

Mélange à l'aval d'une confluence d'écoulements à surface libre

A. DALMON^a, E. MIGNOT^a, N. RIVIERE^a, G. LIPEME KOUYT^b, A. MOMPLOT^b, C. GONZALEZ^c, C. ESCAURIAZA^c

a. Université de Lyon, LMFA, INSA, Bat. Jacquard, 20 av. A. Einstein, 69621 Villeurbanne, France – emmanuel.mignot@insa-lyon.fr

b. Université de Lyon, INSA Lyon, LGCIE-DEEP, F-69621, France,

c. Hydraulics and Environmental Engineering Department, Pontificia Universidad Catolica de Chile, Santiago, Chili

Résumé :

Les travaux présentés ici traitent de la rencontre de deux écoulements à surface libre au sein d'une confluence en se focalisant sur l'évolution du mélange de ces écoulements au sein de la branche aval, par une approche numérique. Il apparaît qu'en fonction des caractéristiques des deux écoulements et de la géométrie de la confluence, l'efficacité du mélange varie très fortement et que cette variation dépend de la présence ou non d'un écoulement secondaire intense dans la branche aval et notamment de la présence d'une ou plusieurs cellules de recirculation de grande taille. Si ces cellules ont lieu, la mise en contact des deux écoulements a principalement lieu par advection au sein de ces cellules secondaires en forme d'hélices et le mélange est très rapide. Dans le cas contraire, le mélange a lieu par diffusion turbulente à travers l'interface entre les deux écoulements en présence et le mélange est alors beaucoup moins efficace. Nous montrons ici qu'un angle de confluence élevé, qu'un rapport de quantité de mouvement élevé ou qu'un rapport d'aspect de l'écoulement élevé tendent à favoriser l'apparition d'une cellule hélicoïdale et donc à accélérer le mélange dans la branche aval.

Abstract :

The present work deals with the intersection of two open-channel flows within a confluence, focusing on the mixing of these two flows within the downstream branch. The methodology of the research is based on a numerical approach. It appears that the characteristics of the two flows and of the geometry of the confluence strongly impact the mixing efficiency and that this efficiency directly results from the occurrence or not of intense secondary currents in the downstream branch, notably the presence of helicoidal cells of large scale. If such cells occur, the contact between both flows mostly takes place through advection within these cells and the mixing is then very efficient and rapid. In the opposite case, the mixing takes place through lateral turbulent diffusion processes and is much less efficient. We show in this paper that a high confluence angle, a high momentum ratio, or a high aspect ratio of the downstream flow favor the occurrence of these helicoidal cells and thus accelerate the mixing processes.

Mots clefs : Confluence, mélange, courants secondaires, CFD

1 Introduction

1.1 Contexte

Le travail présenté ici porte sur le mélange au sein des confluences d'écoulement à surface libre, en se focalisant sur l'influence des paramètres de la confluence sur l'efficacité du mélange dans la branche aval. Ces confluences sont notamment rencontrées dans trois environnements qui se distinguent notamment par la largeur de l'écoulement b et le rapport d'aspect (profondeur divisée par cette largeur : h/b). La plus grande largeur ($b \sim 10\text{m}-1000\text{m}$) concerne les cours d'eau pour lesquels le rapport d'aspect est d'environ $h/b = O(1/10-1/100)$. Les confluences y sont le lieu de rencontre et de mélange d'eaux de différentes températures et/ou concentrations en scalaire (polluants, minéraux dissouts, 'acidité', sels, gaz, turbidité, sédiments en suspension, etc.). Une largeur intermédiaire ($b \sim 10\text{m}$) concerne les inondations urbaines, avec des confluences formées par les carrefours pour lesquels le rapport d'aspect approche $h/b = O(1/5-1/100)$. Ces confluences gouvernent, en plus de la répartition des flux inondant et des polluants vers les rues aval et par conséquent à travers la ville : eau contaminée débordant du réseau (égouts) ou provenant de camions ou d'usines pris dans l'inondation. Enfin, l'échelle la plus petite largeur ($b \sim 1\text{m}$) est celle du réseau d'assainissement qui est un ensemble de canalisations et d'ouvrages particuliers dédié à la collecte et au transport des eaux usées domestiques ou eaux pluviales seules ou un mélange des deux types d'eau. Le rapport d'aspect de ces écoulements est d'environ $h/b=1$. Le réseau d'assainissement comporte de très nombreuses confluences où se mélangent des eaux de qualité différente (au regard des matières en suspension, contaminants bactériens, chimiques ou médicamenteux, etc.).

1.2 Ecoulement et mélange transverse en canal unique

Le mélange transverse dans un écoulement canalisé est généralement gouverné par le processus de diffusion turbulente transverse. Ce mélange se caractérise par un coefficient de diffusion turbulente transverse ε_{ty} . De plus, lorsque le cours d'eau s'incurve, tel dans un méandre, le mouvement hélicoïdal de l'écoulement (courant secondaire de premier type de Prandtl, voir par exemple Blanckaert et Graff, 2001) tend à fortement accélérer le mélange transverse dans l'écoulement. Ainsi pour des courbures légères, Fischer *et al.* (1979) proposent une augmentation du coefficient de ε_{ty} . Enfin, Baek *et al.* (2006) ont montré que la valeur du coefficient ε_{ty} dans un méandre est aussi influencée par le rapport d'aspect de l'écoulement h/b . Ces informations tendent à montrer que dans un écoulement canalisé, l'efficacité du mélange et donc la longueur nécessaire pour retrouver un écoulement « complètement » mélangé sont gouvernées par la présence de courants hélicoïdaux eux-mêmes influencés par le rapport d'aspect de l'écoulement.

1.3 Cas de la branche aval d'une confluence

Par rapport à un écoulement en canal unique, les écoulements dans la branche aval d'une confluence présentent des grandes structures secondaires qui tendent à échanger du fluide d'une zone à l'autre et ainsi augmentent la capacité de mélange. Ces structures sont notamment les courants secondaires, d'axe longitudinal dues à la courbure des lignes de courant (Bradbrook *et al.*, 2000), de façon analogue à l'écoulement hélicoïdal dans un méandre. Une liste, non exhaustive, des caractéristiques de la confluence susceptibles d'affecter le plus fortement ces courants secondaires et donc d'affecter la longueur de mélange « complet » L_m dans la branche aval de la confluence est présentée ici. Les notations se réfèrent au schéma de la Fig. 1

- C1 : l'angle de la jonction. Shakibainia *et al.* (2010) montrent que sa diminution (de 105° à 15°) tend à réduire l'intensité des écoulements secondaires.
- C2 : le rapport de quantité de mouvement entre l'écoulement latéral et celui de l'amont M^* . Lorsque M^* augmente, l'intensité des cellules hélicoïdales augmente (Weber *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2002), ce qui a pour effet de favoriser l'homogénéisation de la distribution des vitesses dans la branche aval. Ce rapport de quantité de mouvement peut se simplifier dans le cas où l'eau des deux affluents est de même densité:

$$M^* = \frac{\rho_b Q_b^2}{b_b h} \bigg/ \frac{\rho_u Q_u^2}{b_u h} = Q_b^2 b_u / Q_u^2 b_b \quad (2)$$

- C3 : une différence de densité entre les deux écoulements. Cette différence favorise la formation de courants de densité qui peuvent entraîner la plongée d'un des deux écoulements sous l'autre (Lyubimova *et al.*, 2014).
- C4 : une surélévation du lit d'un des deux écoulements entrant. Cette discordance du niveau du lit modifie les courants secondaires dans le sens où elle distord la couche de mélange, ce qui génère un courant ascendant au coin aval de la jonction (Biron *et al.*, 1996).
- C5 : la présence de formes de fond telles des affouillements, des barres, des fortes pentes locales. Ces formes morphologiques peuvent faire augmenter l'intensité des courants secondaires (Bouchez *et al.*, 2011) ou au contraire les réduire notamment dans le cas peu profond (Parsons *et al.*, 2007).
- C6 : tout comme pour un écoulement unique (voir Baek *et al.*, 2006), le rapport d'aspect h/b de l'écoulement de la branche aval risque de fortement affecter la capacité de mélange.

L'augmentation du mélange dans la branche aval de la confluence due à l'augmentation de l'intensité des courants secondaires causée par une augmentation de l'angle de la jonction (C1), par la présence d'une surélévation (C4) et – dans une moindre mesure – par le rapport de quantité de mouvement (C2) est confirmée par Biron *et al.* (2004), ainsi que par Rice *et al.* (2008) pour la surélévation (C4) et la présence d'un rapport de densité (C3). En conséquence, la longueur de mélange complet L_m dans la branche aval d'une confluence varie drastiquement dans la littérature. Alors que Rice *et al.* (2008) estiment cette longueur à environ 100 largeurs ($L_m/b \sim 100$), une surélévation d'un des deux lits (C4) la réduit à $L_m/b \sim 30$ pour Gaudet and Roy (1995), et un rapport de quantité de mouvement amont (C2) de $M^*=1.8$ la fait grimper à $L_m/b=127$ mais avec $M^*=3.6$, celle-ci descend à $L_m/b=3.3$ (Lane *et al.* 2008). A noter, cependant, que ces valeurs sur le terrain sont entachées d'incertitudes élevées.

1.4 Objectifs de l'étude

L'objet des travaux présentés ici est d'étudier et discuter dans le cas d'une confluence simplifiée (canaux droit, plan, horizontaux, lisses, de section rectangulaire), l'effet quantitatif des trois paramètres suivants, sur la dispersion de polluants à l'aval d'une confluence :

- le rapport d'aspect de l'écoulement h/b C6 (influence étudiée à l'aide du code de calcul CFD Starccm+, série STAR dans le Tableau 1);
- le rapport de quantité de mouvement des deux écoulements amont C2 (influence étudiée à l'aide du code de Calcul CFD Fluent, série FLU dans le Tableau 1) ;
- l'angle de la confluence C1 qui est réduit de 90° pour deux séries présentées ci-dessus à 40° pour le calcul noté DES dans le Tableau 1.

2 Méthodologie

Le domaine d'étude est schématisé sur la Fig.1. Il se compose d'un canal amont de largeur b_u qui intersecte un canal latéral de largeur b_b en formant un angle θ , ces canaux étant suffisamment longs pour assurer un écoulement établi à proximité de la confluence. Enfin, un canal aval de largeur b_d , suffisamment long pour s'affranchir de la condition limite aval, est aligné avec le canal amont. La profondeur d'eau, considérée constante sur l'ensemble du domaine, est notée h . L'ensemble des paramètres des calculs considérés ici est synthétisé dans le Tableau 1.

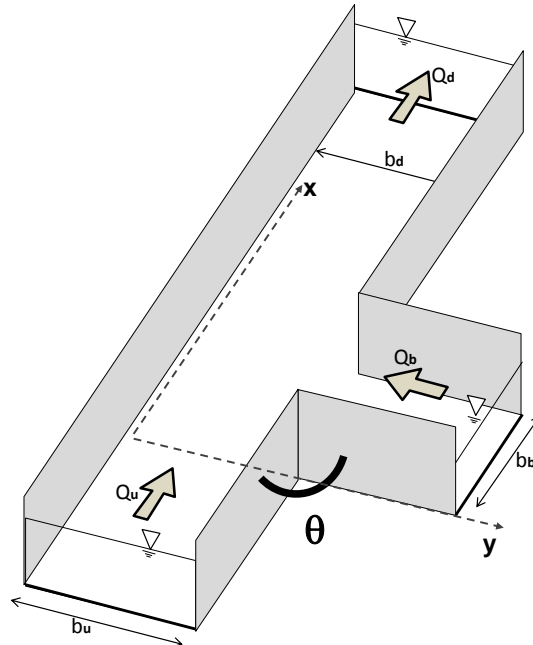


Figure 1 : Schéma et paramètres du domaine d'étude avec Q le débit, b la largeur et les indices u, b, d se référant aux branches amont latérale et aval respectivement.

La démarche utilisée ici est purement numérique avec trois séries de calculs. Les deux premières séries nommées STAR et FLU résolvent l'équation URANS 3D (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) à l'aide de codes de calcul commerciaux : respectivement StarCCM+ et Ansys-FLUENT. Le troisième nommé DES résout l'écoulement par une méthode DES (Detached Eddy Simulation) qui est une combinaison des méthodes URANS et LES (Large Eddy Simulation):

- Pour les séries STAR et FLU, les équations URANS 3D est tout d'abord résolue sans introduction de scalaire en utilisant le modèle de fermeture dit RSM (Reynolds Stress Model) qui consiste à exprimer le tenseur de Reynolds en fonction de la variation spatiale du champ de vitesses moyen et d'un tenseur de coefficient de viscosité turbulente anisotrope composé de 9 termes (6 différents). A noter que cette approche a déjà été testée sur des écoulements analogues (voir Mignot *et al.*, 2012) et que la sensibilité des résultats numériques au maillage a été vérifiée dans les travaux de Momplot *et al.* (2012).

- Pour la série DES, le code de calcul décrit en détail par Paik *et al.* (2010) permet une résolution de l'écoulement par une méthode hybride: loin des parois l'écoulement est résolu par une méthode LES pour les échelles supérieures à la taille de maille et qui utilise un modèle de sous-maille dit de Smagorinsky pour résoudre les échelles inférieures; près des parois l'écoulement est résolu par une méthode URANS décrite ci-dessus associée à un modèle de fermeture simplifié dit de Spalart-Allmaras.

Dans les 3 cas, les débits amont sont imposés à l'amont des branches entrantes ainsi qu'une distribution de pression hydrostatique en sortie de la branche aval. Le régime d'écoulement étant partout fluvial et lisse, une hauteur d'eau constante h est considérée sur l'ensemble du domaine avec

une condition de glissement libre (rigid-lid). A proximité des parois solides, des lois de paroi sont utilisées afin de s'affranchir du calcul de l'écoulement jusqu'à la sous-couche visqueuse.

Concernant le transport de scalaire passif, les méthodes diffèrent entre les séries :

-Pour les séries STAR et FLU, l'équation d'advection-diffusion est résolue a posteriori, à partir des résultats du calcul hydrodynamique. Une concentration homogène de scalaire c_u est apportée dans l'écoulement amont au niveau de la condition limite amont. Une valeur du nombre de Schmidt turbulent de $Sc_t=0.1$ (préalablement calibrée à partir de données expérimentales) est utilisée afin de relier la distribution spatiale du coefficient de diffusion turbulente à celui de viscosité turbulente. Il est intéressant de noter que la valeur particulièrement faible de $Sc_t=0.1$ est analogue à celle calibrée par Romero-Gomez et al. (2008) pour une intersection à 4 branches d'écoulements en charge.

-Pour la série DES, l'équation d'advection diffusion est calculée en parallèle de celle de l'écoulement avec un nombre de Schmidt turbulent. Cependant la diffusion s'avère jouer un rôle très limité par rapport à l'advection lorsque le courant hélicoïdal est présent ; ce qui limite fortement l'effet du choix du nombre de Schmidt turbulent.

Une fois l'écoulement et la diffusion du scalaire calculés, les données en différentes sections à l'aval de la jonction sont analysées afin de définir le paramètre E suivant :

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{hb_d} \left(\frac{c_i - c_m}{c_u} \right)^2} \quad (3)$$

avec n le nombre de cellules de calcul dans la section considérée, c_i la concentration dans la cellule i d'aire A_i , c_m la concentration moyenne dans cette section d'aire hb_d et c_u la concentration homogène de l'écoulement amont. Le paramètre E peut alors être tracé (Fig. 2 et 5) en fonction de la distance adimensionalisée dans la branche aval x/b_d , $x=0$ correspondant à la section d'entrée de la jonction (voir Fig.1). Le paramètre E est estimé à $x/b_d=6$ et 15 dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres des configurations de calcul ; les cellules grisées correspondent à $E < 2\%$, estimé arbitrairement comme mélange complet.

Série #	Largeurs des branches (cm)	θ (°)	h (cm)	h/b _d	Fr _d	M*	E calculé à	
							x/b=6	x/b=15
FLU	b _u =b _b =b _d =30	90	12	0.4	0.102	0.11	0.23	0.093
						0.36	0.25	0.084
						1	0.22	0.051
						1.9	0.17	0.030
						3	0.13	0.013
						9	0.03	0.002
STAR	b _u =b _b =b _d =30	90	12	0.4	0.102	9	0.04	0.002
	b _u =b _b =b _d =51		10.15	0.2		0.09	0.02	
	b _u =b _b =b _d =91.6		9.16	0.1		0.18	0.099	
DES	b _u =25.2 b _b =40.2 b _d =27.5	40	10	0.36	0.13	12.8	0.34	0.10

3 Résultats et discussion

3.1 Effet du rapport de quantité de mouvement : série FLU

Les 6 calculs de la série FLU sont effectués sur la même géométrie et avec les mêmes conditions d'écoulement dans la branche aval. Les différences entre ces 6 configurations résultent donc du rapport de débit entre les deux branches entrantes, donnant naissance à un rapport de quantité de mouvement M^* qui varie de 0.11 (écoulement amont dominant) à 9 (écoulement latéral dominant).

Les résultats présentés Fig.2 montrent que le mélange est très efficace dans la partie amont de la branche aval (x/b faible) puis cette efficacité (ou pente de la courbe $E=f(x/b)$) diminue avec x/b . Ces résultats confirment aussi la tendance avancée dans la littérature que la longueur de mélange « complet » L_m diminue lorsque le rapport de quantité de mouvement M^* augmente. Si l'on admet qu'un mélange complet est atteint pour une valeur de $E < 2\%$, alors les longueurs adimensionnelles de bon mélange ou de mélange complet valent $L_m/b=7$ pour $M^*=9$, $L_m/b=14$ pour $M^*=3$. L_m/b est nettement plus élevée pour des valeurs de M^* plus faibles.

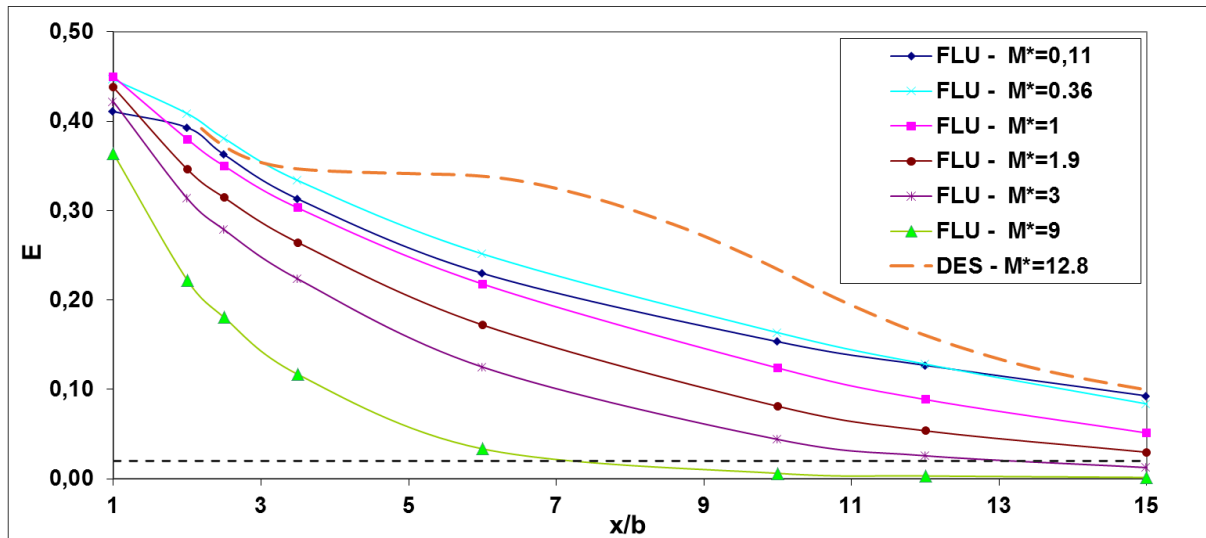


Figure 2 : Evolution longitudinale du paramètre E dans la branche aval pour les calculs de série FLU (influence de M^*) et le calcul DES

L'explication d'une telle diminution de E , à une section x/b donnée, lorsque M^* augmente, est explicitée sur la Fig.3. Cette figure montre dans la même section (section $x/b_d=2$), les résultats correspondant au champ de vitesse secondaire moyenne (composantes v , w avec v orientée selon y et w orientée selon z), à la distribution de vitesse longitudinale moyenne (composante u) et aux concentrations adimensionnalisées avec la même échelle de vitesse et le même code couleur de concentration pour les deux rapports de quantité de mouvement M^* extrêmes : $M^*=0.11$ et 9. Il est important de noter que ces résultats sont extraits au niveau d'une section où la zone de recirculation est présente, comme le prouvent les vitesses longitudinales négatives en gris foncé et noir.

- Concernant d'abord le champ de vitesse secondaire, un courant hélicoïdal (présenté en introduction) très intense est observé pour le cas $M^*=9$ avec l'écoulement venant de la branche ($y/b_d > 1$) qui passe par-dessus l'écoulement amont, qui atteint la paroi opposée ($y=0$) puis repasse sous l'écoulement amont dans la zone proche du fond. Ce courant hélicoïdal occupe une grande partie de la section $x/b_d=2$. A l'opposé, pour un rapport de quantité de mouvement faible ($M^*=0.11$), les courants secondaires calculés sont d'intensité beaucoup plus faible et d'organisation très différente.

- Concernant la distribution spatiale de concentration, il apparaît, pour le cas $M^*=0.11$, que l'interface entre l'eau très concentrée (en noir) provenant de l'amont et celle de concentration nulle (en blanc) provenant de la branche latérale est presque verticale. Le mélange a certes débuté, comme le prouve le dégradé de couleur entre les valeurs $c/c_a=0$ et 1, mais il est resté peu efficace. Dans la direction aval, ce mélange va perdurer, le dégradé de couleur va s'étendre comme montré sur la Figure 4d. Le mélange est donc gouverné par le coefficient de diffusion turbulente transverse ε_{ty} de façon analogue à un écoulement canalisé droit (voir la section 1.2). A l'opposé, pour le cas $M^*=9$, la distribution de concentration est très affectée par le courant secondaire hélicoïdal. Ce courant repousse l'écoulement concentré provenant de l'amont vers la paroi opposée à la branche latérale ($y \sim 0$) puis le fait descendre

vers le fond. Ainsi, le maximum de concentration dans cette section est obtenu près du coin $y \sim z \sim 0$. De plus, le courant de retour vers la paroi $y/b_d \sim 1$ près du fond transporte cet écoulement d'eau concentrée vers la zone de recirculation dont la concentration moyenne devient particulièrement importante (voir Figure 3). Vers l'aval, ce courant secondaire va continuer à homogénéiser la concentration dans la section de l'écoulement. Il apparaît que après 6 largeurs dans la branche aval ($x/b_d=6$), le mélange est déjà très effectif (voir Figure 4c). Ainsi, le mélange dans ce cas n'est pas gouverné par le coefficient de diffusion turbulente transverse, mais plutôt par le courant secondaire hélicoïdal.

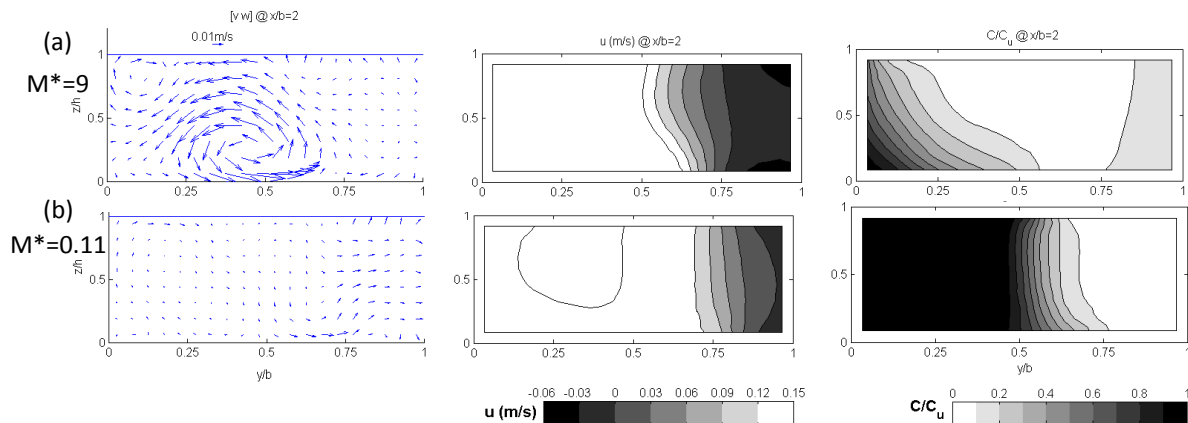


Figure 3 : Champ de vitesse moyenne secondaire v, w (gauche), de vitesse longitudinale (centre) et de concentration normalisée (droite) dans la section $x/b=2$ pour les calculs de série FLU : $M^*=9$ (a) et $M^*=0.11$ (b)

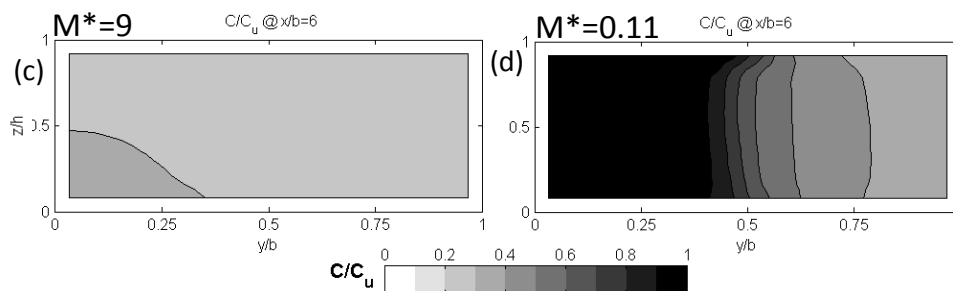


Figure 4 : Champ de concentration normalisée dans la section $x/b=6$ pour les calculs de série FLU : $M^*=9$ (a) et $M^*=0.11$ (b)

3.2 Effet du rapport d'aspect de l'écoulement : série STAR

La série Star montre l'effet du rapport d'aspect h/b pour trois configurations où les autres paramètres sont égaux : M^* , Fr_d , θ . Les résultats présentés sur la Figure 5 montrent que lorsque le rapport d'aspect varie, la capacité de mélange dans la branche aval de la jonction varie aussi de la façon suivante : plus l'écoulement est « profond » (h/b grand), plus rapidement le mélange « complet » est atteint (L_m/b diminue). Par exemple, le Tableau 1 montre que à une distance de 6 largeurs à l'aval de la confluence, E diminue de 0.18 à 0.04 lorsque h/b augmente de 0.1 à 0.4.

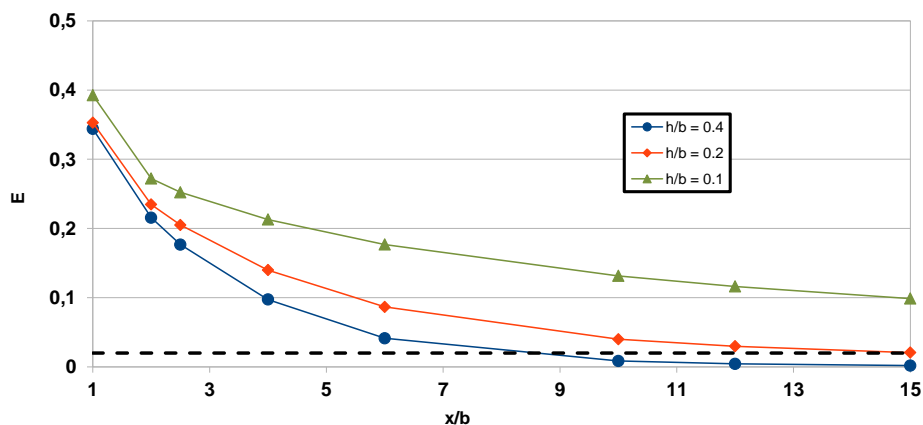


Figure 5 : Evolution longitudinale du paramètre E dans la branche aval pour les calculs de série STAR pour 3 valeurs de h/b .

L'influence du rapport d'aspect h/b sur le mélange est explicitée sur la Figure 6 pour les deux rapports d'aspect opposés : $h/b=0.1$ (peu profond) et 0.4 (profond).

- à $x/b=2$, en adéquation avec les résultats de la Figure 5, la Figure 6 (colonne de droite) montre que le mélange est plus efficace pour l'écoulement profond. L'analyse du champ de vitesse secondaire dans la section révèle que : une cellule unique (et donc très allongée dans le sens transverse, selon y) a lieu dans l'écoulement peu profond alors que deux cellules de même sens de rotation ont lieu dans l'écoulement profond. De plus, la vitesse transverse proche du fond allant dans le sens de y croissant (vers la cellule de recirculation) est plus rapide pour l'écoulement profond que pour celui peu profond, ce qui explique le mélange plus efficace.

- à $x/b=6$, il apparaît clairement que le mélange est beaucoup plus avancé pour l'écoulement profond que pour le peu profond. Pour l'écoulement peu profond, l'écoulement hélicoïdal a en fait très peu influencé la distribution de concentration, l'interface entre zones fortement et faiblement concentrées est restée verticale, le mélange a lieu par diffusion turbulente transverse. D'ailleurs, la Figure 6 montre que à cette section $x/b=6$, l'écoulement secondaire ne présente plus de cellule hélicoïdale. Celle-ci a disparu, nous pensons du fait du frottement sur le fond, qui est plus important pour un écoulement peu profond. Au contraire pour l'écoulement profond, la cellule hélicoïdale est toujours présente et participe fortement au mélange qui est déjà très avancé à cette section.

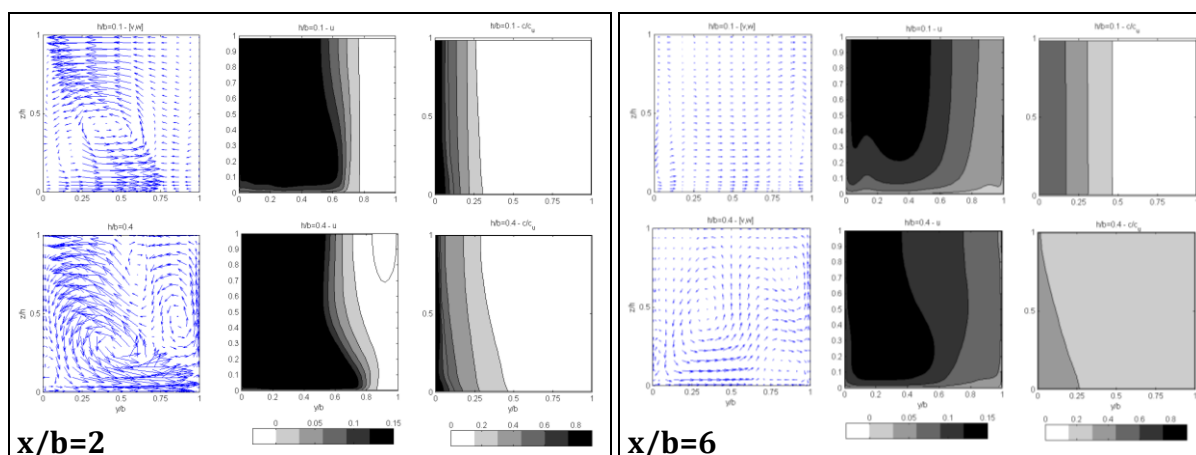


Figure 6 : Champ de vitesse moyenne secondaire v,w (gauche), de vitesse longitudinale (centre) et de concentration normalisée (droite) dans les section $x/b=2$ et $x/b=6$ pour les calculs de série STAR : $h/b=0.1$ (haut) et $h/b=0.4$ (bas). Attention la représentation ne respecte pas les rapports

d'aspect (elle distord les sections vers un carré) et toutes les flèches ne sont pas représentées par souci de lisibilité.

3.3 Cas d'un angle de 40° : série DES

La série DES est composée d'un seul écoulement, représentatif d'une confluence dans l'altiplano Chilien sur la rivière Lluta où l'angle entre les deux rivières est de 40° et où le rapport de quantité de mouvement est de $M^*=12.8$, et un rapport d'aspect $h/b=0.36$. Ce calcul est donc relativement similaire au cas de la série FLU pour lequel $M^*=9$ avec une variation principalement due au changement d'angle. La Figure 7 révèle que dans le cas de DES, la cellule hélicoïdale a toujours lieu mais son centre est confinée très près du fond. Une différence avec le cas FLU pour lequel l'angle est de 90° est que pour le cas DES le courant secondaire semble s'étendre jusqu'à la paroi $y/b=1$, alors qu'il semble s'arrêter à environ $y/b=0.75$ pour la série FLU. Cela semble dû au fait que l'extension transverse de la zone de recirculation est beaucoup plus limitée pour un angle de 40° que pour un angle de 90°, ce qui favorise l'extension du courant secondaire (cet effet a également été constaté numériquement par Shakibainia *et al.*, 2010).

La comparaison des calculs FLU (avec $M^*=9$) et DES révèle que le mélange est fortement retardé pour le calcul DES, bien que sa valeur de M^* soit plus élevée. Ainsi, sur la Fig. 2 le mélange apparaît être beaucoup plus lent pour le cas DES. La Figure 7 montre ainsi que la distribution de concentration dans la section $x/b=5.25$ pour le cas DES est sensiblement analogue à celle de la section $x/b=2$ de la série FLU sur la Figure 3a. Avec un angle passant de 90° à 40°, le mélange semble se faire de façon plus lente.

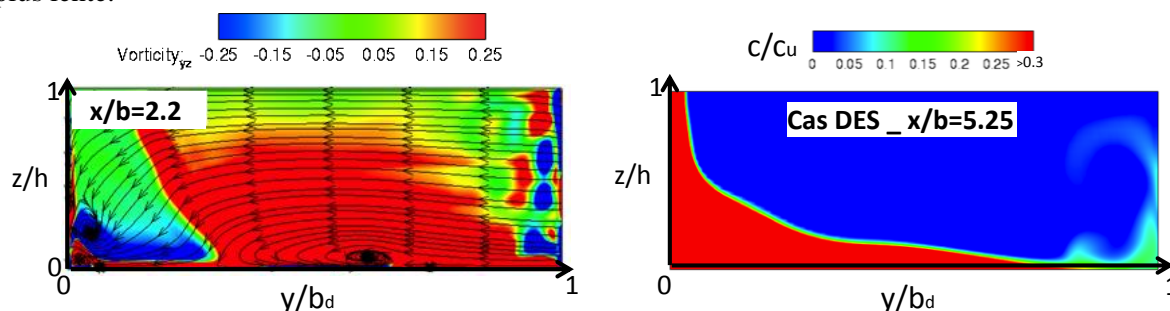


Figure 7 : Champ de vitesse et vorticité normalisée dans la section $x/b_d=2.2$ (gauche) et de concentration normalisée dans la section $x/b_d=5.25$ pour le calcul de série DES

4. Conclusions

Les travaux présentés ici ont permis d'estimer l'impact de 3 paramètres sur l'efficacité du mélange dans la branche aval d'une confluence d'écoulements à surface libre. Les résultats obtenus montrent qu'une augmentation du rapport de quantité de mouvement M^* (C2), une augmentation du rapport d'aspect h/b (C6) ou une augmentation de l'angle de la confluence θ favorise le développement d'une cellule hélicoïdale dans cette branche aval qui elle-même permet d'accélérer nettement le mélange. Il est ainsi apparu que la valeur de $E=0.18$ obtenue avec $h/b=0.1$ et $M^*=9$ est identique à celle estimée pour $h/b=0.4$ et $M^*=1.9$. Ce constat révèle que les deux paramètres M^* et h/b ont une forte influence sur la capacité de mélange à l'aval d'une confluence. Nous pensons que la disparition de la cellule hélicoïdale pour l'écoulement peu profond est due au frottement sur le fond. Par conséquent, la taille de rugosité, normalisée par la profondeur de l'eau (aussi appelé indice de submergence) devrait s'ajouter à la liste des paramètres influents et constituerait alors le paramètre C7 dans la liste présentée à la section 1.3. De nombreux travaux sont en cours de réalisation dans le but de renforcer les conclusions présentées dans cette étude.

Remerciements

Ces travaux sont financés dans le cadre des projets INSU-EC2CO-Cytrix-2011 No 231, RGCU-COACHS N° 10-MGC-S-004, EU-7FP-PREPARED et ANR-11-ECOTECH-007-MENTOR ainsi qu'un projet Chilien porté par C Escauriaza : Fondecyt 1130940.

Références

- Baek, K. O., Seo, I. W., & Jeong, S. J. (2006). Evaluation of dispersion coefficients in meandering channels from transient tracer tests. *Journal of hydraulic engineering*, 132(10), 1021-1032.
- Biron, P., Best, J. L., & Roy, A. G. (1996). Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(12), 676-682.
- Biron, P., Ramamurthy, A., and Han, S. (2004). Three-Dimensional Numerical Modeling of Mixing at River Confluences. *J. Hydraul. Eng.*, 130(3), 243–253.
- Blanckaert, K. and Graf, W. (2001). Mean Flow and Turbulence in Open-Channel Bend. *J. Hydraul. Eng.*, 127(10), 835–847.
- Bouchez, J., Lajeunesse, E., Gaillardet, J., France-Lanord, C., Dutra-Maia, P., Maurice, L., & Gualtieri, C. (2011). Discussion of "Turbulent mixing in the Amazon River: The isotopic memory of confluences. *Earth and Planetary Science Letters*, 290 (2010), pp. 37–43, *Earth and Planetary Science Letters*, 311(3), 448-450.
- Bradbrook, K. F., Lane, S. N., & Richards, K. S. (2000). Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences. *Water Resources Research*, 36(9), 2731-2746.
- Fischer H.B., List E.J., Koh R.C.Y., Imberger J. and Brooks N.H. 1979. Mixing in inland and coastal waters. In chapter 5, Academic press, San Diego, USA.
- Gaudet, J.M. and Roy A.G., 1995. Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluences. *Nature*, 373 :138-139.
- Huang, J., Weber, L. J., & Lai, Y. G. (2002). Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(3), 268-280.
- Lane S. N., Parsons D. R., Best J. L., Orfeo O., Kostaschuk R. A. and Hardy R. J. (2008). Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Río Paraná and Río Paraguay, Argentina. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113 (F2)
- Lyubimova, T., Lepikhin, A., Konovalov, V., Parshakova, Y., & Tiunov, A. (2014). Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers. *Journal of Hydrology*, 508, 328-342.
- Mignot E., Bonakdari H., Knothe P., Lipeme Kouyi G., Bessette A., Rivière N. and Bertrand-Krajewski J.-L. (2012). Experiments and 3D simulations of flow structures in junctions and their influence on location of flowmeters. *Water Sc. & Tech.* 66(6), 1325–1332.
- Momplot, A., Bonakdari, H., Mignot, E., Lipeme Kouyi, G., Rivière N. and Bertrand-Krajewski, J.-L. (2012). Effects of computational meshes on hydrodynamics of an open channel flow junction using CFD technique. In *Proceedings of 9th International Conference on Urban Drainage Modeling*, sept. 2012, Belgrade, Serbia.
- Paik, J., Escauriaza, C. and Sotiropoulos, F. (2010). Coherent structure dynamics in turbulent flows past in-stream structures: Some insights gained via numerical simulation. *J. Hydraul. Eng.* 136, 981-993.
- Parsons, D. R., J. L. Best, S. N. Lane, O. Orfeo, R. J. Hardy, and R. Kostaschuk (2007). Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence-diffuence, Paraná River, Argentina. *Earth Surf. Processes Landforms*, 32(1), 155-162.
- Rice, S. P., Roy, A. G., & Rhoads, B. L. (Eds.). (2008). *River confluences, tributaries and the fluvial Network*. Wiley.
- Romero-Gomez, P., Ho, C. K., & Choi, C. Y. (2008). Mixing at cross junctions in water distribution systems. I: Numerical study. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(3), 285-294.
- Shakibainia, A., Tabatabai, M. R. M., & Zarrati, A. R. (2010). Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(5), 772-781.

Weber L, Schumate E, Mawer N (2001). Experiments on flow at a 90° open-channel junction. J. Hydraul. Eng., 127(5):340–350.