

Chapitre 6

ETUDE DES MECANISMES DE TRANSPORT SOLIDE

6.1. Présentation

Dans la première partie, les caractéristiques des solides mobiles ainsi que celles du dépôt ont été synthétiquement présentées. Pour mieux cerner les phénomènes de dépôt et de transport solide, une analyse basée sur la théorie du transport lui-même va nous permettre de découvrir certains mécanismes propres au collecteur 13 et d'améliorer la fiabilité de généralisation des résultats des mesures à d'autres collecteurs.

6.2. Etude du mécanisme des solides en suspension

6.2.1. Présentation

Nous nous sommes aperçus, par les résultats des prélèvements des solides (première partie), que les solides charriés jouent un rôle prédominant sur la formation de dépôt dans le collecteur 13, mais l'influence des solides en suspension n'est pas encore claire. Aussi, une étude propre de leur mécanisme s'est avérée nécessaire.

6.2.2. Mécanisme général de transport solide en suspension

Les solides transportés en suspension au sein d'un écoulement subissent l'effet de la turbulence et celui de la gravité. Le transport en suspension apparaît donc lorsque le premier effet domine. Parmi ces solides en suspension, une partie est considérée comme en auto-suspension, équivalent au washload. Ces derniers sont de très petites tailles et présentent des décantabilités très faibles. L'effet de la turbulence de l'écoulement est tel qu'ils peuvent parcourir le collecteur sans décanter.

Néanmoins, on trouve une certaine quantité de ces solides dans le dépôt. Ceci n'est dû qu'à l'influence de masquage des petites particules par les grosses qui fait l'objet de l'étude du paragraphe 6.5.

6.2.3. Etude des caractéristiques des solides en suspension

Tout d'abord, il est nécessaire de connaître quel genre de solides sont transportés en suspension. Dans la littérature, on peut trouver beaucoup des formules permettant d'évaluer leurs caractéristiques. Une recherche bibliographique a été menée respectivement par l'auteur (non mise en document) et

Bachoc (1992). Ce dernier a de plus effectué une comparaison des résultats de calcul obtenus par ces formules. Nous analysons les caractéristiques des solides en suspension dans le collecteur 13 à partir de ces résultats classiques.

Après cette recherche bibliographique, nous avons retenu la formule de Bagnold et de Wang (Equation {6-1}) pour la définition de la taille maximum des solides en auto-suspension (d_{s_auto}), et celle de Yang (1989) (Equation {6-4}), obtenue par la modification de celle d'Einstein et Qien, pour définir les conditions critiques d'écoulements pour la mise en suspension des solides (d_{s_sus}) (elle a été utilisée pour la modélisation de l'évolution du lit du Rhône). Ces deux formules sont rappelées ci-dessous:

Formule de Bagnold & Wang pour la définition de (d_{s_auto}):

$$U_m J_m \geq w_s \quad \{6-1\}$$

avec U_m = vitesse moyenne de l'écoulement; J_m = pente d'énergie de l'écoulement; w_m = vitesse de chute d'une particule solide.

Lorsque les particules en auto-suspension sont fines hors floculation, la formule de type de Stokes peut être utilisée pour calculer leurs vitesses de chutes. Nous choisirons, de préférence, celle de Gontcharof car elle tient compte des particules solides naturelles, notée ci-dessous:

$$w_s = \frac{1}{24} \cdot \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \cdot g \cdot \frac{d_s^2}{\nu} \quad \{6-2\}$$

avec ρ_f , ρ_s = masses volumiques fluide et solide respectives (kg/m^3); d_s = diamètre de la particule solide considérée (m); g = accélération de la gravité (m/s^2); ν = viscosité liquide (m^2/s).

Substituant cette formule dans la formule de Bagnold & Wang, nous obtenons l'expressions du diamètre maximum des solides en auto-suspension suivante:

$$d_{s_auto} = \sqrt{24 \cdot \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} \cdot \frac{\nu U_m J_m}{g}} \quad \{6-3\}$$

Formule de Yang pour la définition de (d_{s_sus}):

$$\frac{u_*}{\kappa w_s} = 2.5 \quad \{6-4\}$$

avec u_* = vitesse de frottement de l'écoulement (m/s); w_s = vitesse de chute de la particule considérée (m/s); κ = coefficient constant de Karman.

La vitesse de frottement étant connue, il est possible de calculer alors le diamètre maximum des solides en suspension, différent à priori de l'auto-suspension. Par exemple, en prenant pour le calcul la vitesse de chute la formule de Zhang (équation {6-6}), avec $\kappa = 0.40$, l'équation {6-4} devient:

$$u_* = \sqrt{\left(13.95 \cdot \frac{v}{d_s}\right)^2 + 1.09 \cdot \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \cdot g d_s} - 13.95 \cdot \frac{v}{d_s} \quad \{6-5\}$$

Ainsi, le diamètre maximum des solides en suspension d_{s_sus} peut s'obtenir par la résolution de l'équation 6-5 en mettant celui-ci à la place de d_s .

Nous effectuons alors les calculs en tenant compte des conditions réelles des écoulements de temps sec dans le collecteur 13. Deux écoulements spéciaux sont considérés, respectivement au 10^{ième} jour et au 798^{ième} jour après le dernier curage. La pente du lit est de 0.001m/m pour le premier écoulement et de 0.003m/m pour le second. Deux masses volumiques moyennes sont prises en compte : l'une est celle des solides en suspension mesurée, $\rho_s = 1520 \text{ kg/m}^3$; l'autre est celle des solides en dépôt $\rho_s = 2680 \text{ kg/m}^3$. Et une même valeur de la viscosité cinématique est prise pour tous ces calculs, avec $\nu = 0.00000106 \text{ m}^2/\text{s}$. Les résultats de calcul sont récapitulés dans le tableau 6.2.3-1, ainsi que les pourcentages correspondant aux d_{s_auto} et d_{s_sus} évalués selon la figure 2.5-1.

N° du jour et tronçon (0)	U_m (m/s) (1)	Rh (m) (2)	J_m (m/m) (3)	avec $\rho_s = 1520 \text{ kg/m}^3$				avec $\rho_s = 2680 \text{ kg/m}^3$			
				d_{s_auto} (μm) (4)	P% (5)	d_{s_sus} (μm) (6)	P% (7)	d_{s_auto} (μm) (8)	P% (9)	d_{s_sus} (μm) (10)	P% (11)
10 ^{ième} j. Amont	0.410	0.265	0.00046	30.67	50.0	550.0	90.4	17.1	23.4	274.6	87.6
10 ^{ième} j. aval	0.614	0.266	0.00105	56.70	70.0	828.0	91.0	31.6	47.0	379.4	90.0
798 ^{ième} j. Amont	0.565	0.170	0.00240	82.23	78.2	1043.0	91.5	45.8	60.5	453.0	90.5
798 ^{ième} j. aval	0.690	0.234	0.00190	80.86	78.0	1102.0	91.6	45.0	59.0	472.5	91.0

U_m , Rh et J_m = respectivement la vitesse, le rayon hydraulique et la pente d'énergie de l'écoulement du tronçon en moyen;
 d_{s_auto} et d_{s_sus} = les diamètres maximaux des solides respectivement en auto-suspension et en suspension; P% = pourcentages des solides fins évalués à partir de la figure 2.5-1 selon les valeurs des d_{s_auto} et d_{s_sus} calculés.

Tableau 6.2.3-1 : Comparaison entre les résultats des caractéristiques des solides en suspension calculés à partir des formules classiques et ceux mesurés

Les résultats montrent que, les tailles maximales des solides en suspension d_{s_sus} et celles en auto-suspension d_{s_auto} , s'accroissent dans le temps avec la pente. On constate que, quelque soit la masse volumique considérée, les premières correspondent toujours à d_{90} de la granulométrie de suspension mesurée. Le système des équations {6-4} et {6-5} est valable pour la définition de ce critère. Bien qu'il

existe une faible pourcentage de grosses particules en réalité, il s'agit souvent de particules organiques et ayant des formes très particulières (par exemple, les feuilles d'arbres, les papiers, etc). Celles-ci présentent toujours des très faibles décantabilités.

Ce tableau nous permet de faire ainsi les remarques suivantes:

- 1/ Considérant les résultats de calcul dans les colonnes (4), (5), (6) et (7), où la masse volumique moyenne des solides en suspension mesurée ($\rho_s = 1520 \text{kg/m}^3$) est utilisée, on constate que la plupart des solides en suspension par temps sec sont en auto-suspension, particulièrement dans le tronçon aval.

Les tailles maxima des solides en suspension dans le tronçon amont sont proches de la taille des particules, d_{50-d65} , constituant le dépôt entre les points 12 et 14. Aussi est-il tout à fait possible qu'une partie du dépôt à cet endroit provienne de la suspension.

Au 10^{ième} jour et au 798^{ième} jour, les solides des tailles supérieures à d_{s_auto} représentent les centiles massiques de 50% et de 22.0%. Ceux-ci correspondent aux débits de 42.61 et de 18.75 litres/jour respectifs (ou bien 0.050g/litre et 0.022g/litre en concentration). Ces valeurs ne sont pas du tout négligeables par rapport au débit des solides déposés en temps sec (cf. §8.2 et §8.3).

- 2/ Les résultats de calcul dans les colonnes (8), (9), (10) et (11), où la masse volumique moyenne des solides en dépôt $\rho_s = 2680 \text{kg/m}^3$) est utilisée, décrivent les caractéristiques des solides minéraux en suspension. On s'aperçoit que les tailles maximales des solides en suspension dans le tronçon aval sont proches des d_{10} du dépôt. Ainsi, l'influence des solides minéraux en suspension dans ce tronçon sur la formation de dépôt est négligeable. Mais elle peut devenir importante entre les points 12 et 14 dans le tronçon amont lorsque les tailles maximales des solides en suspension sont proches de la taille médiane des particules (d_{50}) constituant le dépôt.

Ainsi, en général, l'influence des solides en suspension (organiques et minéraux) sur la formation dans le tronçon aval de dépôt est négligeable lorsque leurs tailles maximales sont proches des d_{10} des solides en dépôt. Mais, elle peut être considérable en tronçon amont, car les tailles maximales des solides en suspension sont supérieures à la taille médiane des solides constituant le dépôt dans le tronçon entre les points 12 et 14. Cette influence diminue dans le temps, lors de l'augmentation de la pente longitudinale du profil de dépôt. Celle-ci renforce le transport solide du tronçon.

6.2.4. Quelques remarques sur la suspension

L'analyse ci-dessus permet de faire les remarques suivantes:

- 1/ La plupart des solides en suspension sont des solides en auto-suspension (ils ne décantent pas dans l'écoulement considéré);

- 2/ Les solides en suspension de grandes tailles ne peuvent pas beaucoup influencer la formation de dépôt dans le tronçon aval. Ainsi, leur présence peut être négligée. Mais ils peuvent jouer un rôle assez important dans le tronçon amont, entre le point 12 et le point 14 juste en amont de jonction du collecteur 13 avec celui de Canebière car:
- a. leurs tailles les plus grandes sont du même ordre de grandeur que la taille médiane du dépôt à cet endroit;
 - b. ils présentent un débit de plus de 18.75 litres/jour;

Mais cette influence diminue dans le temps, lors de l'augmentation de la pente longitudinale du profil de dépôt et pourra être négligeable au bout d'un certain temps, car les tailles maximales des solides en suspension ainsi qu'en auto-suspension sont quasiment identiques pour les tronçons amont et aval le 798^{ième} jour après le dernier curage du collecteur.

- 3/ Il est certain que les phénomènes apparus ci-dessus sont dus à la production des solides de tailles très étendues. Celle-ci amène une très grande partie des solides qui ont de très faibles décantabilités (*fins ou de grandes tailles mais très légers*) et qui peuvent être transportés facilement par l'écoulement, une partie des solides de décantabilités assez ou très importantes qui peuvent se déposer facilement, et très peu des solides qui présentent des décantabilités entre ces deux.

6.3. Etude du mécanisme des solides charriés

6.3.1. Présentation

Grâce aux prélèvements des solides charriés (chapitre 4, première partie), nous connaissons leurs caractéristiques physiques de base (volumes, diamètres et masses volumiques). L'analyse préliminaire nous a permis de découvrir que les phénomènes de tri granulométrique et de masses volumiques existent dans le dépôt (figure 2.4-1 et figure 2.4-3), mais également pour les solides transportés par les écoulements (figure 4.3-2 et tableau 4.4-1).

La figure 6.3.1-1 présente les valeurs de ces trois caractéristiques des solides piégés (ou charriés) pour chaque prélèvement. Nous constatons que les solides les plus gros n'ont pas forcément les masses volumiques les plus élevées, mais se présentent systématiquement au moment d'un grand débit. Une analyse plus approfondie, prenant en compte à la fois plusieurs paramètres, est donc nécessaire.

Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter les résultats d'une analyse basée sur la décantabilité et l'énergie associée à la vitesse de décantation des solides charriés. Sauf indications locales, toute cette analyse sera effectuée sur les valeurs moyennes par piège.

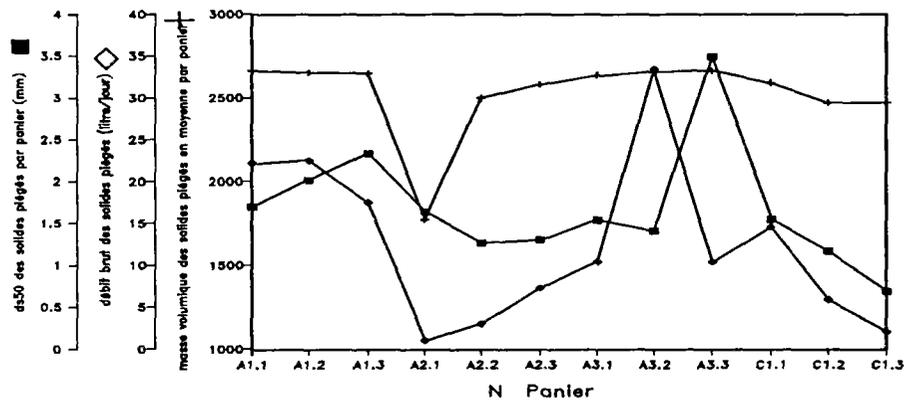


Figure 6.3.1-1 : Synchronisation des débits, des tailles et des densités des solides piégés dans tous les paniers pour le prélèvement N°12

6.3.2. Décantabilité des solides piégés (charriés)

La décantabilité est décrite par la vitesse de chute limite en eau calme d'une particule solide piégée w_s qui tient compte à la fois de sa masse volumique et de son diamètre. Lorsque les formes des particules sont très variables et influencent beaucoup leurs vitesses de chute, celles-ci devraient être mesurées directement en utilisant des solides piégés, mais ceci pose des problèmes d'équipement et surtout de temps de travail. Nous avons préféré les calculer, avec les granulométries et les masses volumiques mesurées, à partir d'une formule de la littérature.

La formule utilisée ici n'est autre que celle de Zhang. Elle a été obtenue à partir d'une analyse théorique (INPHEEIIWH 1980) et calée à partir des résultats des mesures avec des sables naturels. Il est à noter qu'elle est valable pour les régimes laminaire, transitoire et turbulent. Nous la citons ci-dessous:

Formule de vitesse de chute de Zhang:

$$w_s = \sqrt{\left(13.95 \frac{\nu}{d_s}\right)^2 + 1.09 \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g d_s} - 13.95 \frac{\nu}{d_s} \quad \{6-6\}$$

avec ν = viscosité du liquide (m^2/s); d_s = diamètre des particules solides (m); ρ_f , ρ_s = masse volumique du liquide et celle du solide (kg/m^3); w_s = vitesse de chute ou décantabilité de la particule solide considérée (m/s).

La décantabilité des solides interceptés dans un piège est représentée par la vitesse de chute moyenne, soit w_m (m/s), calculée de la manière suivante:

$$w_m = \sum_{i=1}^N (p_i \% \times w_{si}) \quad \{6-7\}$$

avec w_m = décantabilité des solides en moyen par piège (m/s); N = nombre des classes granulométriques des solides; p_i = pourcentage des solides de la classe i .

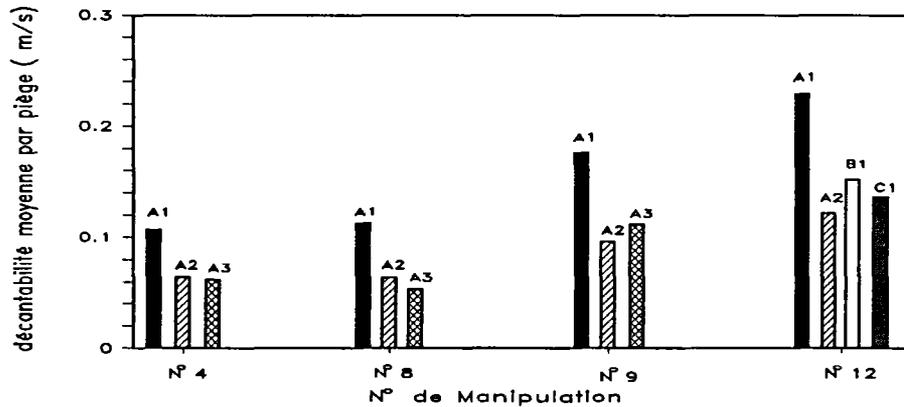


Figure 6.3.2-1 *décantabilités des solides (en moyenne par piège) pour les prélèvements N°4, N°8, N°9 et N°12 (cf. figure 4.1-1)*

Cette figure 6.3.2-1 permet de faire les constatations suivantes:

- D'un jour à l'autre, les solides présentent des décantabilités très différentes. Mais les solides interceptés dans le piège A1 sont toujours plus décantables que ceux des autres pièges.
- Les solides arrêtés par les pièges A2 et A3 ont des décantabilités presque identiques. Ceci signifie que les solides qui peuvent s'échapper du piège A1 sont des solides en suspension qui se font intercepter par les pièges A2 et A3.
- Les solides charriés aux emplacement-B et -C sont moins décantables que ceux à l'emplacement-A1 (voir les résultats d'analyse du prélèvement N°12). Mais les décantabilités des solides charriés à l'emplacement-C sont très proches de celles des solides en suspension à l'emplacement-A2 (*les solides interceptés dans le piège A2*). Ceci signifie que la majorité des solides charriés ainsi que les solides en dépôt à l'emplacement-C proviennent de la suspension à l'emplacement-A.

6.3.3. Puissance des solides décantées par l'unité de temps

Afin d'inclure l'influence des quantités des solides charriés sur la formation de dépôt, nous définissons un terme spécifique: la puissance des solides décantée par l'unité de temps, exprimée par VE_d , ou puissance associée à la vitesse de décantation de la puissance des solides transportés par les écoulements. Nous l'écrivons:

$$VE_d = Q_s \cdot \rho_s \cdot g \cdot w_s \quad \{6-8\}$$

avec Q_s = débit des solides piégés (m^3/s); ρ_s = masse volumique des solides (kg/m^3); g = accélération de gravité (m/s^2); w_s = décantabilité ou vitesse de chute des solides piégés (m/s) qui est calculée à partir de l'équation {6-6}; VE_d = puissance des solides décantés par unité de temps ($[N \cdot m/s]/s$).

La puissance des solides décantés par unité de temps, en moyenne par piège, est calculée à partir de la formule ci-dessous:

$$VE_{d, \text{piège}} = \sum_{i=1}^N VE_{\epsilon, \text{piège}} = \sum_{i=1}^N (Q_{si} \cdot \rho_{si} \cdot g \cdot w_{si})_{\text{piège}} \quad \{6-9\}$$

où N est le nombre des classes granulométriques considérées.

Les résultats de calcul pour certains prélèvements sont présentés graphiquement par la figure 6.33-1 et les rapports des puissances figure 6.33-2.

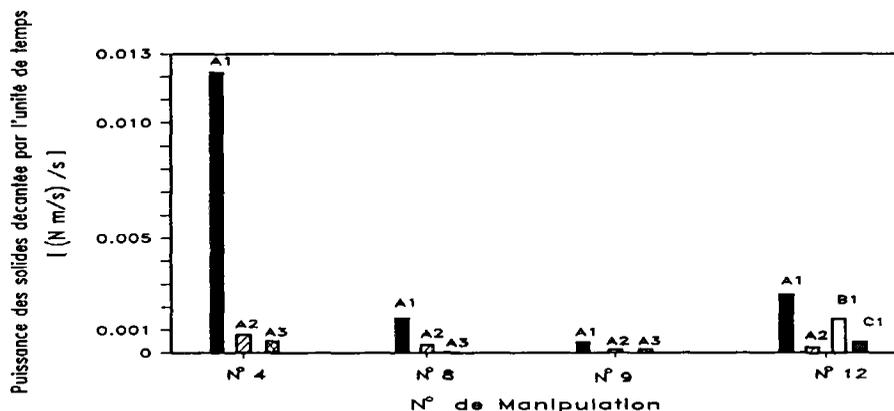


Figure 6.33-1 : Puissances des solides décaantés par unité de temps, en moyenne par piège, pour les prélèvements N°4, N°8, N°9 et N°12.

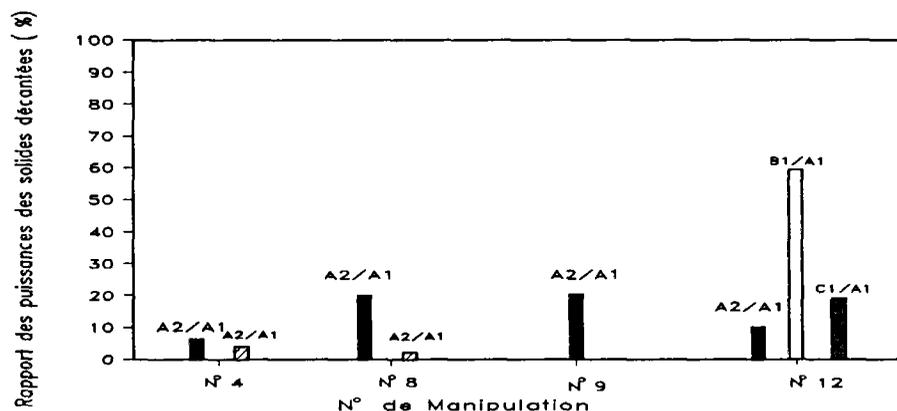


Figure 6.33-2 : Rapport des puissances pour les prélèvements N°4, N°8, N°9 et N°12.

Les résultats ci-dessus permettent de faire les constatations suivantes:

1/ Au même emplacement-A, la puissance des solides décantés par unité de temps dans le piège A1 (le plus en amont) est toujours plus importante. Cette logique est bien suivie pour les pièges installés aux différents endroits (les pièges A1, B1 et C1). Ainsi, l'analyse basée sur la puissance des solides décantés $V E_d$ est claire et plus efficace que l'analyse faite avec uniquement un des trois paramètres (volumes ou débits, diamètres et masses volumiques) des solides piégés.

Comme les pièges à l'emplacement-A ont interceptés tous les solides charriés entrant, les solides charriés arrivant à l'emplacement-B proviennent tous de l'érosion du tronçon entre ces deux emplacements

2/ La puissance des solides décantés dans le piège B1 à l'emplacement-B est de l'ordre de 60% de celle du piège A1. Comme les pièges à l'emplacement-A ont intercepté tous les solides charriés entrant et que tous les solides charriés à l'emplacement-B proviennent de l'érosion du tronçon entre ces deux emplacements, en supposant donc que ces solides érodés et charriés à l'emplacement-B ont les mêmes caractéristiques avec ou sans la mise en fonctionnement des pièges à l'emplacement-A et sont arrêtés par le piège B1 à l'emplacement-B (hypothèse), il apparaît que 40% de la puissance des solides transportés à l'emplacement-A est perdue entre ces deux emplacements. Par l'analyse des débits des solides piégés, nous avons constaté que 20% seulement en volume des solides charriés à l'emplacement-A est déposé dans ce tronçon. Nous découvrons ainsi que les solides déposés entre ce tronçon présente une forte puissance de décantation

3/ La puissance des solides décantés dans le piège C1 est beaucoup plus faible que celle du piège A1 et représente 30% de celle de B1. Appliquant l'hypothèse ci-dessus, ceci signifie que 70% de la puissance des solides transportés à l'emplacement-B sédimente dans le tronçon entre l'emplacement-B et l'emplacement-C, et que moins de 30% de celle-ci est maintenue par l'écoulement jusqu'à la sortie du tronçon amont du collecteur 13. Autrement dit, $(60\% \times 70\%) = 42\%$ de la puissance des solides transportés à l'emplacement-A est déposée dans le tronçon entre l'emplacement-B et l'emplacement-C, et moins de 18% est maintenue par l'écoulement jusqu'à la sortie du tronçon amont.

6.3.4. Conclusion

L'analyse ci-dessus montre que les solides charriés plus en amont du collecteur 13 sont plus décantables. Les quantités des solides déposés entre les emplacements-A et -B sont faibles, mais représentent une forte puissance (voir les équations {6-8} et {6-9} pour son expression). Environ 40% de la puissance des solides transportés à l'emplacement-A est déposée (perdue) entre les emplacements-A et -B, 42% entre

les emplacements -B et -C, et 18% est maintenue par l'écoulement jusqu'à la sortie du tronçon amont. Cette analyse permet de constater que le tronçon amont du collecteur 13 est un véritable réservoir de décantation du charriage.

6.4. Etude du mécanisme de dépôt dans le collecteur 13

6.4.1. Introduction

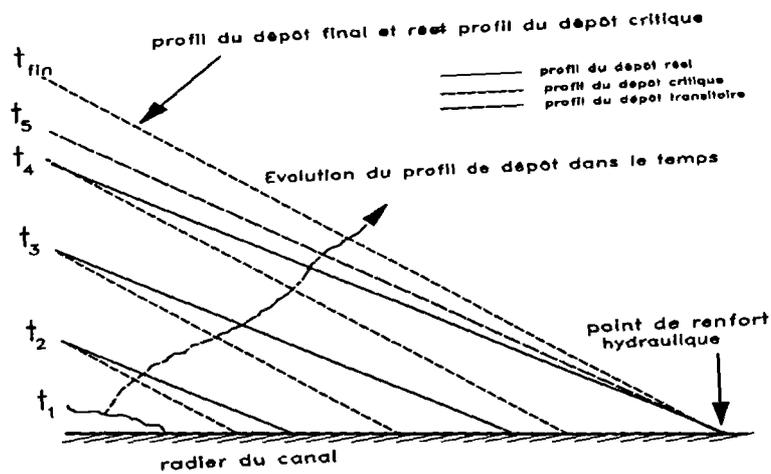
Selon la théorie du transport solide classique (déterministe), les solides transportés par l'écoulement commencent à sédimenter lorsque l'intensité de l'écoulement est inférieure à celle exigée pour les maintenir en mouvement ou lorsque leur quantité dépasse la capacité de transport de l'écoulement. Le premier phénomène est lié à la condition critique de mise en mouvement des particules solides, mais le deuxième est lié à la capacité de transport. Les mécanismes de ces deux phénomènes de dépôt sont complètement différents l'un de l'autre. Aussi est-il nécessaire de les détailler avant de cerner les mécanismes de dépôt dans le collecteur.

6.4.2. Phénomènes de dépôt lié à la condition critique de mise en mouvement

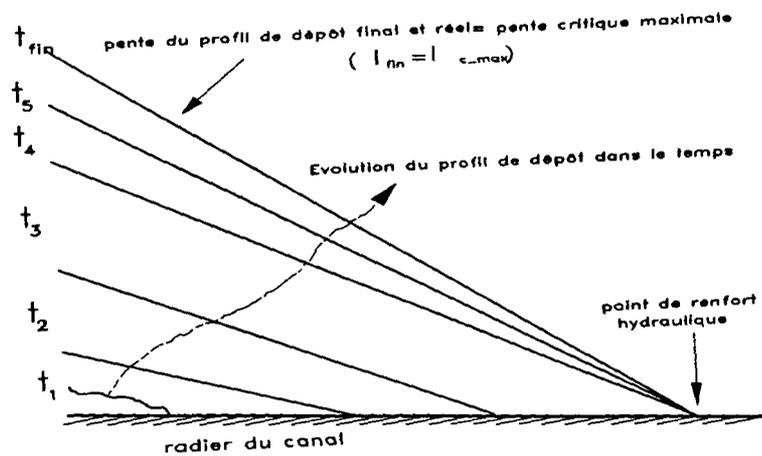
Il est certain que les solides se déposent dès que les conditions de l'écoulement sont inférieures à la condition critique de mise en mouvement. Ceci provoque, en général, lorsqu'elles passent sous ce seuil, un dépôt brutal et local aux endroits où les écoulements ne sont pas suffisants pour transporter les solides provenant de l'amont. Le profil du lit évolue en augmentant sa pente ainsi que la pente d'énergie. La pente critique du lit I_c est obtenue au moment où l'écoulement est capable de maintenir les solides provenant de l'amont. Ensuite, le profil du lit avance vers l'aval avec une pente quasiment constante qui oscille autour de I_c (figure 6.4.2-1.a). Le dépôt est en état pseudo-stable, et l'évolution de son profil peut s'atténuer dans le cas où il y a renfort de l'écoulement à un endroit quelconque en aval du canal.

Il est à noter que, dans ce cas-là, la vitesse de l'évolution du lit dépend fortement de la quantité des solides provenant de l'amont.

Par ailleurs, en cas d'une granulométrie des solides étendue, le phénomène de dépôt est un peu plus compliqué. Dans ce cas, les solides les plus gros se déposent toujours plus tôt (ou plus en amont). L'évolution du lit avance vers l'aval, mais avec une augmentation de sa pente (figure 6.4.2-1.b). Ceci permet à l'écoulement de s'adapter pour transporter des solides de plus en plus gros. L'état pseudo-stable du profil de dépôt final est atteint au moment où l'écoulement arrive à transporter les solides les plus grands. A ce moment, la pente du lit dépend uniquement de la taille de ces solides.



(a) en cas d'une granulométrie des solides quasiment uniforme



(b) en cas d'une granulométrie des solides étendue

Figure 6.4.2-1 : Evolution du profil du lit lorsqu'il s'agit d'un phénomène de dépôt lié à la condition critique de mise en mouvement

6.4.3. Phénomènes de dépôt lié à la condition critique de transport de hors-équilibre

Lorsque l'écoulement amont est trop chargé en particules, c'est-à-dire lorsque la quantité des solides mobiles dépasse la capacité de transport, a lieu un phénomène de dépôt lié à la condition critique de transport hors-équilibre. L'écoulement commence à décharger des solides au fond tout au long de son trajet jusqu'à l'endroit où la quantité des solides transportés est égale à sa capacité. Ceci provoque, en général, un dépôt étalé (figure 6.4.3-1). Ce phénomène apparaît particulièrement dans le cas où les solides transportés en suspension dominent sur la formation du dépôt.

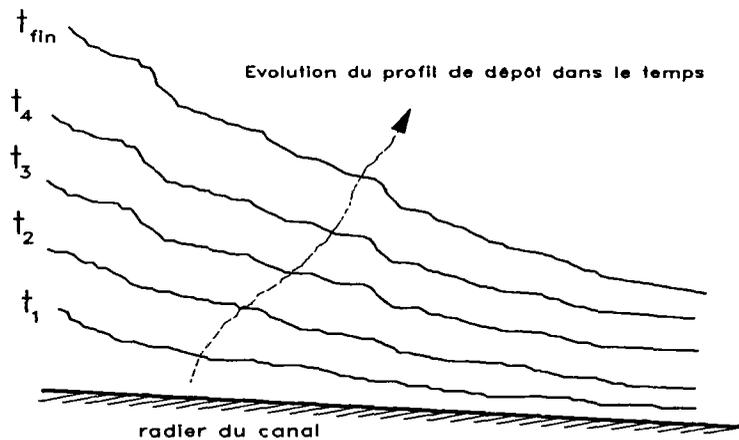


Figure 6.4.3-1 : Evolution de profil du lit lorsqu'il s'agit d'un phénomène de dépôt lié à la condition critique de transport de hors-équilibre

Lors de l'apparition de ce phénomène, l'évolution de profil du lit se fait en augmentant sa pente, ce qui provoque une augmentation de la capacité de transport de l'écoulement. Cette évolution du profil s'atténue au moment où la capacité de transport de l'écoulement est égale à la quantité des solides provenant de l'amont. A partir de ce moment, le transport solide est en état d'équilibre.

En cas d'une granulométrie étendue des solides, bien qu'il soit possible que le phénomène de dépôt provoque une dégradation de l'amont vers l'aval de la taille des solides dans le lit, elle est plus modérée par rapport à celle provoquée par un dépôt lié à la condition critique de mise en mouvement.

6.4.4. Mécanisme de dépôt dans le collecteur 13

Le transport solide en collecteur ainsi que le mécanisme de dépôt sont des phénomènes difficiles à cerner. Le dessin animé de l'évolution du profil de dépôt (*les profils de dépôt ont été réalisés par D. Laplace tous les trois jours*) nous permet de visualiser les phénomènes dans le collecteur 13. L'analyse montre que, pour le tronçon aval, le phénomène de dépôt n'est pratiquement lié qu'à la condition critique de mise en mouvement. Pour le tronçon amont, les deux mécanismes de dépôt, l'un lié à la condition critique de mise en mouvement et l'autre lié à la condition critique de transport de hors-équilibre peuvent être invoqués. Juste après le curage, le transport hors-équilibre domine, mais sur une courte durée, et l'évolution du dépôt se poursuit par la cohabitation des deux mécanismes. Le dépôt lié à la condition critique est dominant dans la partie juste à l'entrée du collecteur, et celui provoqué par le transport hors équilibre est plus important dans l'autre partie.

Pour vérifier notre analyse du dessin animé de l'évolution du profil, nous calculons la pente d'énergie critique de l'écoulement pour la remise en mouvement des particules solides J_c , à partir d'une série de résultats de mesures des granulométries du dépôt. Les formules utilisées sont celle de la courbe de Shields



et celle d'Egiazaroff (voir Annexe A). Pour ce calcul, les valeurs des rayons hydrauliques sont fournies par le modèle hydrodynamique (chapitre 5) et les diamètres moyens ou médians des particules solides sont utilisés. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.4.4-1.

x (m)	d_{50} (mm)	d_m (mm)	$J_{c_Shields}$ avec d_{50} 10^{-3} (m/m)	$J_{c_Shields}$ avec d_m 10^{-3} (m/m)	$J_{c_Egiazaroff}$ 10^{-3} (m/m)
20	8.401	12.781	5.449	8.290	8.283
40	3.081	4.868	1.402	2.586	2.766
61.3	2.370	4.487	0.909	2.138	2.115
81.3	0.898	2.311	0.264	0.828	0.871
92.3	0.551	1.512	0.144	0.435	0.493
102.3	0.435	1.385	0.119	0.385	0.413
Pente moyenne intégrale du tronçon calculée : J_{c_amont}			1.317	2.427	2.483
Pente moyenne du profil de dépôt mesurée : $I_{dép_amont}$			3.159		
132.3	5.603	11.508	2.407	5.162	4.336
162.3	5.703	8.303	2.806	4.240	4.351
182.3	3.509	5.144	1.137	1.899	2.085
232.3	3.760	5.268	1.307	2.053	2.300
262.3	1.993	4.373	0.54	1.547	1.432
342.3	2.913	5.846	0.929	2.361	2.067
Pente moyenne intégrale du tronçon calculée : J_{c_aval}			1.263	2.436	2.382
Pente moyenne du profil de dépôt mesurée : $I_{dép_aval}$			2.474		

Tableau 6.4.4-1 : Comparaison des pentes du profil de dépôt mesurées avec les pentes critiques calculées à partir des formules classiques sur la base des mesures expérimentales (granulométriques et de la ligne d'eau) réalisées le 502^{ième} jour après le dernier curage du collecteur 13

On s'aperçoit alors que les pentes d'énergie critique de l'écoulement J_c (J_{c_amont} et J_{c_aval}) sont très proches de celles de la réalité. En régime d'écoulement fluvial, sa pente énergétique J est toujours inférieure (ou égale en cas d'un écoulement uniforme) à celle du profil de dépôt $I_{dép}$. Ceci est plus important pour le tronçon amont que pour celui aval en raison de l'influence de la jonction qui surélève la côte de la surface libre. En tenant compte de ce phénomène, les pentes réelles du profil de dépôt et celles calculés par les deux méthodes sont identiques (l'application de la méthode de Shields exige l'utilisation du diamètre moyen des solides d_m au lieu de d_{50}). Ceci confirme notre constatation que le phénomène de dépôt est principalement lié à la condition critique de mise en mouvement des particules solides par l'écoulement.

6.5. Stabilité du dépôt dans le collecteur 13

6.5.1. Description

Les résultats de l'observation de l'évolution du profil de dépôt montrent que, sauf à certains endroits particuliers (jonction, virage, etc.) où apparaissent alternativement le phénomène de la sédimentation brutale et celui de l'érosion brutale, le profil de dépôt semble stable (figure 2.2-1) et que son volume (figures 2.3-1 et 2.3-2) progresse continuellement. Nous allons essayer de découvrir pourquoi cette stabilité est présente dans le dépôt du collecteur 13. Une telle étude est nécessaire car elle permet de savoir s'il est possible de créer hydrauliquement une érosion artificielle.

6.5.2. Etude bibliographique des résultats classiques

La méthode traditionnelle pour l'étude de la stabilité du dépôt est souvent basée sur l'étude des conditions critiques pour la remise en mouvement des particules solides. Bien qu'elle puisse aider à découvrir certains mécanismes de transport solide, nous pensons qu'elle n'est pas assez performante lors de la présence d'une granulométrie des solides étendue. Nous préférons utiliser la méthode de Gessler (1970, 1971, 1976) obtenue par le mixage de la théorie probabiliste avec la théorie déterministe.

Selon les résultats d'expériences de laboratoire, Gessler constate que la contrainte de cisaillement se distribue selon la loi de Gauss normale. Ainsi, la probabilité pour une particule solide à la surface du lit de rester immobile (ou coefficient de stabilité) peut s'écrire de la manière suivante :

$$q = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\tau_c}{\bar{\tau}_0} - 1} \exp\left(\frac{\tau^2}{-2\sigma^2}\right) \cdot d\tau \quad \{6-10\}$$

où $\bar{\tau}_0$ est la contrainte du cisaillement moyen dans le temps appliquée par l'écoulement au fond, $\sigma =$ l'écart-type de la distribution de contrainte égal à environ 0.57, $\tau_c =$ la contrainte du cisaillement critique

de l'écoulement pour la remise en mouvement des particules solides. Gessler ignore son caractère aléatoire et propose de la calculer d'après le diagramme de Shields (voir Annexe A). q = la probabilité d'immobilité d'une particule à la surface du lit.

Pour une granulométrie des particules solides à la surface donnée (équation 2) :

$$P_o(d) = \int_{d_{\min}}^d p_o(d) \cdot dd \quad \{6-11\}$$

où $P_0(d)$ est la fonction de distribution de probabilité des tailles des particules solides, et $p_0(d)$ est la densité de cette distribution, d le diamètre. S'il y a érosion, lorsque celle-ci disparaît, c'est-à-dire quand le lit est pavé par des solides qui possèdent une autre distribution granulométrique, cette distribution peut s'écrire de la manière suivante :

$$P_\alpha(d) = \int_{d_{\min}}^d p_\alpha(d) dd = \frac{\int_{d_{\min}}^d q \cdot p_o(d) \cdot dd}{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} q \cdot p_o(d) \cdot dd} \quad \{6-12\}$$

Gessler définit alors une probabilité moyenne \bar{q} qui décrit la stabilité du lit de la manière suivante :

$$\bar{q} = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} q \cdot p_\alpha(d) dd \quad \{6-13\}$$

En reportant l'expression (6-12) dans (6-13), cette dernière devient :

$$\bar{q} = \frac{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} q^2 \cdot p_o(d) \cdot dd}{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} q \cdot p_o(d) \cdot dd} \quad \{6-14\}$$

Gessler affirme que si $\bar{q} > 0.5$, le lit est stable. Si $\bar{q} < 0.5$, une érosion continue peut se produire jusqu'à ce que la stabilité soit atteinte grâce à la diminution de la pente du lit. Mais Chien (1983) conseille de prendre un coefficient de sécurité égal à 1.3, et le coefficient de stabilité critique devient alors $1.3 \times 0.5 = 0.65$. Ceci est confirmé par les mesures de Lane et Cartson (1953).

Little et Mayer (1977) ont étudié les problèmes d'application de la théorie de Gessler. Ils ont confirmé sa validité et constaté que le phénomène de pavage ne peut se produire qu'au cas où l'écart-type géométrique de la granulométrie initiale $\tau_{g.o} > 1.3$. Ils ont proposé des relations empiriques entre la granulométrie initiale des solides à la surface du lit et celle afférente au moment où apparaît le pavage.

$$d_{gp} = 1.74 \tau_{g.o}^{0.58} u_*^2 \quad \{6-15\}$$

$$\frac{\tau_{ga}}{\tau_{go}} = 1.326 - 0.249 \tau_{go} \quad \{6-16\}$$

où d_{gp} est le diamètre moyen géométrique de la couche du pavage. $\tau_{g.o}$ Et $\tau_{g.a}$ sont respectivement l'écart-type géométrique de la granulométrie initiale et celui de la couche de pavage.

Little et Mayer indiquent que si $d_{g.o}/d_{g.a} = 1.0$, soit (1) aucune particule n'est mobile et le lit est complètement stable, soit (2) toutes les particules sont mobiles et une érosion continue peut se produire. L'un de ces deux états peut être justifié par la mobilité des solides qui ont des tailles égales à d_{95} . Les auteurs n'ont rien dit de ce qui se passerait dans le cas où $\tau_{g.o} < 1.3$. Nous pensons que les solides peuvent alors être traités comme des solides de tailles homogènes.

6.5.3. Application des résultats classiques dans notre cas

Nous avons, à notre disposition, plusieurs séries de résultats des mesures des distributions granulométriques du dépôt. A partir de ces données et des résultats classiques, nous allons analyser la stabilité du dépôt dans le collecteur 13.

La figure 6.5.3-1 donne la distribution spatiale et temporelle des stabilités de dépôt dans le collecteur 13, calculées à partir de l'équation {6-14}. Pendant ce calcul, la configuration hydraulique n'est en rien modifiée et tous les paramètres hydrauliques sont calculés à l'aide du modèle hydrodynamique avec le débit maximum de la journée (0.150m³/s pour l'amont et 0.265m³/s pour l'aval, voir figure 1.4-1).

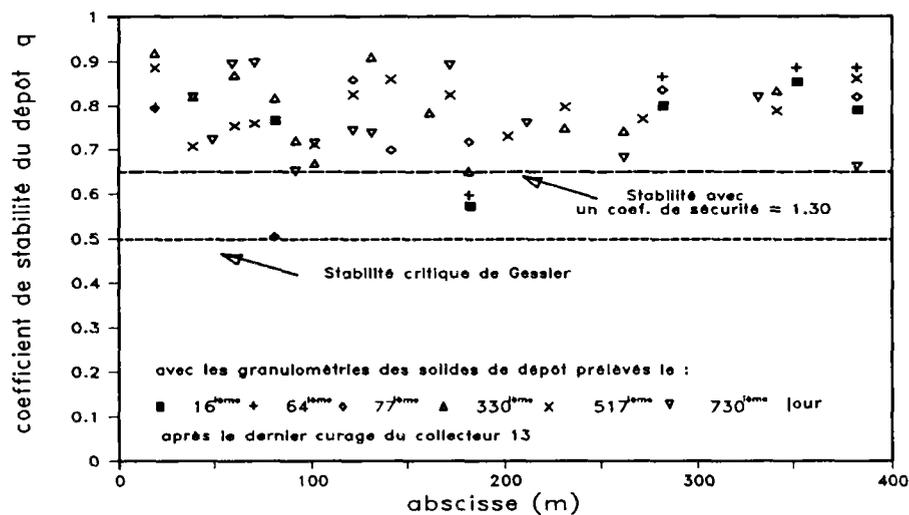


Figure 6.5.3-1 : Stabilité du dépôt dans le collecteur 13 en conditions hydrauliques "normales" et pendant la période des débits maximums d'une journée

Selon ces résultats calculés, on s'aperçoit que les valeurs du coefficient de la stabilité sont toujours supérieures à 0.65. Ceci veut dire que le dépôt est très stable. Bien qu'il soit possible d'avoir une érosion, dans le cas où les apports solides provenant de l'amont sont nuls, elle s'atténue et s'achève rapidement.

Afin de vérifier l'influence des conditions de fonctionnement hydraulique sur cette stabilité du dépôt, nous avons détourné le débit liquide du collecteur Canebière vers l'amont. Le débit liquide dans le tronçon amont en est ainsi renforcé, sa valeur maximum de la journée est égale alors à 0.265 m³/s au lieu de 0.150 m³/s. Sur la figure 6.5.3-2, des exemples de résultats de calcul sont présentés et comparés avec ceux calculés sans détournement des eaux de Canebière. Les résultats ne sont guère modifiés, et bien que les valeurs du coefficient de la stabilité diminuent, elles restent bien supérieures à 0.65. Ainsi, la forte érosion du dépôt dans le tronçon amont que nous avons espérée ne peut apparaître avec le renforcement des apports liquides dans ce tronçon par le détournement des eaux de Canebière.

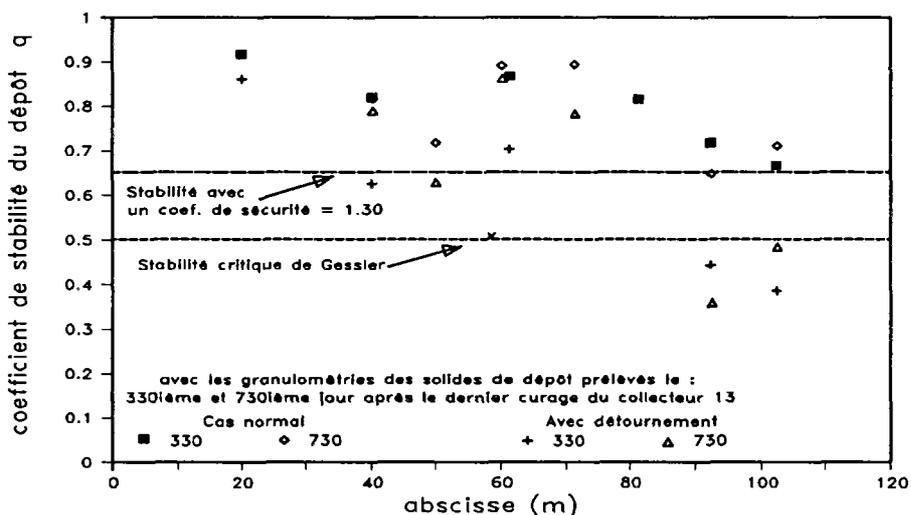


Figure 6.5.3-2 : Stabilité du dépôt dans le collecteur 13 avec le détournement des eaux de Canebière vers l'amont pendant la période des débits maximums d'une journée

Suivant la même idée, nous avons renforcé encore le débit du collecteur 13 par un lâcher d'eau claire. Le débit total est alors de 0.765 m³/s. Les résultats de calcul sont présentés dans la figure 6.5.3-3. Cette configuration hydraulique peut provoquer une certaine érosion entre les points 10 et 14, mais, hors de cette zone, on s'aperçoit que le dépôt est encore stable. Ainsi, une augmentation du débit, spécialement celle de courte durée, ne peut pas avoir de grands effets sur l'érosion ou sur le déplacement du dépôt (tout du moins à partir du 730ième jour).