterminer les flux de polluants entrant et sortant de l'intersection. Si l'on connaît la concentration moyenne $C_{rue,i}$ à l'intérieur de chacune des rues, les flux entrant dans l'intersection sont du type $H_i W_i U_{rue,i} C_{rue,i}$. Les flux $Q_{E,j}$ sortant par la rue j (comptés positivement) dépendent du tenseur d'échange par la relation :

$$Q_{E,j} = \sum_{i=1}^{N_I} \hat{\alpha}_{i,j}(\theta_0) C_{rue,i} + \dot{V}_{ext \rightarrow j} C_{ext} \quad (\text{III.2.4})$$

où C_{ext} représente la concentration dans l'écoulement extérieur, au-dessus de l'intersection. Lorsqu'il existe un mouvement vertical entrant dans l'intersection ($\dot{V}_v < 0$), le flux $\dot{V}_{ext \rightarrow j}$ permet de quantifier le débit d'air circulant de l'atmosphère extérieure vers la rue j . Ce mouvement a pour effet "d'aspirer" une partie de la pollution extérieure jusque dans l'intersection. Dans le cas contraire ($\dot{V}_v > 0$), une partie des polluants présents dans la canopée urbaine est transportée dans l'écoulement extérieur.

Du point de vue de la dispersion dans l'écoulement extérieur, ces échanges de matière peuvent être modélisés par une source ou un puits de polluants, générant un panache en aval de l'intersection. Le débit Q_v de cette source peut être déterminé par les expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{ll} Q_v = \sum_{i=1}^{N_I} \dot{V}_{i \rightarrow ext} C_{rue,i} & \text{si le flux est sortant.} \\ Q_v = - \sum_{i=1}^{N_I} \dot{V}_{ext \rightarrow i} C_{ext} & \text{si le flux est entrant.} \end{array} \right. \quad (\text{III.2.5})$$

L'équation III.2.4 définit le flux entrant par l'extrémité amont de la rue. Elle permet donc de déterminer une des inconnues de l'équation III.2.2. Par contre, ces deux équations font intervenir une inconnue qu'il reste à déterminer : la concentration C_{ext} dans l'écoulement extérieur, à la verticale de chaque rue et de chaque intersection. Pour modéliser cette inconnue, intéressons-nous maintenant à la dispersion au-dessus de la canopée urbaine.

III.2.2.4 Écoulement et dispersion au-dessus de la canopée

La dernière étape de la modélisation consiste à représenter la dispersion des polluants dans la couche limite atmosphérique. Les polluants présents dans cette partie de l'écoulement contribuent à augmenter la concentration C_{ext} à la verticale des rues et des intersections (cf. figure III.2.4-a). Pour pouvoir fermer le système d'équations, il est donc nécessaire de modéliser les concentrations correspondantes. Les sources de polluants qui émettent dans l'écoulement extérieur peuvent être décomposées en deux catégories :

- Nous avons montré précédemment que les polluants émis à l'intérieur des rues peuvent être éjectés au-dessus du niveau des toits, soit par un flux turbulent à l'interface rue-atmosphère, soit par un flux convectif au niveau des intersections (cf. figure III.2.4-b). Ces flux se comportent comme des sources (ou des puits) à prendre en compte dans l'écoulement extérieur.
- D'autres types de sources émettent directement dans l'atmosphère extérieure : la circulation automobile sur un tronçon de rue dégagé (sans bâtiments), les cheminées sur les toits, les émissions industrielles, ... Ces émissions contribuent également à augmenter la concentration C_{ext} .

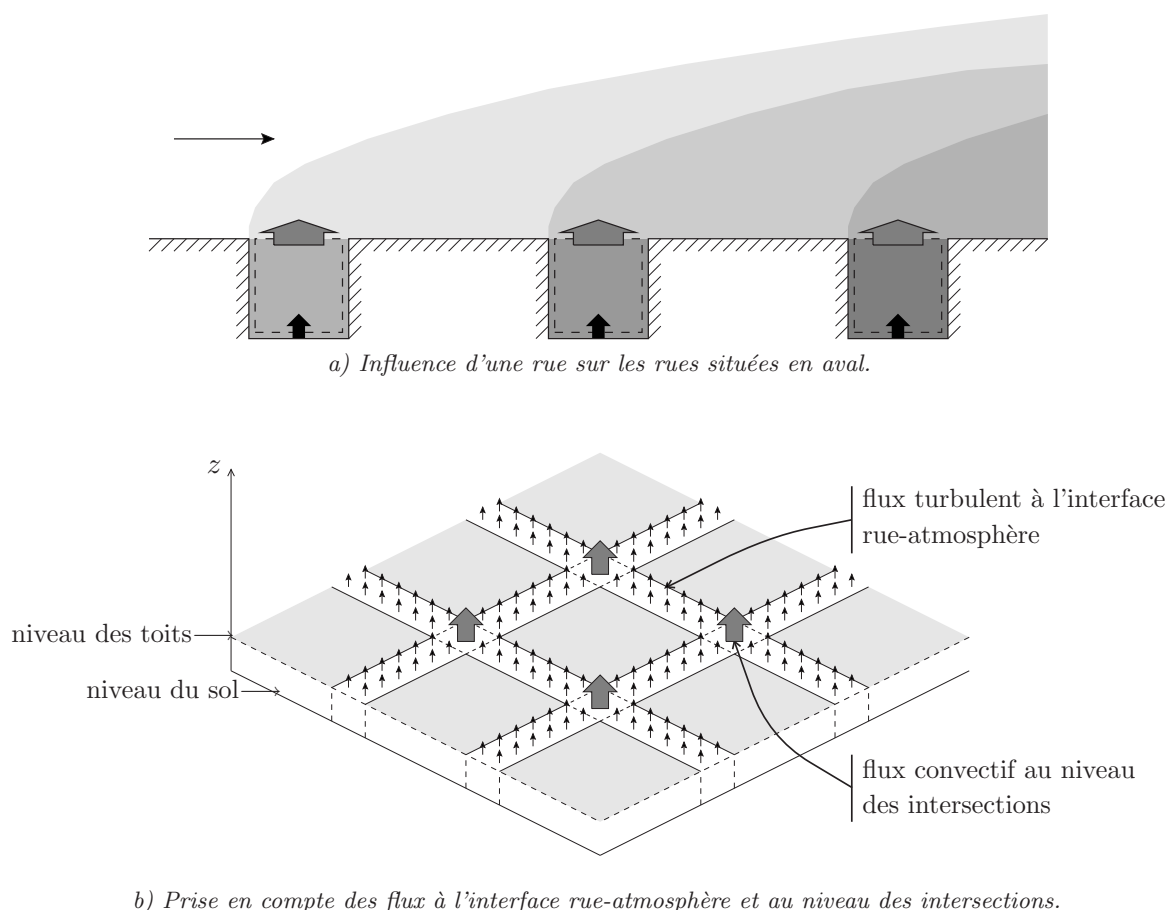


Figure III.2.4 – Dispersion dans l'atmosphère extérieure.

La dispersion des polluants au-dessus de la canopée urbaine est contrôlée par des structures turbulentes dont la taille est largement supérieure à la largeur de la rue. Ces structures dépendent de processus physiques relevant de la micro-météorologie à l'échelle d'une agglomération. Parmi ces processus, citons, entre autres, la présence de relief, la stabilité thermique de l'atmosphère ou la rugosité aérodynamique du tissu urbain. La modélisation à cette échelle dépasse le cadre fixé pour notre étude. C'est pourquoi nous supposons que notre approche s'inscrit dans une hiérarchie de modèles et que les informations, nécessaires pour traiter la dispersion des polluants dans l'écoulement extérieur, seront fournies par un modèle fonctionnant à une échelle plus large.

III.2.2.4.1 Écoulement

Considérons que l'écoulement atmosphérique au-dessus du quartier étudié est connu. Pour simplifier le traitement de la dispersion, nous effectuerons deux hypothèses concernant cet écoulement. Nous supposons tout d'abord que l'écoulement est uniforme à l'échelle du quartier, et qu'il peut être représenté par un unique vecteur \mathbf{U}_{ext} . Nous négligeons ainsi toutes les déviations locales du vent, dues à l'influence des bâtiments sur l'écoulement. La valeur de \mathbf{U}_{ext} pourra être fournie soit par un modèle à plus grande échelle, soit par une mesure locale du vent.

Ce vecteur vitesse résulte d'un certain nombre de phénomènes extérieurs, dont en particulier la présence du relief. L'influence du relief étant prise en compte dans \mathbf{U}_{ext} , il n'est pas nécessaire de représenter explicitement ce phénomène dans le modèle. Nous supposons donc, comme deuxième hypothèse, que le niveau des toits, qui correspond à l'interface entre la canopée et l'écoulement extérieur, est une surface plane. Dans certains cas où la présence du relief induit un mouvement vertical orienté vers l'intérieur de la canopée (au sommet d'une colline, par exemple),

cette approche ne permettra pas de représenter correctement les phénomènes. Cependant, dans la plupart des cas, on pourra supposer qu'il n'existe pas de flux vertical moyen induit par le relief et, par conséquent, que notre hypothèse est acceptable. Pour modéliser la dispersion dans l'écoulement extérieur, nous considérerons que toutes les sources, susceptibles de diffuser au-dessus de la canopée, sont situées sur cette surface fictive correspondant aux toits¹. La prise en compte de l'écoulement extérieur se restreint donc à l'étude de la dispersion dans un écoulement uniforme, sur un sol plat.

III.2.2.4.2 Dispersion

Pour décrire simplement la dispersion des polluants dans la couche limite atmosphérique, nous allons utiliser un modèle gaussien (cf. chapitre I.3). Pour exprimer les écarts-types de diffusion σ_y et σ_z , nous emploierons la paramétrisation empirique fournie par BRIGGS (1973) pour un sol urbain. Les caractéristiques thermiques de l'atmosphère sont alors représentées à l'aide des classes de stabilité de PASQUILL. Des paramétrisations plus complètes, basées sur la théorie de la similitude de MONIN-OBUKHOV, sont également envisageables (voir PASQUILL et SMITH, 1983). Elles nécessitent cependant des informations plus détaillées concernant la structure thermique de l'atmosphère. C'est pourquoi, dans le cadre de ce travail, nous nous sommes limités à l'utilisation de la classification de PASQUILL.

Les sources de polluants à prendre en compte sont les flux turbulents sur la face supérieure des rues, les flux convectifs au niveau des intersections, les routes dégagées et les sources dites *ponctuelles*, comme par exemple les cheminées. Bien qu'en réalité il s'agisse souvent de sources surfaciques, nous les modéliserons à l'aide de sources linéiques – pour les segments de rues ou les tronçons de routes – ou ponctuelles – pour les intersections ou les cheminées (cf. figure III.2.5).

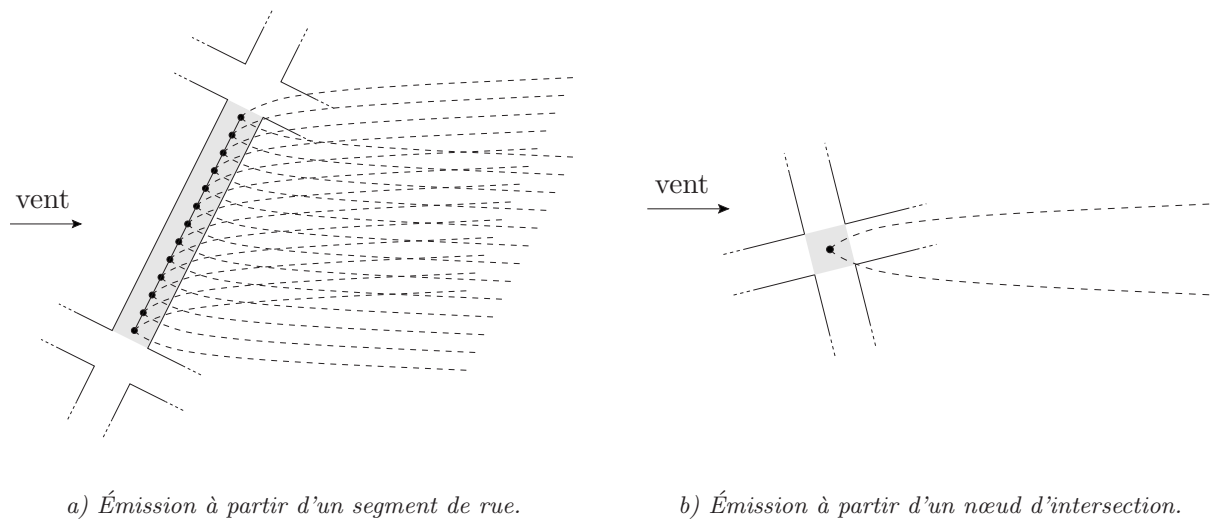


Figure III.2.5 – Discretisation des flux d'émission dans l'atmosphère extérieure.

Pour modéliser la concentration induite par une source ponctuelle et continue dans un écoulement uniforme, on utilise généralement la solution gaussienne approchée, décrite par la relation suivante (cf. annexe A) :

$$\bar{c}(x,y,z) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U_{ext}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (\text{III.2.6})$$

1. À l'exception de sources situées largement plus haut que le niveau des toits, comme par exemple une cheminée d'usine.

Afin de prendre en compte l'existence d'une frontière solide au niveau des toits, une source image est placée de façon symétrique par rapport au plan horizontal situé à $z = H$. Pour simuler une source linéique de longueur finie, orientée de façon quelconque par rapport à la direction du vent, il n'existe pas de solution analytique permettant de représenter les effets de bords. Il est donc nécessaire d'intégrer numériquement la relation III.2.6. Plusieurs algorithmes, plus ou moins complexes, ont été développés par le passé pour réaliser cette intégration et simuler la dispersion à partir d'une route ou d'une autoroute. Citons en particulier les modèles de l'Environmental Protection Agency (USA) : HIGHWAY (PETERSEN, 1980), CALINE (BENSON, 1979 ; BENSON, 1984) et PAL (PETERSEN et RUMSEY, 1987). Pour notre application, nous utiliserons une discrétisation simple du segment de rue en une série de sources ponctuelles réparties uniformément (cf. figure III.2.5). La concentration induite par chaque point source est calculée à partir de la relation III.2.6.

La concentration totale en un point de l'atmosphère extérieure est calculée en effectuant la somme des contributions de toutes les sources linéiques ou ponctuelles². En particulier, il est possible de déterminer la concentration C_{ext} au-dessus de chaque rue et de chaque intersection, explicitant ainsi la dernière inconnue du problème. Il est important de noter que la concentration C_{ext} au-dessus d'une rue dépend des flux sortant au sommet des rues, qui eux-mêmes dépendent de l'écart de concentration $C_{ext} - C_{rue}$ (cf. équation II.4.10) pour chaque rue du réseau. On obtient donc un système linéaire reliant ces différentes concentrations. La dernière partie du modèle permet de résoudre ce système linéaire.

III.2.2.5 Résolution numérique

Dans les paragraphes précédents, nous avons défini une série d'équations linéaires couplées, faisant intervenir un ensemble de variables :

- La concentration $C_{rue,i}$ dans la rue i .
- La concentration $C_{ext,i}$ au-dessus de la rue i .
- Le flux convectif $Q_{E,i}$ entrant dans la rue i par l'extrémité amont.
- La concentration $C_{ext,j}$ au-dessus de l'intersection j .

Le problème peut alors être formalisé par une équation matricielle :

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (\text{III.2.7})$$

où \mathbf{x} représente un vecteur ayant pour composantes les inconnues du problème. Si l'on note N_R et N_I les nombres de rues et d'intersections, le système linéaire est alors composé de $3N_R + N_I$ équations à $3N_R + N_I$ inconnues. Pour un quartier de quelques kilomètres carrés, N_R et N_I peuvent être supérieurs à 100. La taille du système devient alors très importante et il est difficile d'appliquer des méthodes exactes de résolution de systèmes linéaires (du type factorisation LU). Il est alors nécessaire d'utiliser des méthodes itératives.

2. Même si notre modèle semble en apparence analogue au modèle SBLINE (NAMDEO et COLLS, 1996), le principe est en réalité très différent. En effet, SBLINE suppose que chaque rue influence les autres uniquement par l'intermédiaire d'un panache gaussien ayant pour source l'émission automobile dans cette rue. Dans notre modèle, une partie de ce qui est émis dans la rue est advectée à l'intérieur du réseau. L'autre partie (et non la totalité) s'échappe par la face supérieure de la rue et diffuse dans l'atmosphère extérieure. La prise en compte de l'interaction entre les rues est donc plus complexe dans notre modèle.

Les méthodes adaptées pour traiter plusieurs centaines d'équations linéaires utilisent généralement les propriétés du tenseur \mathbb{A} : symétries de la matrice, éléments nuls en dehors d'une bande diagonale, ... Malheureusement, dans notre cas, la matrice n'a pas ces propriétés simplificatrices. En effet, en raison de la dispersion au-dessus des toits, la concentration dans une rue dépend de la concentration dans un grand nombre d'autres rues, si bien que la plupart des éléments de la matrice \mathbb{A} sont non nuls. La seule particularité que nous allons mettre à profit est la direction de l'écoulement. On peut en effet admettre que la concentration en un point ne dépend que des sources situées en amont. En utilisant une méthode itérative du type GAUSS-SEIDEL et en ordonnant les équations dans le sens de l'écoulement, nous avons constaté que le nombre d'itérations nécessaires pour obtenir une solution convergée diminue d'environ 30 % par rapport à une résolution des équations désordonnées. En pratique, quelques itérations suffisent pour obtenir cette convergence et les temps de calcul deviennent tout à fait raisonnables : pour un réseau de 60 rues, le calcul complet de l'écoulement et de la concentration nécessite 0,7 sec. sur une machine DEC ALPHA 250.

III.2.2.6 Bilan

Le modèle de dispersion dans un réseau de rues a été baptisé *SIRANE*. Ce modèle permet de déterminer la concentration moyenne dans chaque rue d'un réseau, en fonction des paramètres suivants :

- **La géométrie du réseau** : position des nœuds, définitions des segments, hauteur et largeur des rues, ...
- **L'écoulement extérieur** : vitesse et direction du vent, fluctuation de vitesse au niveau des toits, ...
- **Les caractéristiques thermiques de l'atmosphère** : classe de stabilité de PASQUILL.

Ce modèle permet de fournir une cartographie de la pollution à l'échelle d'un quartier. Son principe est compatible avec l'organisation des bases de données SIG existantes. Les faibles temps de calcul permettent des études statistiques sur de longues périodes, afin de déterminer l'exposition moyenne ou la représentativité des capteurs de pollution. Quelques applications de ce modèle seront présentées au cours du chapitre IV.2.

Le modèle *SIRANE* a cependant quelques limitations. Sur le plan théorique, plusieurs hypothèses devront être améliorées, comme par exemple le découplage entre l'écoulement dans les rues et dans les intersections, ou l'absence de modèle pour décrire les places. Sur le plan pratique, ce modèle utilise les valeurs des largeurs et des hauteurs de rues. Or, ces informations ne sont pas toujours directement disponibles et il sera souvent nécessaire d'effectuer une mise à jour des bases de données afin de disposer de ces paramètres.

Par ailleurs, le modèle présenté ne prend pas en compte les transformations chimiques qui se développent à l'échelle de la rue. Il est parfaitement envisageable d'effectuer une résolution couplée de la chimie et de la dispersion dans le modèle *SIRANE*. Pour cela, il est nécessaire de rajouter dans le modèle de boîte des termes de production et de destruction des espèces chimiques. Cette résolution n'a pas encore été mise en œuvre dans le modèle. Néanmoins, afin de pouvoir effectuer un calcul réaliste de la pollution sur un quartier de Lyon (cf. chapitre IV.2), nous avons utilisé un modèle chimique simplifié, découplé de la dispersion. Ce modèle est décrit en annexe E.

Afin de tester le comportement du modèle *SIRANE*, nous allons maintenant effectuer des comparaisons avec quelques simulations numériques de l'écoulement et de la dispersion dans un quartier idéalisé.

III.2.3 Étude numérique de la dispersion dans un réseau de rues

III.2.3.1 Simulations numériques avec le code MERCURE

La simulation numérique de l'écoulement et de la dispersion dans un quartier urbain reste assez difficile à mettre en œuvre en raison des moyens informatiques nécessaires pour décrire en détail l'ensemble des bâtiments. C'est pourquoi nous nous sommes limités à l'étude d'une configuration idéalisée simple, visant essentiellement à comprendre les mécanismes mis en jeu et à valider le modèle proposé.

III.2.3.1.1 Configurations étudiées

Les simulations numériques effectuées avec le code *MERCURE* ont été réalisées sur un quartier idéalisé, schématisé sur la figure III.2.6. Ce quartier est constitué de 36 blocs alignés sur un réseau orthogonal. Chaque bloc modélise un "pâté" de maisons ou de bâtiments par une forme parallélépipédique, définie par son côté $L = 100$ m et sa hauteur $H = 20$ m. Ces dimensions sont représentatives d'une configuration réelle (cf. §IV.1.2.3) mais cette forme simplifiée n'intègre pas le détail des bâtiments, comme par exemple la forme des toits ou la présence d'une cour intérieure.

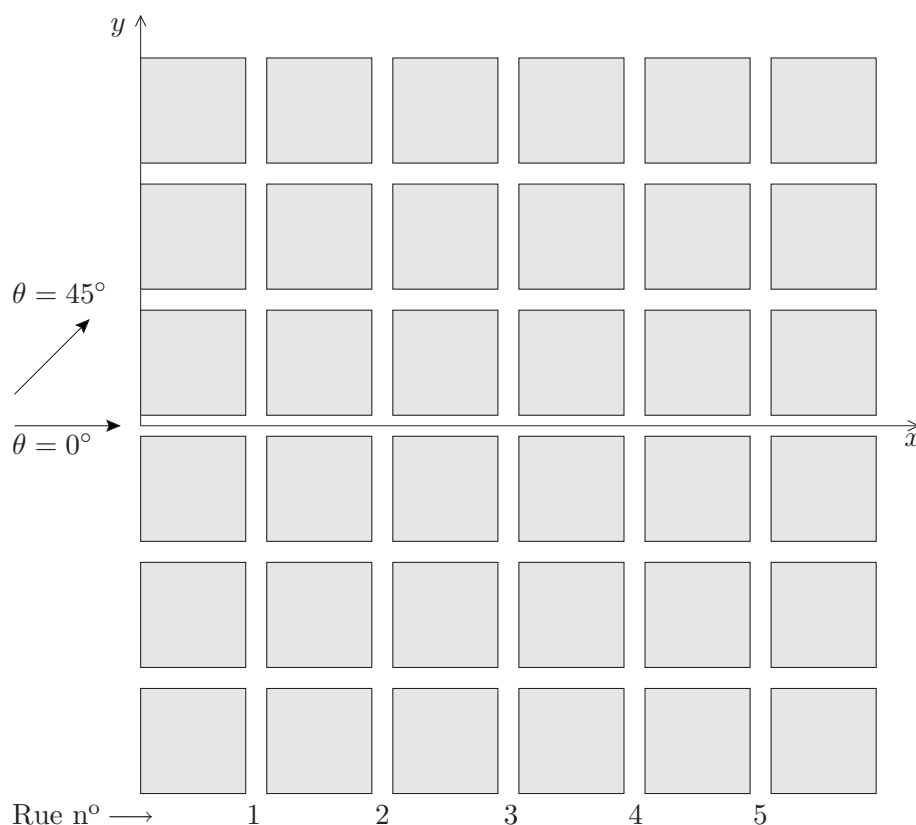


Figure III.2.6 – Organisation du réseau de rues simulé avec le code *MERCURE*.

Au cours d'une première série de simulations, nous nous sommes intéressés à l'influence du rapport d'aspect des rues sur la dispersion des polluants. La direction du vent a été choisie parallèle à l'axe x du réseau. Les différentes valeurs du rapport d'aspect H/W , dans les rues parallèles et perpendiculaires à la direction du vent, sont indiquées dans le tableau III.2.1. Elles correspondent aux valeurs utilisées lors de l'étude sur les intersections (cf. §III.1.4.3). Pour étudier la dispersion des polluants, une source linéique de scalaire passif est utilisée. Cette source

a été placée alternativement dans une rue parallèle puis perpendiculaire à l'écoulement, afin de mettre en évidence les différences de comportement.

	Orientation du vent	Rapport d'aspect H/W		Position de la source
		Rues // à x	Rues // à y	
Cas n° 1-a	0°	1	1	dans une rue // à x
Cas n° 1-b	0°	1	1	dans une rue \perp à x
Cas n° 2-a	0°	1	2	dans une rue // à x
Cas n° 2-b	0°	1	2	dans une rue \perp à x
Cas n° 3-a	0°	2	1	dans une rue // à x
Cas n° 3-b	0°	2	1	dans une rue \perp à x
Cas n° 4-a	45°	1	1	dans une rue // à x
Cas n° 4-b	45°	1	1	dans une intersection

Tableau III.2.1 – *Caractéristiques des réseaux de rues simulés avec le code MERCURE.*

Au cours d'une deuxième série de simulations, nous avons étudié un cas où le vent n'est pas orienté le long d'une des directions principales du réseau. Nous avons choisi une orientation de 45°. Le rapport d'aspect de toutes les rues est alors de 1. Deux sources de scalaire passif ont été étudiées : une source linéique placée dans une rue (compte tenu de l'angle choisi, toutes les rues sont équivalentes) et une source ponctuelle placée au centre d'une intersection.

Dans les différents cas décrits précédemment, l'écoulement extérieur à l'entrée du domaine de calcul est défini par un profil analytique de couche limite logarithmique. Les caractéristiques des différents maillages sont fournies en annexe B. Il faut noter que ces maillages sont relativement grossiers, la largeur d'une rue étant représentée par une dizaine de mailles seulement. Pourtant, malgré cette faible résolution, le nombre de nœuds des maillages varie entre 300 000 et 600 000. De tels maillages nécessitent des temps de calcul supérieurs à une journée, ce qui limite rapidement le nombre de configurations qu'il est possible d'étudier. Cependant, même si la résolution du maillage ne satisfait pas tous les critères numériques (cf. chapitre II.2 ou DELAUNAY, 1997) et même s'il n'a pas été possible de réaliser un grand nombre de simulations, les quelques configurations étudiées nous ont permis de mettre en évidence un certain nombre de comportements caractéristiques de cette échelle.

III.2.3.1.2 Description de la dispersion dans un réseau

Les caractéristiques de l'écoulement à l'intérieur du réseau de rues ont déjà été présentées au cours des chapitres précédents (au chapitre II.4 pour l'écoulement dans un tronçon de rue et au chapitre III.1 pour l'écoulement dans une intersection). C'est pourquoi nous nous intéresserons principalement à la description du champ de concentration.

Sur la figure III.2.7-a, nous avons représenté une visualisation du champ de concentration dans le cas d'une source située à l'intérieur d'un tronçon de rue parallèle au vent. On observe que les polluants sont transportés le long de la rue qui se trouve dans le prolongement de la source. Au niveau des intersections, une partie de ces polluants diffuse latéralement dans les rues perpendiculaires. Cette diffusion latérale est favorisée par le flux d'air qui circule de l'intersection vers la rue perpendiculaire (cf §III.1.4.3). À l'intérieur de celle-ci, la concentration décroît lorsque l'on s'éloigne de l'axe du panache, si bien que la concentration est quasiment nulle dans les rues parallèles à l'émission.

Lorsque la source est placée dans un tronçon de rue perpendiculaire au vent (cf. figures III.2.7-b et c), la dispersion des polluants s'effectue différemment. En effet, une rue perpen-

diculaire se comporte comme une zone de recirculation quasiment fermée du point de vue de l'écoulement moyen (nous avons déjà évoqué cette approximation). Les polluants ne peuvent s'échapper de la rue que par les échanges turbulents, qui existent à son sommet, et par les flux latéraux au niveau des intersections. En comparant les figures III.2.7-b et III.2.7-c, on constate que la concentration est plus importante sur le toit du bâtiment situé en aval de la source que dans les rues situées sur les côtés. Cela signifie que le flux turbulent vertical, de la rue vers l'atmosphère extérieure, est plus important que le flux latéral au niveau des intersections. Les polluants, rejetés au-dessus du niveau des toits, sont transportés dans l'écoulement extérieur et pénètrent à l'intérieur des rues situées en aval. Les polluants, qui diffusent latéralement aux extrémités de la source, sont advectionnés dans la direction du vent jusqu'aux intersections situées en aval, où ils seront à nouveau transportés latéralement.

Cette première analyse des champs de concentration met donc en évidence deux mécanismes essentiels dans le comportement du panache à l'intérieur du réseau de rues :

- **La diffusion latérale**, au niveau des intersections, contrôlée par les mécanismes décrits au chapitre III.1.
- **La diffusion verticale**, à l'interface entre la rue et l'atmosphère extérieure. Les flux turbulents à ce niveau ont été décrits au chapitre II.1.

Ces mécanismes sont associés aux structures élémentaires du réseau que constituent une intersection ou un tronçon de rue. Mais pour appréhender le comportement du panache de polluants dans son ensemble, il est également nécessaire de considérer l'*organisation* et la *topologie* du réseau de rues. L'importance de ce dernier paramètre a été mise en évidence à travers les études sur la dispersion dans un groupe d'obstacles (ISNARD, 1999). Des différences ont été observées entre un groupe de bâtiments alignés et un groupe de bâtiments en quinconce, ce dernier cas favorisant l'étalement du panache.

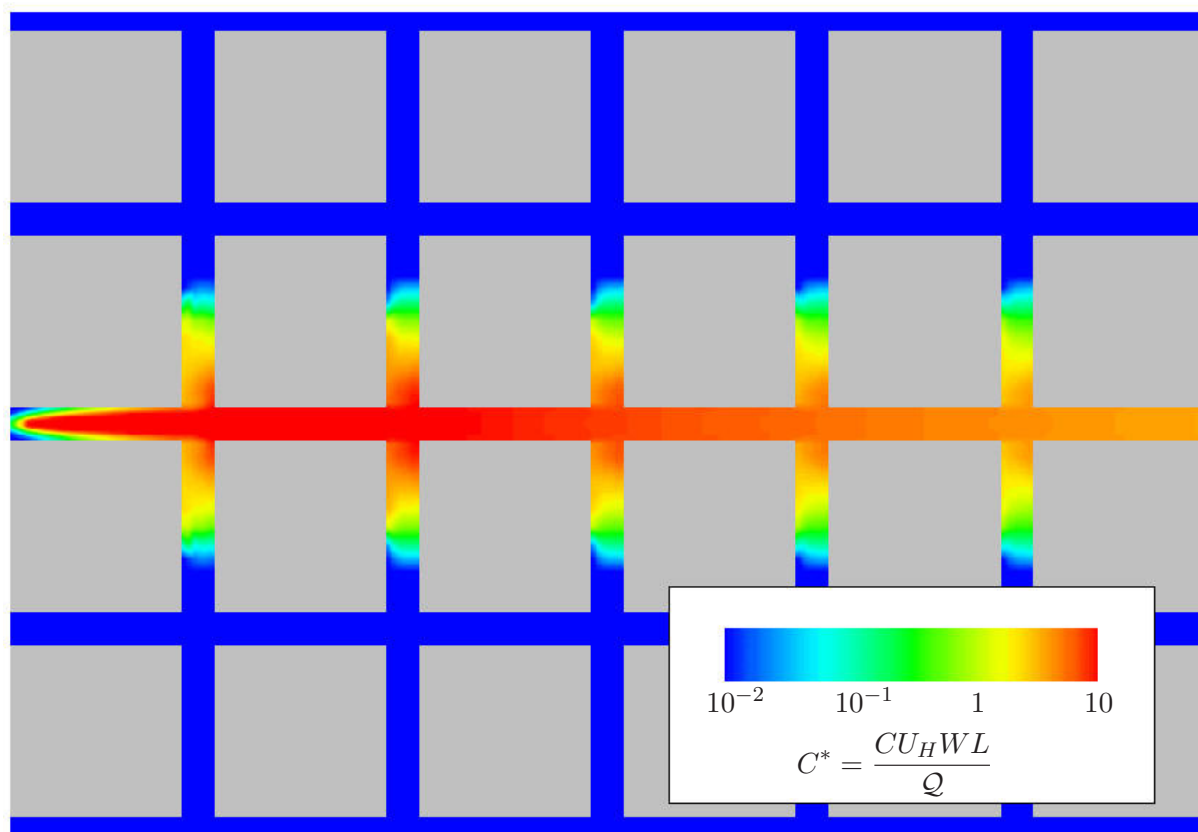
De manière générale, la topologie du réseau est définie par la position relative des rues les unes par rapport aux autres, chacune ayant des caractéristiques propres. De plus, il faut noter que l'effet d'une topologie de réseau dépend de la direction du vent par rapport aux axes principaux de ce réseau. Il existe donc une infinité de configurations topologiques différentes et il est inimaginable de pouvoir toutes les étudier. C'est pourquoi il est nécessaire d'identifier quelques configurations caractéristiques. Dans les paragraphes suivants, nous nous intéresserons à des topologies simples de réseaux, en étudiant en particulier l'influence du rapport d'aspect des rues et l'influence de la direction du vent.

III.2.3.1.3 Influence du rapport d'aspect

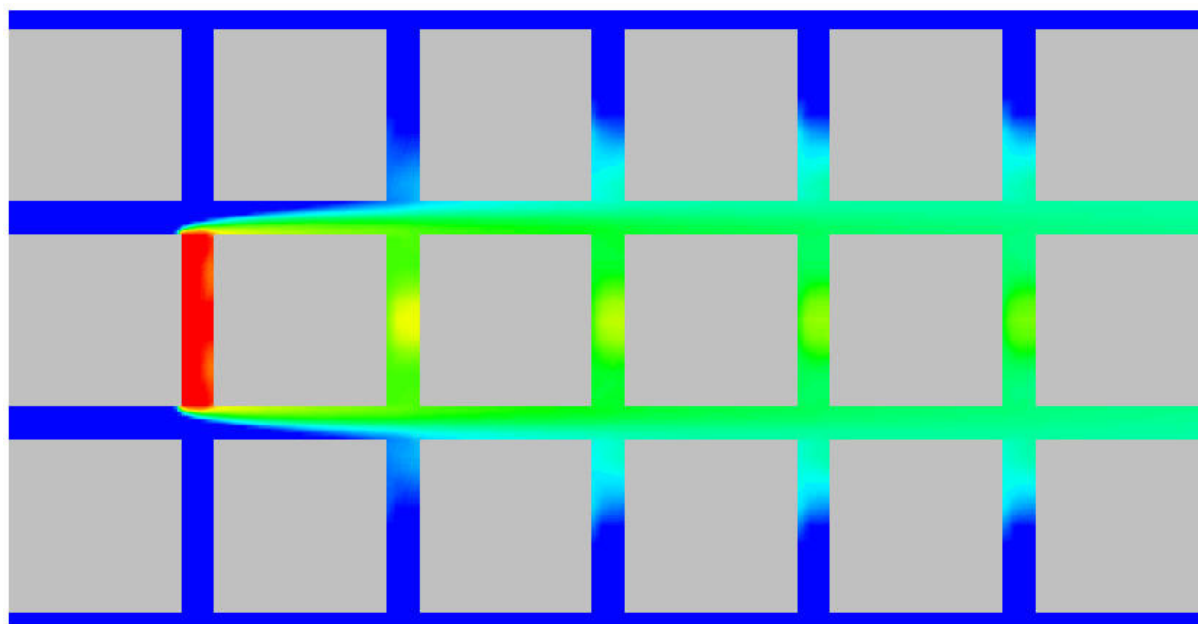
La dispersion du panache de polluants à l'intérieur d'un réseau de rues dépend du transport des polluants à l'intérieur des rues. Si l'on modifie le rapport d'aspect des rues transversales (selon y) par rapport aux rues longitudinales (selon x), la diffusion latérale des polluants risque d'être modifiée. Pour étudier cet effet, nous avons simulé et comparé différentes configurations, décrites dans le tableau III.2.1.

D'un point de vue qualitatif, les comportements observés sont analogues à ceux décrits sur la figure III.2.7. D'un point de vue quantitatif, il existe des différences entre les trois types de réseau. Pour estimer ces écarts, nous avons comparé les profils transversaux de concentration au niveau du sol. En supposant que la dispersion du panache suive une évolution gaussienne, les profils transversaux de concentration peuvent être décrits par la relation :

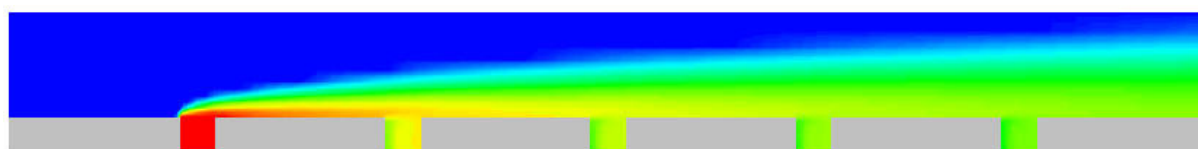
$$\bar{c} = C_0 \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \quad (\text{III.2.8})$$



a) Champ de concentration C^* au sol, pour une source linéique parallèle au vent (cas 1-a).



b) Champ de concentration C^* au sol, pour une source linéique perpendiculaire au vent (cas 1-b).



c) Champ de concentration C^* dans le plan x - z , pour une source linéique perpendiculaire au vent (cas 1-b).

Figure III.2.7 – Dispersion dans un réseau de rues : Champ de concentration C^* , représenté en échelle de couleur logarithmique (simulation MERCURE).

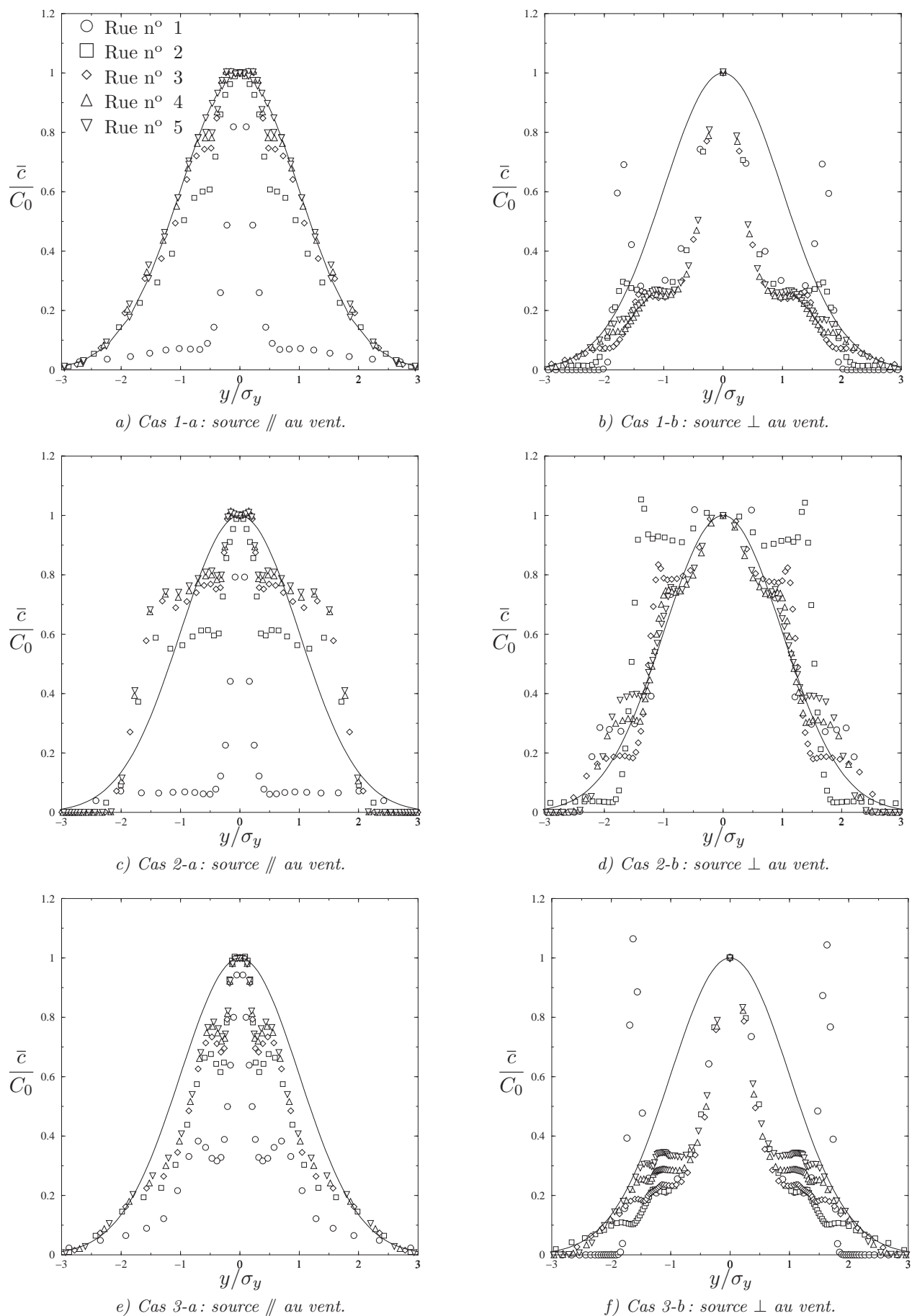
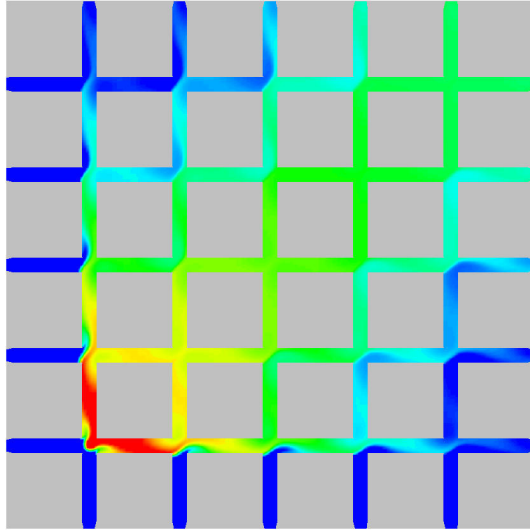
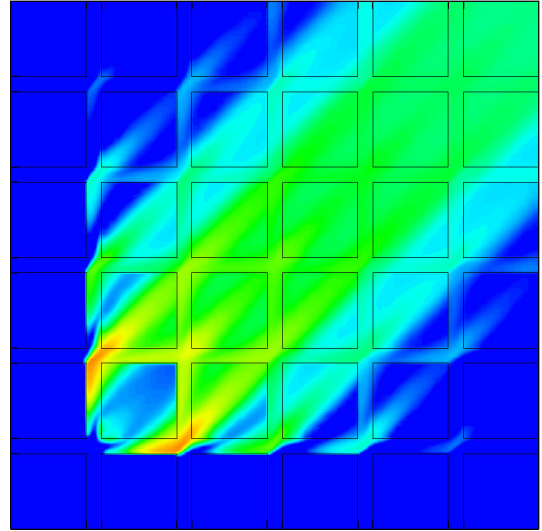


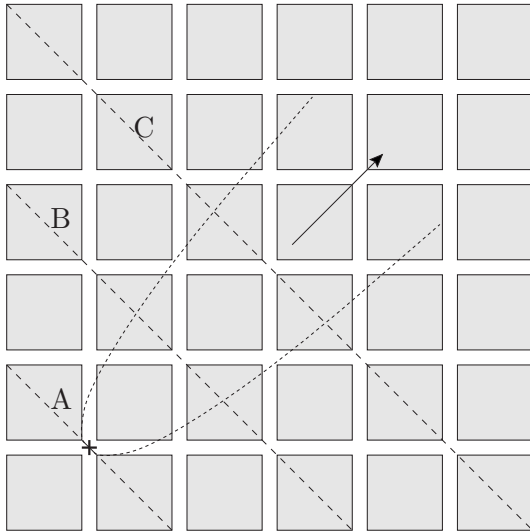
Figure III.2.8 – **Concentration moyenne \bar{c}/C_0** : Profils transversaux au niveau du sol, à l'intérieur des rues n° 1 à n° 5 (simulation MERCURE).



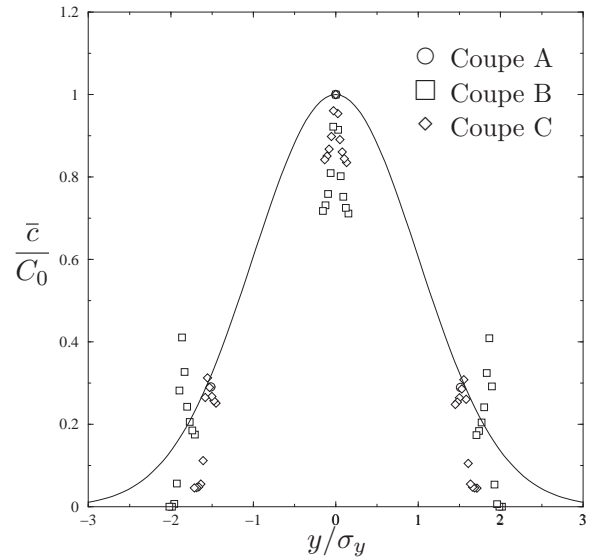
a) Champ de concentration C^* au niveau du sol (cas 4-b, échelle identique à la figure III.2.7-a).



b) Champ de concentration C^* au niveau des toits (cas 4-b).

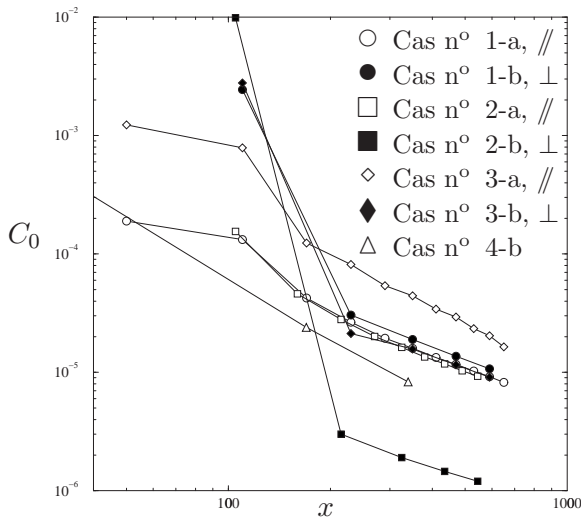


c) Positions des profils de la figure d.

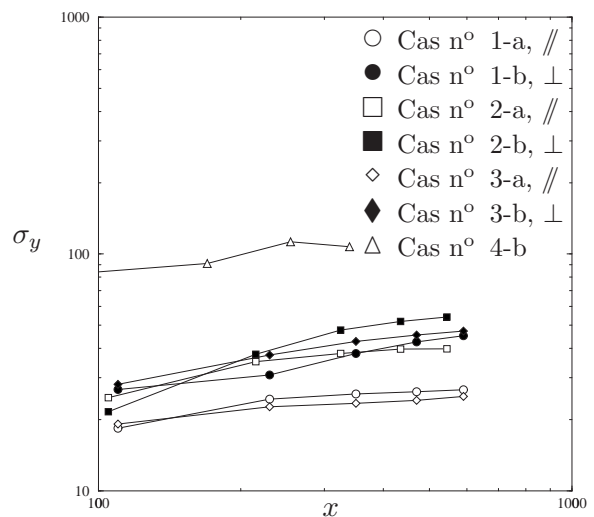


d) Profils transversaux au niveau du sol (cas 4-b).

Figure III.2.9 – Dispersion dans un réseau de rues : Vent orienté à 45° par rapport au réseau (simulation MERCURE).



a) Concentration sur l'axe du panache.



b) Écart-type σ_y de diffusion du panache.

Figure III.2.10 – Dispersion dans un réseau de rues : Évolution longitudinale de la concentration sur l'axe et de l'écart-type du panache, pour les différentes configurations.

Les paramètres C_0 et σ_y dépendent de la distance x dans la direction de l'écoulement. Leur évolution permet de quantifier l'étalement du panache. À partir des profils de concentration obtenus avec le code *MERCURE*, nous avons pu déterminer les valeurs de ces paramètres.

Les profils de concentration, adimensionnés par C_0 et σ_y , ont été représentés pour les différents cas sur la figure III.2.8. On constate que la forme des profils est complexe et qu'elle ne suit généralement pas la distribution gaussienne analytique. La répartition de concentration est plutôt organisée par paliers, la longueur de ces paliers correspondant approximativement à la longueur des rues. Cette observation confirme l'idée selon laquelle la dispersion s'effectue en grande partie à l'intérieur du réseau, par un transport des polluants à l'intérieur des rues. On observe également des différences importantes sur les profils entre les cas n° 1, 2 et 3.

Ces différences sont confirmées par l'analyse de l'évolution longitudinale des paramètres C_0 et σ_y (cf. figure III.2.10). Les comportements attendus – diminution de C_0 et augmentation de σ_y avec la distance x – sont bien observés. Par contre, il semble que l'étalement du panache soit maximal dans le cas n° 2 et minimal dans le cas n° 3, lorsque la source est parallèle au vent. Cette tendance est plus ou moins vérifiée lorsque la source est perpendiculaire au vent. Cela signifie que plus les rues transversales sont étroites par rapport aux rues longitudinales, plus la dispersion latérale est importante. Ce résultat semble en contradiction avec le constat effectué au paragraphe III.1.4.3, selon lequel le flux d'air transversal est d'autant plus important que les rues transversales sont larges. Pour lever ce paradoxe, il faut se rappeler que σ_y quantifie la distribution latérale de concentration et non le flux transversal. Dans le cas n° 2, la concentration dans les rues transversales est élevée avant tout parce que celles-ci sont étroites et peu ventilées. C'est donc la réduction de vitesse, induite par la diminution de la taille des rues transversales, qui provoque l'étalement du panache.

III.2.3.1.4 Influence de la direction du vent

Il n'est pas possible d'étudier l'influence de la topologie d'un réseau de rues sans aborder le problème de la direction du vent. En effet, pour un quartier donné, la topologie "ressentie" par un panache de polluants dépend de l'orientation du vent. Pour étudier ce phénomène, nous avons simulé un réseau de rues identique au cas n° 1 mais avec une direction de vent de 45°. Dans cette configuration, les bâtiments ont une organisation en quinconce. Pour visualiser les conséquences sur la dispersion d'un panache, nous avons représenté sur la figure III.2.9-a le champ de concentration au niveau du sol. Par comparaison avec les figures III.2.7-a et b, nous constatons que l'étalement du panache est beaucoup plus important, en raison de l'organisation en quinconce. La représentation du champ de concentration au niveau des toits (figure III.2.9-b) indique que le rejet des polluants dans l'atmosphère extérieure s'effectue au-dessus de toutes les rues polluées et non pas seulement à la verticale de la source. Par conséquent, l'étalement du panache à l'intérieur du réseau se répercute également sur la dispersion dans l'écoulement extérieur.

Les paramètres de dispersion C_0 et σ_y ont été déterminés pour trois profils transversaux au niveau du sol (figure III.2.9-c). Les profils adimensionnés sont représentés sur la figure III.2.9-d et s'accordent approximativement avec une loi gaussienne. Les données sont regroupées par "paquets" car il n'y a pas d'information à l'intérieur des bâtiments. L'évolution longitudinale de σ_y (figure III.2.10-b) confirme que l'étalement du panache est 3 à 4 fois plus important dans le cas n° 4 que dans le cas n° 1. Ces résultats sont qualitativement en accord avec ceux de ISNARD (1999) pour des groupes d'obstacles alignés et en quinconce. En effet, ISNARD a observé expérimentalement (en soufflerie) que l'écart-type σ_y d'un panache à l'intérieur d'un groupe de bâtiments était 2,3 fois plus important lorsque ceux-ci étaient en quinconce que lorsqu'ils étaient alignés.

III.2.3.2 Comparaison avec le modèle SIRANE

Afin d'évaluer les performances du modèle *SIRANE*, nous avons effectué une comparaison sur les huit configurations simulées avec le code *MERCURE*. À l'exception de la direction du vent et de la position de la source de polluants, les paramètres utilisés dans le modèle *SIRANE* sont identiques dans les différents cas. Ces paramètres sont résumés dans le tableau III.2.2.

Vitesse de l'écoulement extérieur	U_{ext}	5 m/s
Diffusivité turbulente de l'écoulement extérieur	K_{ext}	1 m ² /s
Intensité de turbulence au niveau des toits	σ_w/U_H	0,3
Fluctuation de la direction du vent	σ_θ	10°

Tableau III.2.2 – Paramètres utilisés dans le modèle *SIRANE*.

Pour cette comparaison à un cas idéalisé, les formules de BRIGGS pour les écarts-types de diffusion ont été remplacées par un coefficient de diffusivité turbulente uniforme K_{ext} .

Afin de comparer les concentrations moyennes rue par rue, nous avons réalisé une intégration spatiale, sur le volume de chaque rue, du champ de concentration obtenu avec le code *MERCURE*. Les résultats adimensionnés ont été représentés sur la figure III.2.11. En raison des écarts d'ordre de grandeur entre les concentrations des différentes rues, la comparaison est présentée en échelle logarithmique. On constate que les deux approches sont cohérentes. Le coefficient de corrélation linéaire entre les logarithmes des concentrations est de 0,98 pour l'ensemble de la comparaison. Cependant, il faut remarquer que certaines valeurs s'éloignent de la première bissectrice d'un facteur supérieur à 2. Ces différences peuvent sembler importantes mais elles restent raisonnables compte tenu de la relative simplicité de l'approche utilisée et compte tenu de la complexité du problème traité.

III.2.3.3 Comparaison à des expériences en soufflerie

Afin de comparer les résultats numériques, obtenus avec le code *MERCURE*, à des données expérimentales, nous avons utilisé les mesures en soufflerie effectuées dans un réseau de rues par WEDDING *et al.* (1977). L'utilisation de ces données présente un certain nombre d'inconvénients. Tout d'abord, la configuration géométrique considérée lors de ces expériences est légèrement différente de celle que nous avons étudiée. Le rapport L/H des bâtiments est de 4 au lieu de 5 et le rapport d'aspect H/W des rues est de 0,66 au lieu de 1. Ensuite, on dispose de peu d'informations sur le champ de vitesse extérieur, en particulier sur la vitesse ayant servi à l'adimensionnement des données. Cependant, ces données constituent, à notre connaissance, le seul élément de comparaison disponible dans la littérature. Nous avons donc utilisé ces mesures afin d'évaluer qualitativement la validité de nos résultats.

Nous avons représenté, sur la figure III.2.12, l'évolution des profils transversaux pour les trois cas de comparaison. De manière générale, nous constatons que les adimensionnements des deux approches ne sont pas en accord. S'agissant uniquement d'une différence de constante multiplicative, nous ferons abstraction de ce point dans la suite de l'analyse. Pour les trois cas, on observe que l'étalement du panache est plus important dans l'expérience que lors de la simulation. Ce phénomène peut provenir des différences de géométrie ou d'une différence de turbulence de l'écoulement extérieur. Dans le cas de la source perpendiculaire au vent, il existe un pic de concentration au centre des rues situées en aval, uniquement dans le cas de la simulation. Ce pic est caractéristique d'un transport des polluants d'une rue à l'autre par l'écoulement extérieur.

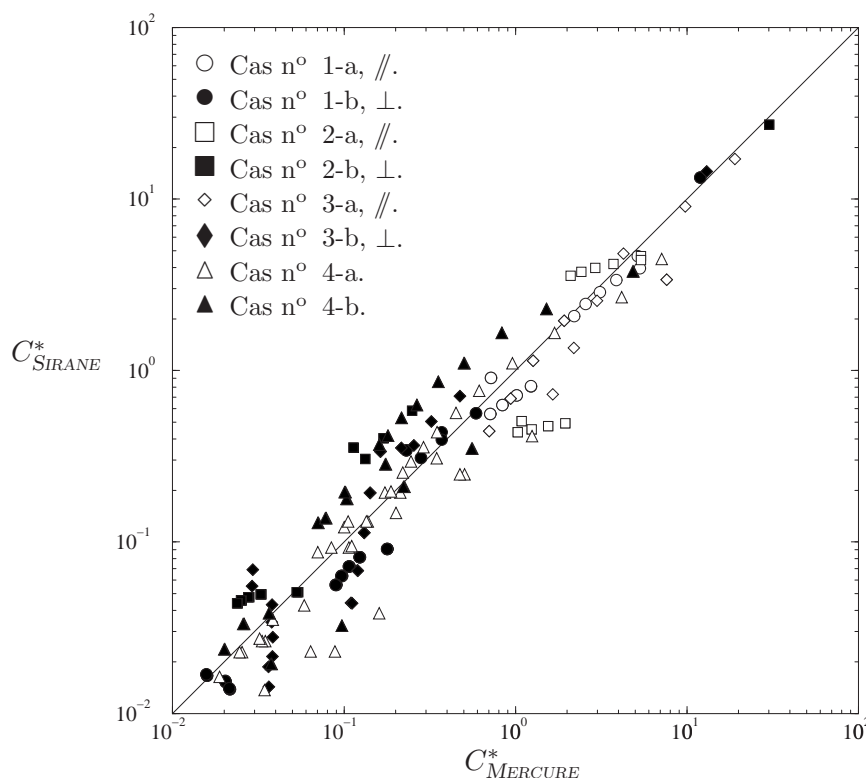


Figure III.2.11 – **Dispersion dans un réseau de rues** : Comparaison entre le code *MERCURE* et le modèle *SIRANE*. La concentration moyenne dans chaque rue du réseau correspond à un point de la figure. La comparaison a été réalisée pour les différentes configurations étudiées.

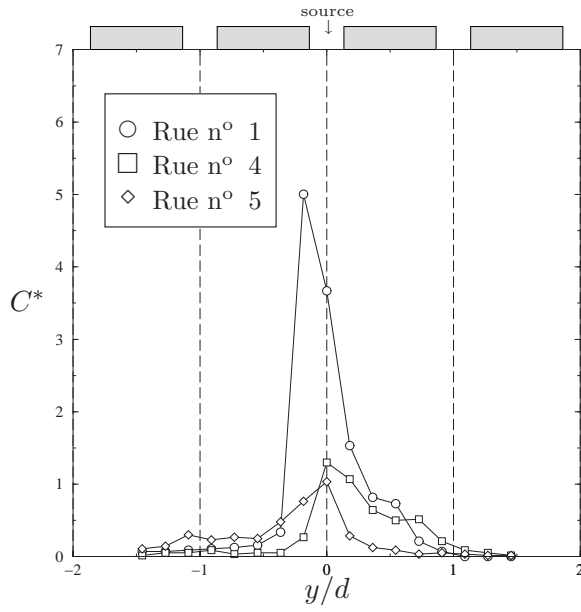
En soufflerie, ce pic central est absent et il existe deux pics latéraux, à l'emplacement des deux rues longitudinales. Cela signifie qu'en soufflerie, le gaz traceur diffuse principalement par les extrémités de la rue. Les différences de géométrie et de turbulence entre la soufflerie et la simulation modifient donc l'importance relative de la diffusion verticale du panache par rapport à la diffusion latérale.

Même si elle reste avant tout qualitative, la comparaison entre les résultats du code *MERCURE* et les expériences de WEDDING *et al.* semble donc confirmer certains comportements obtenus numériquement, avec des écarts dus aux différences de configurations. Elle souligne cependant le besoin de données expérimentales plus détaillées pour étudier les mécanismes de dispersion dans un quartier et pour valider les modèles numériques à cette échelle.

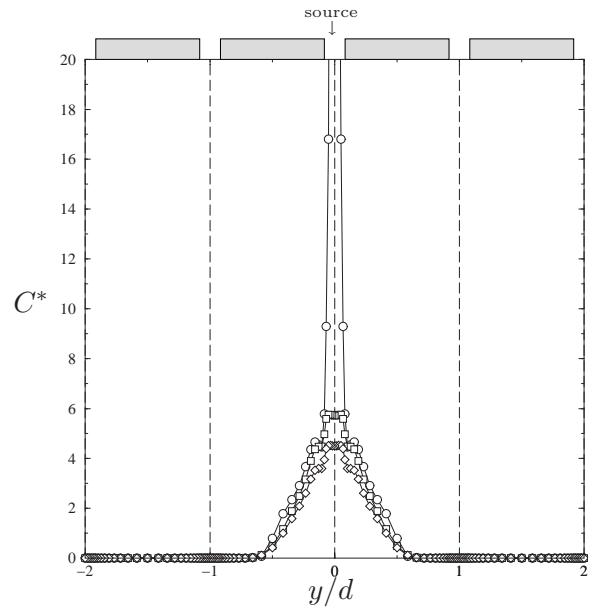
III.2.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté un certain nombre de résultats concernant la dispersion des polluants à l'échelle d'un quartier. Des simulations numériques, réalisées avec le code *MERCURE*, ont permis de mettre en évidence les mécanismes de dispersion à l'intérieur du tissu urbain, avec en particulier une distinction entre les flux verticaux (au sommet des rues) et les flux transversaux (par échange au niveau des intersections). Ces résultats illustrent également le rôle joué par la topologie du réseau dans l'étalement du panache.

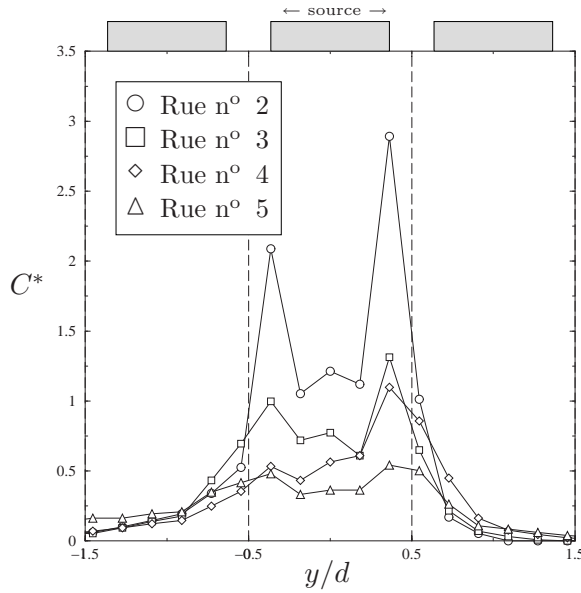
Pour décrire la dispersion à cette échelle, un nouveau modèle a été présenté en détail. Le modèle *SIRANE* est basé sur le concept de réseau de rues et sur l'utilisation de modèles de boîte. Ce modèle a été comparé aux simulations numériques effectuées avec le code *MERCURE* et les résultats sont en bon accord.



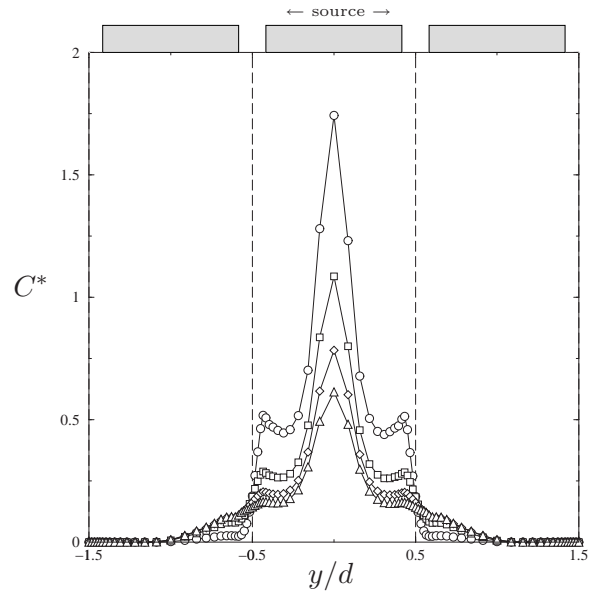
a) Source // (WEDDING et al., 1977).



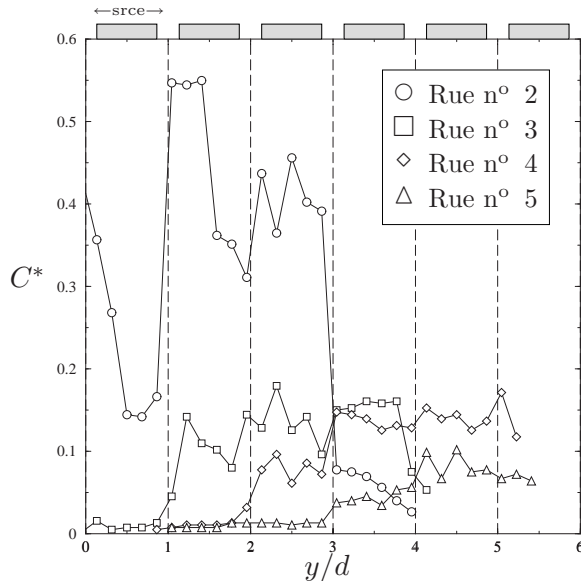
b) Source // (MERCURE).



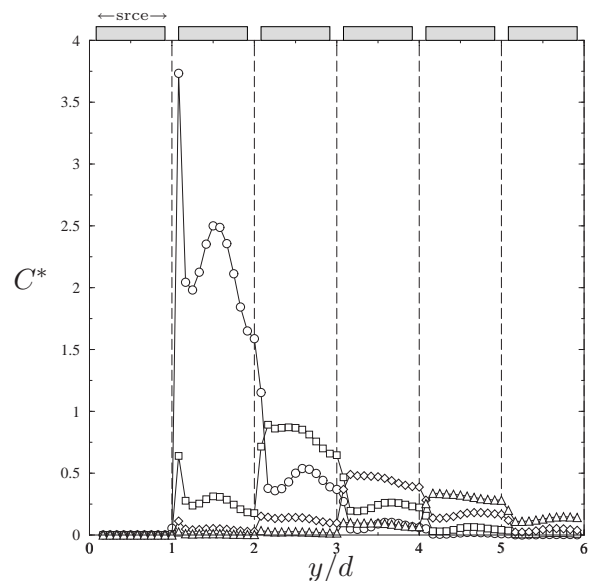
c) Source ⊥ (WEDDING et al., 1977).



d) Source ⊥ (MERCURE).



e) Vent à 45° (WEDDING et al., 1977).



f) Vent à 45° (MERCURE).

Figure III.2.12 – **Dispersion dans un réseau de rues : Comparaison entre les simulations numériques (MERCURE) et les expériences de WEDDING et al. (1977).**

Les applications de ce modèle sont nombreuses. Le modèle *SIRANE* a été conçu avant tout comme une généralisation de l'approche rue-canyon au cas d'un réseau de rues, permettant de prendre en compte l'effet des rues voisines dans le calcul de la concentration en un point. Il peut donc être utilisé pour établir la répartition de la pollution à l'échelle d'un quartier. Dans la quatrième partie de ce travail, nous présenterons plusieurs applications de ce modèle au cas de l'agglomération lyonnaise. Mais le modèle *SIRANE* peut également s'avérer intéressant pour étudier l'influence de la topologie et de l'organisation d'un quartier sur la dispersion des polluants à une échelle comprise entre 50 m et 1000 m. Cette échelle correspond à la dimension caractéristique des mailles de calcul utilisées pour la simulation de la pollution dans une agglomération. La rapidité de calcul de ce modèle peut être mise à profit pour des études paramétriques sur un grand nombre de réseaux différents.

Conclusion de la troisième partie

La généralisation de l'approche rue-canyon nous a permis de modéliser un quartier à travers la prise en compte des interactions entre plusieurs rues. L'étude des intersections a tout d'abord permis de mettre en évidence les mécanismes de transports horizontaux et verticaux au sein d'un carrefour. En particulier, nous avons montré le rôle d'une intersection dans la dispersion horizontale et le mélange des polluants à l'intérieur de la canopée. Les différentes situations étudiées ont également permis d'illustrer la complexité et la diversité des configurations possibles d'intersection, et la difficulté de toutes les modéliser.

Nous avons ensuite étudié l'échelle du quartier, en couplant les concepts de rue et d'intersection à travers la notion de réseau de rues. Un modèle appliqué a été proposé pour décrire cette échelle. Les résultats obtenus ont permis de montrer l'impact, en terme de pollution, d'une rue sur ses voisines. Nous avons également observé l'influence de la topologie du réseau sur l'étalement horizontal d'un panache de polluants.

Cependant, ce travail aborde une problématique qui a été assez peu étudiée par le passé. C'est pourquoi il constitue une première étape qui devra être poursuivie et améliorée sur un certain nombre de points. Au niveau de la modélisation des intersections, il faudra étudier le problème du couplage réciproque entre l'écoulement dans la rue et l'écoulement dans l'intersection. Il faudra également développer un modèle spécifique pour traiter le cas des places de grande taille, pour lesquelles l'interaction avec l'écoulement extérieur est importante. Enfin, notre étude a mis en lumière le besoin important de disposer de données expérimentales sur la dispersion des polluants à l'échelle d'un quartier.

L'un des principaux objectifs de notre étude sur le transport des polluants à l'échelle locale a été de développer des outils pratiques de modélisation à cette échelle. La vocation de ces outils étant d'être appliqués à des cas concrets, nous avons choisi de présenter, au cours de la dernière partie de notre travail, des exemples d'applications de ces modèles. Le choix du site d'étude s'est porté sur l'agglomération lyonnaise, en raison de notre localisation géographique, mais également en raison des nombreux problèmes de pollution, qui font de Lyon un exemple particulièrement intéressant. Citons seulement les expertises de la Commission Européenne qui prévoient que Lyon sera la ville de la CEE la plus polluée au cours des prochaines années. Cette dernière partie aura certainement un caractère moins "scientifique" que les précédentes. Elle nous a cependant semblé indispensable à la cohérence de notre travail.