

Chapitre 7

ETUDE DES INFLUENCES DES SINGULARITES GEOMETRIQUES SUR LES COMPORTEMENTS HYDRODYNAMIQUES DES ECOULEMENTS ET SUR LA FORMATION DU DEPOT

7.1. Problèmes

L'écoulement dans le collecteur 13 rencontre tout au long de son trajet 4 types de singularités géométriques (figure 1.2-1) qui sont :

- Changement brutal de pente du radier à son entrée au point 1;
- Jonctions avec les écoulements provenant d'autres collecteurs;
- Virages;
- Elargissement brutal de section au point 46.

D'après l'évolution du profil de dépôt observée (chapitre 2), ces 4 types de singularités influent beaucoup sur les phénomènes hydrauliques globaux ou locaux et la formation du dépôt. Particulièrement, la jonction du collecteur 13 avec celle de la Canebière et les virages de fortes courbures jouent un rôle très important sur la stabilité de dépôt (chapitre 2 et 6).

7.2. Influence des jonctions sur l'écoulement et la formation des dépôts

7.2.1. Introduction

Des jonctions de deux ou plusieurs cours d'eau sont souvent rencontrées en milieu naturel ou en environnement urbain. Elles produisent des phénomènes hydrauliques spécifiques: formation de dépôt à ces jonctions, gestion du dépôt en leurs amonts, via leurs influences sur les conditions d'écoulement.

7.2.2. Phénomènes des jonctions

Considérons une jonction de deux cours d'eau, numérotés 1 et 2, et schématisée sur la figure 7.2.2-1. Lors de la rencontre de ces deux écoulements, les phénomènes ci-dessous peuvent se produire :

- Chaque écoulement est repoussé par l'autre et se contracte à la jonction. Il existe une ligne de courant SF_cE_c qui sépare ces deux écoulements. Le point de croisement de cette ligne avec le bord, le point S , est nommé point de "stagnation". Son emplacement, ainsi que la position de la ligne de

séparation dépend de diverses variables: les géométries des canaux, le rapport des débits et l'angle de la jonction. Dans le sens transversal, des ré-circulations secondaires peuvent se produire, vers le fond à l'intérieur et vers la surface à l'extérieur.

- Le fort mélange de deux écoulements augmentent les échanges de quantité de mouvement des particules fluides dans le sens transversal ainsi que dans le sens vertical. C'est pour cette raison que l'écoulement dans la zone de jonction devient très turbulent et que sa perte d'énergie locale est très importante (Lin et Soong 1979). La capacité de transport des solides y est aussi beaucoup plus forte qu'ailleurs et pour cette raison, il y a peu ou pas de dépôt. Ce phénomène est accentué lors de l'augmentation des débits liquides.
- Normalement, la jonction peut provoquer une augmentation des tirants d'eau des écoulements en son amont. Si les canaux ne sont pas très larges et si le rapport de flux Q_2 / Q_1 dépasse une certaine valeur, juste à l'aval de la jonction, une diminution du tirant d'eau peut se produire. Une étude spécifique en est proposée dans le paragraphe suivant.
- Une zone morte est souvent rencontrée à l'aval d'une jonction. La ligne BE_w qui sépare cette zone de l'écoulement principal est la *streamline*. Dans cette zone, l'écoulement est en ré-circulation locale. Dans cette zone d'eau morte, le dépôt peut se manifester.

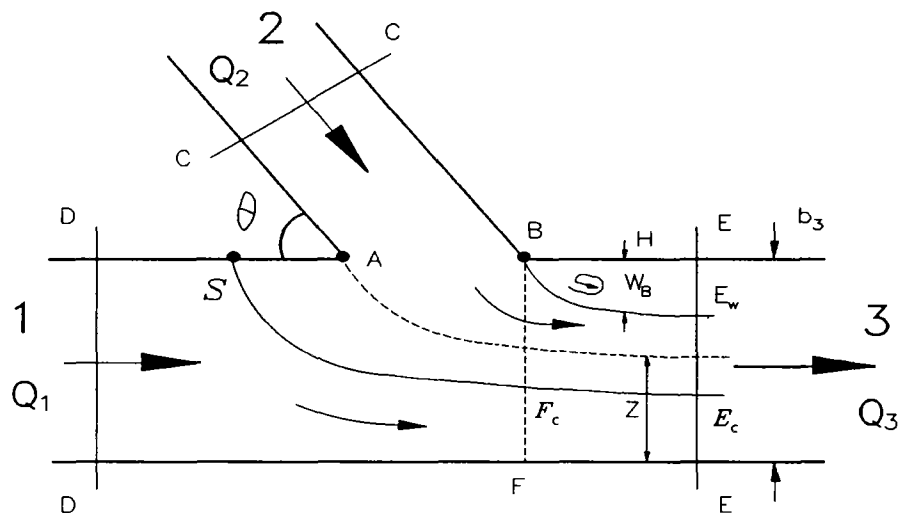


Figure 7.2.2-1 Schématisation d'une jonction de deux cours d'eau

7.2.3. Résultats publiés liés aux jonctions

En parcourant la littérature hydraulique et de transport solide, on ne trouve que peu d'articles publiés dans ce domaine. Il apparaît que Modi et al. (1981) sont les premiers à étudier théoriquement ces phénomènes à l'aide de la théorie des transformations conformes en supposant que le fluide est un fluide

parfait. Ils ont constaté que l'emplacement du point de stagnation S est bien une fonction complexe des géométries de tous les canaux, du rapport des flux Q_2 / Q_1 , et de l'angle de la jonction Θ . Celui-ci influence l'épaisseur de la zone morte. Pour un angle Θ et des géométries de canaux donnés, si le rapport des flux Q_2 / Q_1 est petit, l'emplacement du point de stagnation S se trouve au bord AC du canal 2, et l'épaisseur de la zone d'eau morte est faible. Dans le cas contraire, il peut se situer dans le canal principal 1, et l'épaisseur de la zone d'eau morte est grande. Le tirant d'eau en amont du canal 1 est déterminé par cette dernière. Plus l'épaisseur de la zone d'eau morte est grande, plus le tirant d'eau en amont de la jonction est grand. Donc, pour diminuer ce dernier, il faut déplacer le point de stagnation S sur le bord AD , autrement dit, diminuer le rapport des flux Q_2 / Q_1 et l'angle de la jonction Θ .

James L. Bost et Ian Reid (1984) ont étudié expérimentalement les caractéristiques de la zone morte à la jonction (son épaisseur – sa longueur) avec trois canaux de géométries identiques, c'est-à-dire $b_1 = b_2 = b_3$, des angles de jonction et des rapports de flux Q_2 / Q_1 variables. Ils ont comparé leurs résultats de mesures avec ceux prédits par le modèle de Modi et al. (1981) et constaté que l'épaisseur de la zone croît avec l'angle de la jonction Θ et le rapport des flux Q_2 / Q_1 . La figure 7.2.3-1 montre le rapport de son épaisseur à sa longueur en fonction de l'angle de la jonction et du rapport des flux Q_2 / Q_1 .

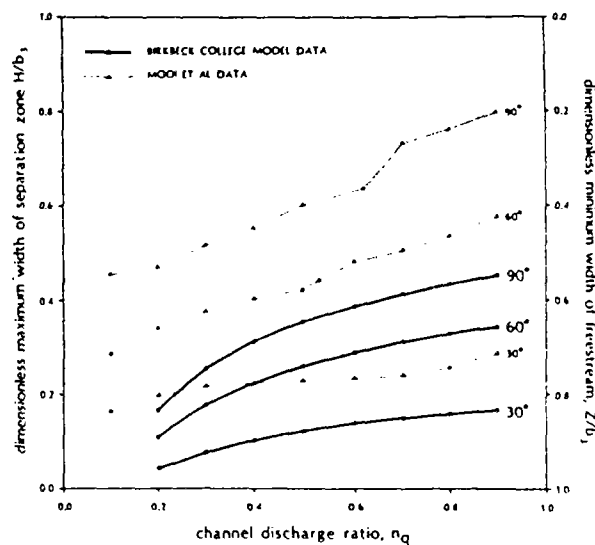


Figure 7.2.3-1 Caractéristiques de la zone morte en fonction de l'angle de la jonction et du rapport des flux Q_2 / Q_1

Ramamurthy et al. (1988) ont étudié les problèmes d'une jonction de deux écoulements perpendiculaires dans des canaux de géométries identiques. Ils ont proposé une formule empirique pour la profondeur de l'écoulement principal en amont de la jonction, donnée par :

$$\left[\frac{H_1}{H_{3c}} \right]^3 + \left(0.48 \cdot \frac{Q_2}{Q_1} - 3 \right) \frac{H_1}{H_{3c}} + \frac{1 - Q_2/Q_1}{0.63 + 0.251 Q_2/Q_1} = 0 \quad \{7-1\}$$

où H_{3c} est la profondeur critique de l'écoulement à la section en l'aval de la jonction qui est calculée à partir de l'équation ci-dessous:

$$H_{3c} = \left(\frac{\alpha_3 Q_3^2}{g b_3^2} \right)^{1/3} \quad \{7-2\}$$

$$\text{avec } \alpha_3 = 1.25 + 0.5 \cdot \frac{Q_2}{Q_1} \quad \{7-2.a\}$$

En même temps, ils ont constaté qu'il apparaît une baisse du tirant d'eau à l'aval de la jonction lorsque $Q_2/Q_1 > 0.3$.

7.2.4. Application des résultats de la littérature au collecteur 13

Nous allons ici utiliser les résultats publiés pour analyser les phénomènes rencontrés aux jonctions de notre collecteur.

Les résultats des mesures montrent que le dépôt aux jonctions a souvent une faible épaisseur. Celle-ci diminue lors des événements pluvieux qui y provoquent des érosions brutales, voire totales lorsqu'il s'agit d'une pluie importante. Ce phénomène est dû au mélange fort de deux écoulements qui accentue la turbulence dans cette zone.

Nous allons essayer de préciser ci-dessous si, et comment, la jonction du collecteur 13 avec celui de Canebière influence le dépôt dans le tronçon amont.

Le collecteur Canebière se rejette dans le collecteur 13 avec un angle d'environ 60 degrés. Nous supposons que ces deux collecteurs ont une même géométrie et que la formule de Ramamurthy (équation {7-1}) est valable dans notre cas.

Trois cas sont étudiés : (1) sans dépôt; (2) avec un profil de dépôt imposé dont l'origine est au point 33 et de pente $I_f = 0.002 \text{ m/m}$ et (3) $I_f = 0.003 \text{ m/m}$. Dans chacun de ces trois cas, nous allons reproduire une ligne d'eau à partir du modèle hydrodynamique, pour les périodes des débits maximums et minimums de temps sec, respectivement. Le tirant d'eau à l'aval est le seul paramètre exigé par le modèle hydrodynamique comme condition initiale. Il est pris soit égal à la profondeur normale de l'écoulement, obtenue

à partir de la formule de Strickler (équation {5-2}) en égalisant la pente d'énergie à la pente du fond; soit égal à celle calculée par la formule de Ramamurthy et al. (équation {7-1}). Toutes les informations sont listées dans le tableau 7.2.4-1. Les collecteurs n'étant pas rectangulaires, la profondeur critique de l'écoulement 3 (H_{3c}), présentée dans ce tableau, est calculée à partir de la formule générale :

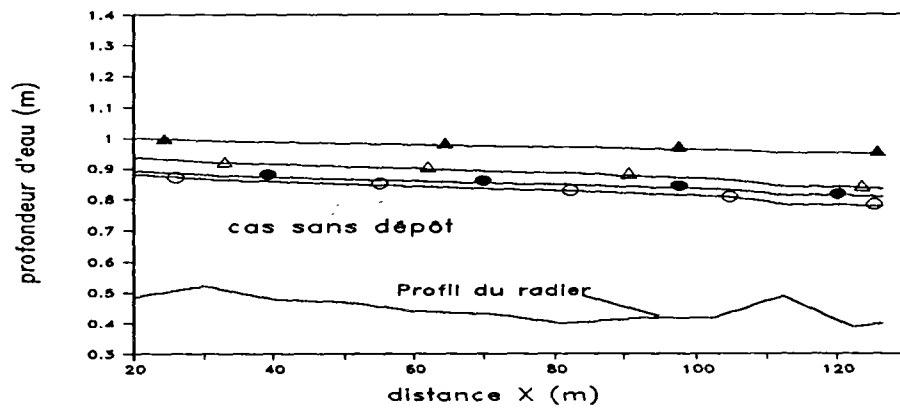
$$\frac{\alpha_3 Q_3^2 L_3}{g A_3^3} = 1 \quad \text{avec} \quad \alpha_3 = 1.25 + 0.5 \cdot \frac{Q_2}{Q_1}$$

Cas n°	Q_1	Q_2	Q_3	H_{1n}	H_{3c}	H_{1r}
1 sans dépôt	0.150	0.110	0.26	0.429	0.349	0.545
	0.115	0.050	0.165	0.372	0.267	0.404
2 $I_f = 0.002$	0.150	0.110	0.26	0.296	0.273	0.426
	0.115	0.050	0.165	0.251	0.200	0.302
3 $I_f = 0.003$	0.150	0.110	0.260	0.227	0.240	0.375
	0.115	0.050	0.165	0.192	0.173	0.262
NOTES: Q_1, Q_2, Q_3 = débits liquides respectivement dans les canaux numérotés 1, 2 et 3; H_{3c} = profondeur d'eau critique juste en aval de la jonction dans le canal 3; H_{1n}, H_{1r} = profondeur d'eau normale et celle évaluée à partir de la méthode de Ramamurthy et al, juste en amont de la jonction dans le canal 1; I_f = pente du profil de dépôt imposé dont l'origine est au point 33 (cf. figure 1.1-1).						

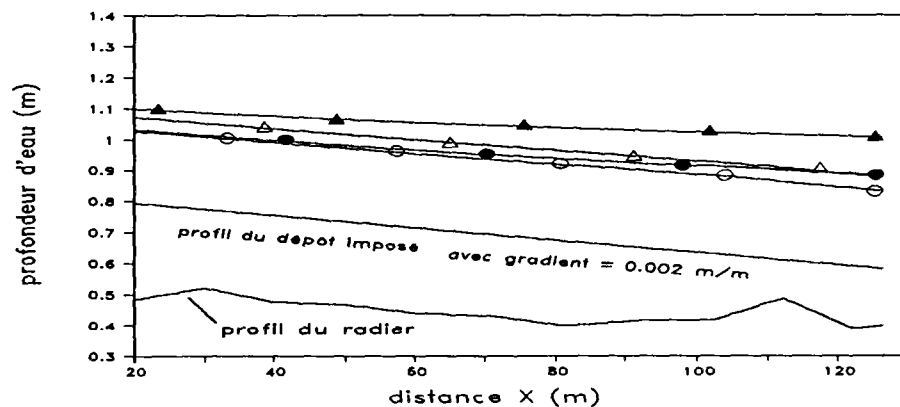
Tableau 7.2.4-1 Données utilisées pour l'étude de l'influence de la jonction du collecteur 13 avec celui de Canebière

De ces figures, nous pouvons tirer les constatations suivantes :

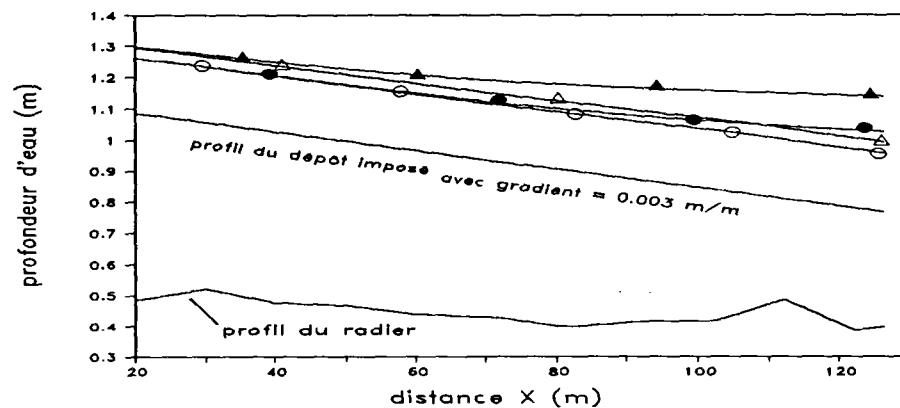
1. L'influence de la jonction sur l'écoulement amont devient de plus en plus faible lors de l'augmentation du volume et de la pente du profil de dépôt.
2. L'influence de cette jonction est plus faible pendant la période des apports liquides minimums. Elle disparaît complètement en amont de $X = 65$ dans le cas où $I_f = 0.003 \text{ m/m}$ (cette pente correspond au profil mesuré au 798^{ième} jour après le curage).



(a) sans dépôt, ceci correspond à $I_f=0.001\text{m/m}$ et au 1^{er} jour après le curage



(b) avec dépôt et $I_f=0.002\text{m/m}$, ceci correspond au de 120^{ième} jour après le curage



(c) avec dépôt et $I_f=0.003\text{m/m}$, ceci correspond au de 798^{ième} jour après le curage

Pour $Q_1=0.150\text{m}^3/\text{s}$: $\blacktriangle$ $H_{\text{val}}=H_{I, \text{Ramamurthy}}$ $\triangle$ $H_{\text{val}}=H_{II, \text{Normale}}$
 Pour $Q_1=0.115\text{m}^3/\text{s}$: $\bullet$ $H_{\text{val}}=H_{I, \text{Ramamurthy}}$ $\circ$ $H_{\text{val}}=H_{II, \text{Normale}}$

Figure 7.2.4-1 Comparaison des lignes d'eau calculées sans et avec la considération de la jonction du collecteur 13 avec celui de Canebière

7.2.5. Conclusion

Une jonction peut créer divers problèmes : forte perte d'énergie locale, forte turbulence, augmentation de la cote de la surface libre en son amont ce qui ralentit l'écoulement.

L'application des résultats classiques au collecteur 13 nous permet de nous apercevoir que l'influence de la jonction avec le collecteur Canebière est très importante notamment juste après le curage du collecteur, au moment où la pente du fond est faible (de l'ordre de $1\text{m}/1000\text{m}$), et plus forte en période de forts apports liquides où le rapport (apports provenant du Canebière / apports provenant du l'amont de Collecteur 13) deviennent plus forts. Cette influence continue au delà du moment où la pente du profil de dépôt atteint une valeur de $3\text{m}/1000\text{m}$.

7.3. Influence des virages sur la formation des dépôts

7.3.1. Introduction

Les observations de la dynamique des dépôts (voir chapitre 2) montrent que l'épaisseur du dépôt dans les virages dans le collecteur 13 varie beaucoup et influence la stabilisation du dépôt.

7.3.2. Phénomènes hydrauliques dans les virages

Les caractéristiques des écoulement en virages sont très différentes de celles des écoulements rectilignes (INPHEEIIWH 1980). La force centrifuge peut y créer des effets particuliers tels que la surélévation de la surface libre côté extérieur et un écoulement hélicoïdal (figure 7.3.2-1). Ces effets ont une influence sur la perte d'énergie et la distribution transversale de la contrainte de cisaillement. Les phénomènes de transport solide (dépôt, érosion, etc.) y sont beaucoup plus complexes.

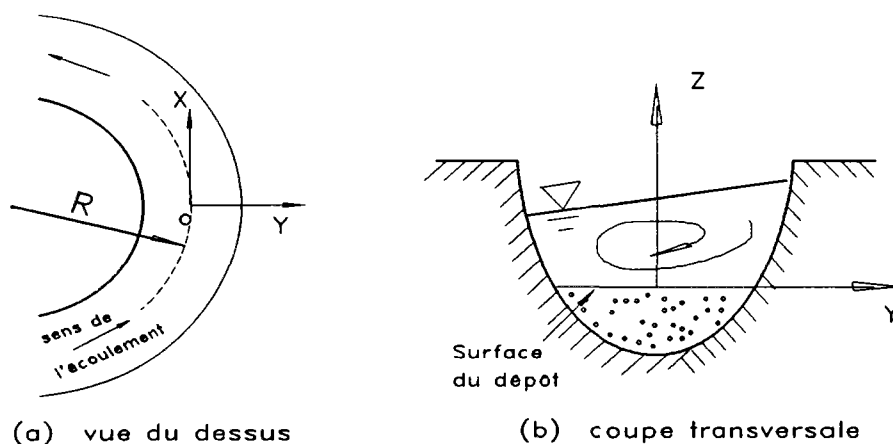


Figure 7.3.2-1 Schématisation d'un virage d'un écoulement

Depuis une trentaine d'années, pour contrôler l'évolution des rivières ou des canaux d'irrigation, les ingénieurs ont étudié les phénomènes hydrauliques et le transport solide dans les coudes. Bathurst et al [1980] ont ainsi fait des études expérimentales sur les phénomènes de ré-circulation secondaire et la distribution de la contrainte de cisaillement. Des expériences en laboratoire ont été également menées par Choudhary et al. (1977), Hicks et al. (1990), Jim et al. (1990) avec des canaux munis d'un fond et de parois fixées. Ces essais donnent une bonne première approche des problèmes physiques. Depuis peu de temps des modèles mathématiques 2D (Nouh et al. 1979, De Vriend 1983) et $k \sim \epsilon$ (Leschzimer 1979) sont apparus et ont approfondi la connaissance de ces mécanismes.

Nous résumons ci-dessous les résultats de ces recherches :

- 1/ Les phénomènes hydrauliques et de transport solide dans les coudes sont différents de ceux observés en tronçons rectilignes, la cause en étant la force centrifuge de l'écoulement.
- 2/ Les paramètres qui influencent les phénomènes hydrauliques ainsi que le transport solide sont : le nombre de Froude, le nombre de Reynolds, la rugosité de la paroi et du fond, et le rapport de profondeur d'eau au rayon de l'axe central du virage.
- 3/ La distribution transversale de la contrainte de cisaillement est normalement hétérogène et a des pics parfois très pointus. Cette hétérogénéité devient moins importante si le nombre de Reynolds de l'écoulement augmente. Plusieurs pics peuvent apparaître sur une même section transversale. Ceci dépend de la géométrie du canal et de l'intensité de l'écoulement. Ce phénomène est dû à l'écoulement hélicoïdal dans le coude. Les pics de la distribution transversale de contrainte de cisaillement se trouvent aux jonctions de l'écoulement principal et de l'écoulement secondaire, lorsque ce dernier est dirigé vers le fond. Leurs valeurs sont influencées par de nombreux paramètres et peuvent devenir cinq fois plus grandes que celle de la moyenne de la section transversale. Mais toujours, la plus grande se trouve à proximité du côté "creux".
- 4/ Mais quelle que soit l'hétérogénéité de la distribution transversale de la contrainte de cisaillement de l'écoulement dans un coude, la perte d'énergie totale de l'écoulement est toujours plus grande que celle qui serait obtenue dans un tronçon rectiligne de même longueur, pour une même profondeur d'eau moyenne et une même vitesse moyenne. Elle consiste en deux parties : une partie "normale", linéaire, provoquée par le frottement de l'écoulement avec les parois J' et une partie supplémentaire produite par le coude du canal J'' , qui dépend fortement du nombre de Froude et de la courbure de l'écoulement. La première peut être calculée à partir de la formule de Manning-Strickler (équation {5-2}). Pour la deuxième, qui peut atteindre le même ordre de grandeur (parfois, plus ou beaucoup plus) que la première, Rozovskii (1961) et Chang (1983) ont proposé respectivement les formules suivantes :

Rosovskii (1961) : formule expérimentale

$$J'' = \left(12 \frac{\sqrt{g}}{C} + 30 \frac{g}{C^2} \right) \left(\frac{H}{r_c} \right)^2 F_r^2 \quad \{7-3\}$$

Chang (1983) : formule analytique

$$J'' = \left(\frac{2.86 \sqrt{f} + 2.07 f}{0.565 + \sqrt{f}} \right) \left(\frac{H}{r_c} \right)^2 F_r^2 \quad \{7-4\}$$

où H = profondeur d'eau; r_c = rayon du virage; C = coefficient de Chezy; F_r = nombre de Froude; f = coefficient de rugosité qui est fonction de beaucoup de paramètres (rugosité du canal, géométrie de la section du canal, courbure du virage et conditions d'écoulement).

7.3.3. Phénomènes de transport solide et de dépôt dans les coudes.

Un virage distribue la turbulence de l'écoulement dans le sens vertical par l'influence intermédiaire de l'écoulement hélicoïdal et de l'écoulement de ré-circulation secondaire, de façon telle que la capacité de transport en suspension devient plus forte que celle du même écoulement dans un tronçon rectiligne. De même, l'apparition d'un écoulement hélicoïdal provoque une distribution hétérogène de la contrainte de cisaillement du fond, qui est un facteur facilitant le transport solide. C'est peut-être pour ces raisons qu'il y a moins de dépôt dans les coudes du collecteur 13, et particulièrement très peu ou pas de dépôt pour les virages à forte courbure.

Ce phénomène est accentué en cas de pluies lorsque les nombres de Froude et de Reynolds sont plus importants. C'est pourquoi alors les dépôts (souvent des grandes tailles) qui se forment par temps sec aux virages de grande courbure dans le collecteur 13 sont souvent entièrement érodés.

Remarques : les virages peuvent localement renforcer le transport solide, empêcher le dépôt. Ceci ne veut pas dire qu'ils peuvent faciliter le transport solide dans l'ensemble du collecteur. Au contraire, du fait qu'ils créent des pertes d'énergie supplémentaires, en diminuant l'intensité de l'écoulement global (voir § 7.3.2), ils favorisent le dépôt. Donc, il est conseillé d'éviter les virages si possible, notamment ceux à forte courbure, du point de vue du transport solide global et de la sécurité des travaux.

7.4. Conclusion

Les jonctions et les virages peuvent influencer la formation du dépôt et les phénomènes de transport solide. Les turbulences des écoulements y sont très fortes, et c'est pour cette raison qu'il ne peut y avoir pas (ou peu) de dépôt. Bien que les paramètres qui déterminent ces deux types de singularités soient différents, toutes deux

créent une perte d'énergie locale et ralentissent les écoulements en leurs amonts. Leurs influences amont diminuent au-fur-et-à-mesures de l'augmentation de la pente du fond. L'analyse faite dans le paragraphe 7.2.4 montre que l'influence du collecteur Canebière est encore importante au 798^{ième} jour après le curage.

Afin d'éviter ces influences négatives, l'étude bibliographique nous conduit à proposer les solutions suivantes:

- * Essayer d'éviter les jonctions et les virages pendant la construction des collecteurs;
- * Ceci n'étant bien évidemment pas possible, éviter la construction des virages de fortes courbures et des jonctions dont 1/ l'angle θ est très grand, 2/ les rapports des apports liquides sont importants.

Chapitre 8

ETUDE DES QUANTITES DE SOLIDES TRANSPORTES **PAR L'ECOULEMENT DANS LE COLLECTEUR 13** **PROPOSITION D'UNE NOUVELLE CONCEPTION** **DE LA CAPACITE DE TRANSPORT** **DANS LE CAS D'UNE GRANULOMETRIE ETENDUE**

8.1. Introduction

Les caractéristiques des solides en dépôt et des solides transportés sont présentées et analysées dans les chapitres 2 et 4 de la première partie, et certains phénomènes et mécanismes de transport rencontrés dans le collecteur 13 sont étudiés dans les chapitres 6 et 7. Ces résultats d'analyse nous ont conduit à mieux appréhender la dynamique de dépôt et du transport en collecteur: par exemple, pourquoi les solides s'y arrêtent-ils et comment se forme le dépôt.

Mais ils ne permettent pas de découvrir le mécanisme de l'évolution du volume déposé et la relation quantitative entre les solides transportés et les dépôts. Pour cela, une autre analyse semble inévitable et fait l'objectif du présent chapitre. Ses résultats, avec ceux obtenus et présentés dans les chapitres précédents, jettent les bases nécessaires à la conception de notre modèle de transport solide.

8.2. Analyse des débits des solides déposés à partir des résultats des mesures de dépôt

8.2.1. Description

D. Laplace (1991) a essayé de décrire la relation entre l'évolution du volume de dépôt du collecteur et le fonctionnement de l'ensemble du système hydrologique situé à son amont (bassins versants et réseaux), à l'aide d'un modèle stochastique global. Celui-ci a été établi pour simuler le remplissage de chambre de dessablement (Dartus 1982, 1983). Dans son étude, D. Laplace a donné une concentration constante des solides (0.30 kg/m^3) pour les périodes de temps sec, et une autre (0.70 kg/m^3) pour les périodes de temps de pluies. Mais ce modèle sous-estime les débits des solides déposés pour la première période de temps sec, du jour 1 au jour 51, et sur-estime ceux-ci pour d'autres périodes de temps sec. Bien que plusieurs sortes d'améliorations proposées permettent d'obtenir une bonne similitude entre les valeurs calculées et mesurées pendant la période de calage du modèle, du jour 1 au jour 730, sa validité pour la prévision de