

Partie II Transport solide

II.1 Généralités

Le transport solide est un élément majeur du fonctionnement des systèmes alluviaux. De ce fait, son étude est devenue essentielle dans de nombreux domaines, de l'étude des processus d'érosion et de sédimentation dans les retenues aux études sur la pollution des cours d'eau.

Le transport solide représente l'entraînement de granulats sous l'action d'un écoulement fluide. Il existe dans différents phénomènes physiques, naturels ou industriels, et constitue un écoulement à surface libre ou en charge. Dans les cours d'eau, il constitue la seconde phase de l'érosion. Il révèle essentiellement du ruissellement et met en jeu diverses formes d'écoulement de l'eau dans la nature (Hug, M., 1975). Le processus entier peut être considéré comme un cycle continu et on le schématise comme suit: érosion → transport solide → sédimentation.

Le transport solide est limité par la quantité de matériaux susceptible d'être transportée. Il est principalement réglé par deux propriétés du cours d'eau:

- ✓ Sa compétence, elle est mesurée par le diamètre maximum des débris rocheux que peut transporter le cours d'eau. Cette caractéristique est essentiellement fonction de la vitesse de l'eau. Les variations de la compétence en fonction de la vitesse et la granulométrie du substrat ont été étudiées par Hjulstrom (figure I.4) ;
- ✓ Sa capacité, c'est la quantité maximale de matériaux solides que peut transporter en un point et à un instant donné le cours d'eau. La capacité est fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section (forme, rugosité, etc...).

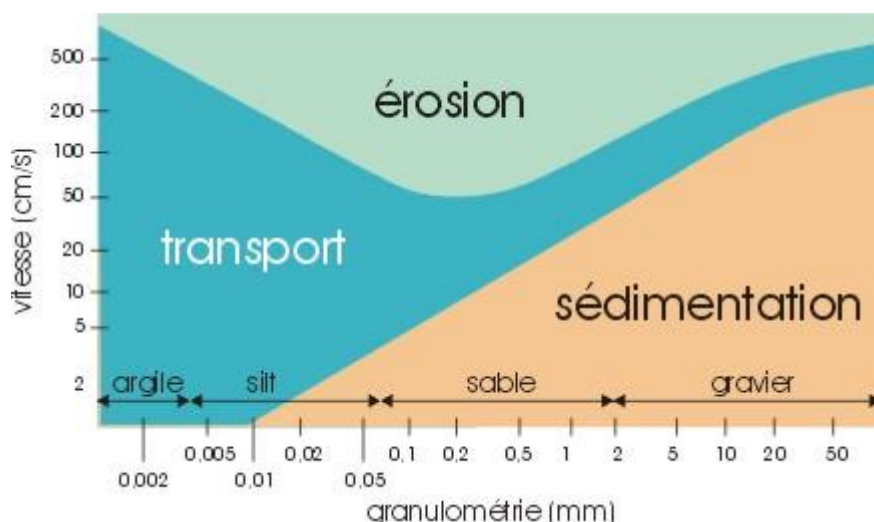


Figure I.4 Diagramme de Hjulstrom (Boulvain, 2004).

Hjulstrom, 1935 a montré qu'il existait trois zones: la zone supérieure d'érosion, passant par un minimum vers 100 μ , la zone inférieure de sédimentation, et entre eux, une zone de transport.

La granulométrie des particules sédimentaires a donc une influence majeure sur leur transport et sur leur vitesse de sédimentation. La figure I.1 qui essentiellement basée sur des expériences en laboratoire montre la vitesse minimale d'un courant nécessaire pour mobiliser, transporter et déposer des grains de quartz de granulométrie variable. L'analyse d'abord de la partie supérieure de la figure (érosion des particules), montre que la portion de la courbe représentant l'érosion des particules moyennes à grossières (sable fin à galets) semble logique: la vitesse du courant nécessaire pour mobiliser des grains augmente avec leur granulométrie. L'érosion démarre pour une vitesse minimum de 25 cm/s lorsque la texture du matériau des berges est d'environ 100 μ . Pour les particules fines, par contre, la courbe montre une augmentation de la vitesse du courant avec la diminution de la granulométrie. Ce comportement paradoxal est la conséquence de la cohésion élevée des particules fines, surtout liée à une électrostatique. La partie inférieure de la figure montre la relation entre la granulométrie des particules et la vitesse du courant lors de leur dépôt.

Les deux propriétés du cours d'eau (compétence et capacité) ne sont pas directement liées. Ainsi, dans un fleuve, la compétence décroît vers l'aval, ce qui n'est pas le cas de la capacité.

Les matériaux alluvionnaires constituant le lit des cours d'eau proviennent de: (Probst, J.L. et al. 1992).

- ✓ L'élaboration des éléments de surface, en général des matériaux meubles du bassin versant. Si l'on ne tient compte que de l'érosion en nappe évaluée au maximum à 20 t/ha/an, cette ablation est de l'ordre de 1,3 mm/an (Chebbani, R. et al., 1999) ;
- ✓ L'érosion des berges du lit des cours d'eau et de leurs affluents. D'après les travaux effectués sur le fleuve du Sénégal, la Garonne et sur des rivières des Etats Unis, ce type d'érosion produit 20 à 30 % du tonnage total des sédiments exportés (Propst, J.L. et al., 1989). Il est évalué à 32 % de la charge totale pour la Haute Tafna en Algérie (Megnounif, A. et al., 2003).

Ces sédiments localisés dans les lits des oueds sont transportés par les crues pour être déposés soit sur des plaines à faible pente, soit dans des cuvettes de barrage ou encore en arrivant jusqu'à la mer.

Le transport des sédiments par les cours d'eau est déterminé par les caractéristiques des particules (taille, forme, concentration, vitesse de chutes et densité des particules). Ce qui permet de distinguer plusieurs modes de transport (figure I.5).

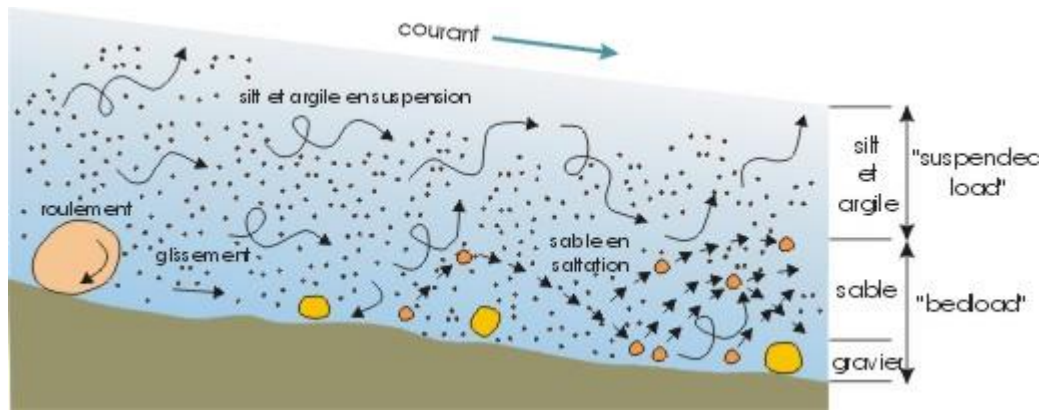


Figure I.5 Modes de transport des particules dans un courant (Boulvain, 2004).

Généralement, deux modes de transport solide sont considérées: le transport solide par charriage et le transport solide en suspension. Les deux modes diffèrent par deux aspects essentiels: dans le premier cas, les particules se déplacent par roulement et glissent sur le fond et leurs vitesses est inférieure à celle de l'écoulement. Dans le deuxième cas, les particules se déplacent au sein de l'écoulement avec une vitesse de mèle ordre de grandeur que celle du fluide. Il n'existe pas de délimitation nette entre ces deux modes de transport. Il y a même des auteurs qui considèrent un troisième mode caractéristique intermédiaire, la saltation, où les particules se déplacent par des bonds, en alternant le charriage et la suspension (Probst, J.L. et al. 1989 et Cardoso, A.H. 1994).

II.1.1 Le transport solide par charriage

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, gravier, galets et blocs), de diamètre supérieur à 01 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau, et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace.

Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement. De ce fait, les évaluations de ce type de transport sont difficiles à mener en l'absence de bases de données. On se contente généralement d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total (Couvert, B. 1994 et al. ; Du voisin, J. 1989). Pour quelques bassins versants, le taux de charriage a été estimé à 12,5 % de la suspension (Djebbi, M. 1990).

II.1.2 Le transport solide en suspension

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), de taille micronique, maintenues en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action les fluctuations turbulentes de l'écoulement. Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval. Dans la très grande partie des cas, la charge en suspension représente quantitativement un pourcentage très important du transport global.

Quelques valeurs indicatives, permettent de délimiter les deux modes de transport. Ces valeurs utilisent le rapport entre vitesse de l'écoulement V sur le lit du cours d'eau, et la vitesse W de chute des particules (Graf, 1971):

- ✓ $\frac{V}{W} > 0,10$: début de transport par charriage ;
- ✓ $\frac{V}{W} > 0,40$: début de transport en suspension.

Le transport en suspension se fait par flottaison et ne comporte que très épisodiquement des retombées des sédiments sur le fond. La turbulence est le facteur principal de la suspension des sédiments (Van Rijn, 1984).

II.2 Lest travaux effectués sur le transport solide

En Algérie, un effort louable a été entrepris depuis les années 1945 pour reforester les têtes de vallées (50,000 ha), les «badlands», fixer les ravines et corriger les oueds, aménager 300,000 ha de terres cultivées en banquettes d'absorption ou de diversion (construites par le service de D.R.S. (défense et restauration des sols) puis par la direction nationale des forêts) (Roose, 1994).

Depuis 1978, la construction de banquettes a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans, et surtout aux difficultés économiques.

La lutte antiérosive a été restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, à la végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages: il ne reste que la R.T.M. (restauration des terrains en montagne) en faveur de la qualité des eaux, des périmètres irrigués et des besoins des citadins des grandes villes (Roose, 1994).

Pour les paysans, les seules actions de l'Etat concernent aujourd'hui l'amélioration foncière (c'est-à-dire, sous-solage des sols à croûte calcaire, qui augmente la productivité des céréales) et la création de petites retenues collinaires, fournissent de l'eau en tête de vallée pour le bétail, l'habitat et quelques hectares d'irrigation. Même cette politique est remise en cause par des hydrologues qui font remarquer que l'envasement des barrages n'a pas diminuée depuis l'effort consenti par l'aménagement des hautes vallées (Roose, 1994).

Parmi les travaux concernant l'érosion et le transport solide effectués en Algérie, on trouve:

1 Medinger (1960)

Il a travaillé sur une trentaine de bassins versants Algériens. Il a procédé aux premières séries de mesures durant la période de 1946 à 1957. Il a donné des estimations des précipitations des écoulements liquides et solides ainsi que les concentrations moyennes et maximales en vue d'établir des expressions entre débits et concentrations instantanées. Les essais initiaux de l'auteur n'avaient pas donné des résultats précis et satisfaisants (Demmak, 1982).

2 Tixeront (1960)

Ses travaux sont basés sur les données de 32 bassins algériens et, 09 tunisiens, dont la superficie varie de 90 à 22300 km². L'auteur a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie. Après avoir regroupé les bassins en trois classes, suivant un critère régional, il a essayé de mettre en évidence le rôle des facteurs suivants: précipitations, écoulement annuel, répartition saisonnière des pluies, le couvert végétal et les facteurs géomorphologiques dans la dégradation du sol.

Il a constaté que:

- ✓ Les teneurs en suspension des trois groupes de bassins augmentent d'une façon générale lorsque le débit liquide diminue ;
- ✓ Le substratum joue un rôle considérable ;
- ✓ Le crétacé inférieur, Jurassique, les terrains primaires, cristallins et cristallophylliens manifestent un taux d'abrasion négligeable ;
- ✓ Les bassins à plus forte abrasion se situent dans les régions sismiquement actives ;
- ✓ La répartition régulière des pluies avec un maximum en saison végétative est favorable aux faibles teneurs ;
- ✓ Une zone de 300 à 700 mm où l'érosion est très active (1200 t/km²/an).

3 Capolini (1965-1969)

L'auteur a entrepris une étude géomorphologique régionale sur le bassin de Cheliff, afin de mettre en clair le processus d'érosion qui conditionne les transports solides des principaux affluents de l'oued Cheliff.

Il a basé son étude sur l'analyse morphométrique des réseaux (densité de drainage, coefficient de torrentialité) mise au point par les géographes Américains Schumm et Horton. L'application a permis de trouver des résultats encourageants sur les bassins du Rhiou et du Fodda. A partir de ces résultats, l'auteur a généralisé la méthode à l'ensemble du bassin de l'oued Cheliff. Les résultats ont permis à Capolini de:

- ✓ Proposer une quantification des débits solides en associant à chaque formation lithologique un débit spécifique ;
- ✓ D'établir une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins et le coefficient de torrentialité ;
- ✓ De suggérer la cartographie des zones susceptibles à l'érosion à partir de la carte du coefficient de torrentialité.
- ✓

4 Sogreah (1969)

L'étude est basée sur les données d'observations recueillies au niveau de 09 barrages et 18 stations hydrométriques, totalisant 282 années stations.

Les auteurs ont tenté de définir l'importance du transport solide dans les oueds algériens en fonction du ruissellement annuel et de la perméabilité du bassin versant c'est-à-dire sur un bassin de nature géomorphologique donné, le transport solide apporté par les crues croît avec le volume ruisselé. Leurs résultats ont été présentés sous forme d'une relation calquée sur la relation de Tixeront.

5 Demmak (1982)

En se basant sur les données observées, durant la période 1972/1979, sur trente bassins versants de l'Algérie du Nord, particulièrement touchée par l'érosion, l'auteur constate que l'agressivité des averses est relativement faible en Afrique du Nord et que son influence sur l'érosion est négligeable. L'érosion en nappes n'apporte qu'une faible part (0,2 à 01 t/ha/an) au transport solide des oueds. Pour lui l'essentiel se passe autour des oueds. Le sapement des berges est une source majeure de sédiments directement mobilisés par les oueds lors des fortes crues. Il confirme l'inaptitude en Algérie des techniques de lutte anti-érosives. Il a démontré que:

- ✓ Le pourcentage de marnes et d'argiles affleurantes ;
- ✓ Le pourcentage des précipitations journalières supérieures à un certain seuil (20 ou 30 mm) ;
- ✓ Le coefficient de torrencialité.

sont déterminants pour le transport solide. Il synthétisa ses travaux par une relation empirique valable pour les bassins de l'Atlas Tellien liant les apports solides spécifiques moyens annuels à des indices lithologiques, pluviométriques et géomorphologiques.

On signale qu'il existe d'autres chercheurs qui ont travaillé sur le transport solide. On peut les citer: Heusch, Lahlou, Arabi, Meddi, Roose, Bourouba, Megnounif, Terfous, Benkhaled et Remini, Bouanani, Achite, Touabia, Khanchoul, Ghenim, Elahcene et al., ...

II.3 Mesures et méthodes d'évaluation du transport solide

Introduction

La quantité de sédiments transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant un temps Δt est composée de la charge en suspension et du transport de fond. L'évaluation de ces derniers est basée sur deux types d'actions:

- La mesure directe du taux d'envasement des barrages ;
- La mesure de la turbidité au droit des stations hydrométriques.

La première méthode est un moyen efficace permettant l'obtention des valeurs globales sur l'importance du transport solide par les oueds barrés, intégrant l'ensemble des phénomènes érosion-transport solide, y compris le charriage de fond. Elle a été utilisée pour mesurer l'envasement de six barrages en Tunisie. Elle présente l'inconvénient majeur qu'elle ne permet pas de connaître la variabilité temporelle du phénomène, puisque elle fournit des valeurs cumulées à partir de relevés fortement espacés (Demark, 1982 ; Meddi, 1992). En Algérie, les mesures faites en 1961 dans les dépôts du Ksob, en 1964 dans les dépôts du Hamiz et Fodda ont mis en évidence une forte variation de la densité dans la zone des dépôts.

Tandis que, la deuxième méthode fait appel à des mesures instantanées et continues, peut-être plus astreignantes à la longue que les opérations de relevé des cuvettes. Elle ne concerne que les transports en suspension. Grâce aux mesures instantanées, elle permet :

- L'étude de la variation temporelle du phénomène ;
- L'analyse de l'influence des facteurs climatiques et morphométriques sur le transport solide en suspension, et l'établissement des abaques ou modèles mathématiques permettant d'évaluer les apports solides annuels.

L'inconvénient de cette méthode réside dans la non-uniformité et l'extrême variabilité temporelle de la concentration des sédiments en suspension dans la section de mesure. Cela est lié à la technique utilisée pour la détermination de la concentration, c'est-à-dire qu'on ne peut pas mesurer la concentration à tous les points de la section du cours d'eau, où la concentration varie.

La question essentielle dans tous les programmes de surveillance du transport solide est de savoir comment peut-on estimer celui-ci à moindre coût, sachant que le bilan exacte des matériaux en suspension transportés demeure inaccessible.

Outre, les erreurs analytiques produites, la majeure source d'erreur dans la mesure de la charge solide d'un cours d'eau est en relation avec la variabilité des concentrations en sédiment à travers le temps et la possibilité du programme d'échantillonnage de caractériser précisément cette variabilité.

II.3.1 Mesure du transport solide

Les matériaux solides sont habituellement classés en deux catégories (Bruk, 1986):

- Les matériaux fins, ayant un diamètre inférieur à 0,062 mm (les matériaux en suspension) ;
- Les matériaux grossiers ayant un diamètre supérieur à 0,062 mm (les matériaux charriés).

II.3.1.1 Mesure du transport solide en suspension

Les matériaux fins sont facilement amenés en suspension par la turbulence de la rivière, et ils circulent à peu près à la même vitesse que l'eau (Benkhalel, 2006). La concentration des matériaux fins dans l'eau dépend de la quantité fournie par le bassin versant, quantité qui est elle-même liée aux précipitations. Cette concentration ne dépend qu'indirectement du débit ou de la capacité de transport du cours d'eau. Puisque la concentration en matériaux fins peut varier énormément avec le temps (des variations dans un rapport de 100 à 1000 sont fréquentes (Benkhalel, 2006)), la plupart des erreurs commises dans l'échantillonnage sont dues à un nombre de mesures insuffisant pour déterminer ces fortes variations.

Le calcul des concentrations en matériaux fins exige normalement le prélèvement d'un mélange d'eau et de matériau, le tri et la pesée des matériaux. La plupart des appareils fonctionnent manuellement. Le fait que les appareils de prélèvement de matériaux en suspension ne récoltent qu'un petit échantillon constitue un inconvénient. La plupart des méthodes traditionnelles de prélèvement est de calcul de la concentration exigent une grande quantité de matériaux, alors que les appareils électroniques récents n'ont besoin que d'un petit échantillon (Benkhalel, 2006).

Des appareils d'enregistrement de la concentration des matériaux fins en continu ou à des intervalles de temps très rapprochés ont été développés. D'autres

instruments d'enregistrement ont été élaborés, dont les principes sont basés sur l'atténuation ou la diffraction de la lumière, le rayonnement nucléaire, ou le bruit (Guy, 1966). Malheureusement, il s'est avéré qu'aucun de ces instruments ne peut être très performants pour des applications spécifiques (Guy, 1978).

Puisque les matériaux sont transportés par des écoulements turbulents, les canaux alluviaux sont instables et les tailles des sédiments peuvent s'étendre des argiles aux rochers, l'échantillonnage de matériaux et les mesures de débit sont sujets à l'erreur de la variabilité temporelle. L'erreur est composée par la variabilité spatiale dans la section transversale de l'écoulement. Les fluctuations rapides du débit liquide et de la concentration ont été résolues par la mesure et le prélèvement fréquents en vue d'améliorer la précision des enregistrements des débits solides.

Le débit liquide de la concentration tend à changer rapidement après la phase de pointe. Les méthodes de mesure qui ont été conçues pour définir le débit solide durant l'écoulement permanent ne peuvent pas être appliquées pour des écoulements instables. Par conséquent, les méthodes doivent être élaborées en fonction de la résolution de temps pendant l'écoulement variant rapidement.

Si le débit liquide change rapidement pendant un écoulement d'averse, la concentration des sédiments en suspension changera aussi en réponse à l'érosion ou au dépôt. Les courbes de concentration souvent ne coïncident pas avec les hydrogrammes de crue, et des changements inattendus peuvent être détectés seulement par le prélèvement fréquent.

Bruk et al. (1981) font remarquer qu'il est important de mesurer simultanément la concentration et la vitesse du courant, afin d'obtenir une bonne corrélation entre la courbe mesurée et la courbe théorique de la concentration.

Des observateurs locaux sont employés pour rassembler des échantillons journaliers de sédiments en suspension aux stations de jaugeage située près de leurs habitations. Les échantillons ainsi rassemblés par ces observateurs sont une méthode commune pour obtenir des concentrations journalières de sédiments.

La méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau algériens est l'échantillonnage uni ponctuel. Un échantillon est prélevé par l'observateur en un point de la section mouillée au niveau de la station hydrométrique (en général soit sur le bord, soit au milieu de la section). L'échantillon constitué d'un mélange (eau+sédiments) est prélevé à l'aide d'un flacon d'une contenance de 500 cl.

Les prélèvements sont plus nombreux en période de crue, alors qu'en étiage ou lorsque le débit liquide est constant au cours de la journée, un seul prélèvement est effectué (Licitri, 1971). La fréquence d'échantillonnage conditionne presque exclusivement la fidélité à la réalité de la courbe de variation du transport solide dans le temps et particulièrement pour la période des hautes eaux.

Cette méthode d'échantillonnage est utilisée au service hydrologique de façon systématique et routinière sur l'ensemble du réseau hydrométrique depuis plus de

trente ans. La base de données utilisée dans cette étude a été constituée à partir de cette méthode.

La méthodologie de mesure adaptée sur le réseau concerne également l'analyse au laboratoire des échantillons prélevés (décantation et siphonage, filtrage, séchage à l'étuve, pesée).

Lors de l'évaluation de la précision relative des données recueillies, cette technique d'acquisition est souvent objet de critique. Touat (1989) a vérifié à partir de jaugeages de transports solides en suspension qu'un échantillon ponctuel prélevé en surface peut conduire à une sous-estimation du transport solide.

Il suggère que le procédé convenable consiste à la prise en considération d'un échantillon corrigé par un coefficient qui sera déterminé sur une quarantaine de jaugeages étalés sur deux ou trois ans. Le coefficient ainsi déterminé sera utilisé pour corriger la valeur des anciens échantillons ponctuels prélevés en appliquant la relation:

$$C = K \cdot C_p \quad (II \cdot 1)$$

Où,

C : la concentration corrigée;

K : le coefficient correctif ;

C_p : la concentration ponctuelle.

Demmak (1982) précise qu'en plus de la non uniformité de la concentration dans la section de mesure, une source d'erreur supplémentaire réside dans le fait que le flacon ne comporte pas de tube d'échappement d'air. La turbulence de l'air qui s'échappe à l'entrée du goulot entraîne une sélection des particules et influe par conséquent sur la représentativité de l'échantillon. Mais, malgré son caractère empirique, cette méthode fournit des résultats et des données exploitables sur de longues périodes, si l'échantillonnage est réalisé avec soin.

Les insuffisances de la méthode de calcul utilisée sont liées essentiellement à:

- La variabilité du phénomène dans le temps ;
- Un seul prélèvement est rarement représentatif de la concentration moyenne dans la section ;
- Les prélèvements sporadiques d'échantillons effectués soit par un observateur, soit par les équipes de mesures durant leurs visites aux stations à des intervalles prédéterminés sont insuffisants et ne correspondent pas aux périodes convenables ;
- Un grand nombre de concentrations faibles et insignifiantes est collecté. Les concentrations élevées n'étant mesurées qu'en de rares occasions.

Diverses méthodologies temporelles de collecte d'échantillons ont été employées dans le monde pour décrire le transport solide en suspension dans les petits cours d'eau.

Bien que les coûts de mettre en application, les différentes méthodologies changent. Celles-ci ont souvent les mêmes buts communs, tels que rechercher les concentrations maximales se produisant dans un cours d'eau où l'estimation de l'apport solide.

La conception de la technique de prélèvement la plus typique est fondée sur la collecte manuelle d'échantillons à période fixe pendant des périodes d'écoulement stable,

complété par plusieurs échantillons prélevés grâce à des échantillonneurs automatiques pendant des écoulements variables.

Les turbidisondes ne sont utilisées qu'à titre expérimental sur des stations relativement bien étudiées (station Sidi Bel Attar sur le Chellif et stations Pont de la Traille et Lakhdaria sur l'Isser).

II.3.1.2 Mesure du transport solide de fond

Les matériaux fins sont facilement maintenus en suspension par la turbulence du cours d'eau alors que les grossiers ont tendance à se déposer au fond.

En fonction de leur granulométrie et de la turbulence du cours d'eau, les matériaux grossiers peuvent être dispersés verticalement d'une façon presque uniforme ou au contraire, se concentrer près du fond.

Les matériaux grossiers les plus petits sont transportés en suspension avec les matériaux fins et constituent avec eux la charge en suspension ou "wash load". Les autres matériaux, et notamment les plus gros, s'avancent par roulement, par glissement ou par saltation, et sont presque continuellement en contact avec le fond. Ces matériaux charriés constituent le débit charrié ou "bed load".

Bien que l'U.S. Geological Survey ait enregistré des valeurs pour le débit charrié qui vont de 01 % du débit solide total sur la rivière Tanana à 35 % du débit solide total sur la rivière East Fork (Emmet, 1980). Linsley et Franzini (1992) affirment que le débit charrié représente généralement entre 05 et 25 % du transport total de matériaux grossiers.

Le lit d'un cours d'eau comporte en général une grande quantité de matériaux grossiers. La vitesse de leur transport est donc déterminée par la capacité de transport du courant et non par la quantité de matériaux, comme c'est le cas pour les matériaux fins. La vitesse du transport des matériaux grossiers est liée au débit, mais, elle tend à varier considérablement dans le temps et selon la section du cours d'eau choisie.

La mesure du débit charrié est extrêmement difficile. Des échantillonneurs sont employés pour le mesurer. Malheureusement, la quantité de matériaux charriés est extrêmement sensible à la vitesse locale du courant, et il est impossible d'installer un appareil dans l'écoulement sans perturber la vitesse du courant près de l'appareil.

D'autres techniques sont employées, telles que les pièges à cailloux (Emmet, 1980), les itinéraires de traceurs (Sayre et Hubbel, 1963; Tool, 1976). Ces méthodes permettent d'obtenir des résultats relativement précis, mais elles nécessitent des prélèvements effectués pendant d'assez longues périodes. Le débit charrié est souvent calculé aussi à l'aide des formules basées sur les propriétés des matériaux solides et sur l'hydraulique des écoulements à surface libre. Le choix de telle ou telle formule est très difficile.

Cependant, avec l'avènement et le développement de l'informatique et de ses moyens de calcul, de grands progrès ont été accomplis. Parmi les équipements de mesures actuellement disponibles, on peut décrire:

- Les nasses constituées d'une poche de grillage montée sur un cadre métallique qui laisse passer les matières en suspension, mais retient les matériaux grossiers ;
- Les pièges constitués de récipients très aplatis de section longitudinale triangulaire dont le bord correspondant au sommet du triangle est dirigé vers l'amont. A l'opposé dans la partie supérieure aval du récipient, une série de petites cloisons inclinées vers l'aval constitue le piège où viennent se prendre les matériaux (sable essentiellement) ;
- Les sondeurs à ultrasons permettent de suivre le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faibles pentes.

Hors les parcelles et des petits bassins versants dont les exutoires peuvent être équipés de pièges ou de fosses à sédiments, la mesure du transport de fond reste imprécise. Les dispositifs communément utilisés perturbent en effet de manière non négligeable le régime du transport de fond.

La plupart des formules ne doivent pas être utilisées en dehors des conditions dans lesquelles elles ont été établies. En général, elles sont établies avec des données expérimentales obtenues en laboratoire et, moins souvent, in situ.

La vérification de ces formules dans les cours d'eau naturels s'avère extrêmement délicate, car il est difficile de mesurer correctement le débit solide in situ. De plus, une évaluation est souvent subjective à cause de la délimitation entre les zones de mode de transport solide.

Pour apprécier la validité des formules, il est intéressant de comparer les résultats avec des mesures directes de débit solide dans la nature.

Le phénomène du transport solide est peu connu à cause des grandes difficultés rencontrées dans la réalisation des mesures directes. Ces difficultés augmentent en fonction des dimensions du matériau de fond, des sédiments transportés, ainsi que du fait qu'ils présentent toujours, une grande variabilité spatio-temporelle et une durée limitée en phase de crue.

II.3.2 Méthodes d'évaluation du transport solide en Algérie

II.3.2.1 En suspension

En vue de la mesure de la turbidité des prélèvements d'échantillons, par des équipements spéciaux, au droit de la station de jaugeage à différentes positions, se font parallèlement au jaugeage de débits au moulinet (figure II.1).

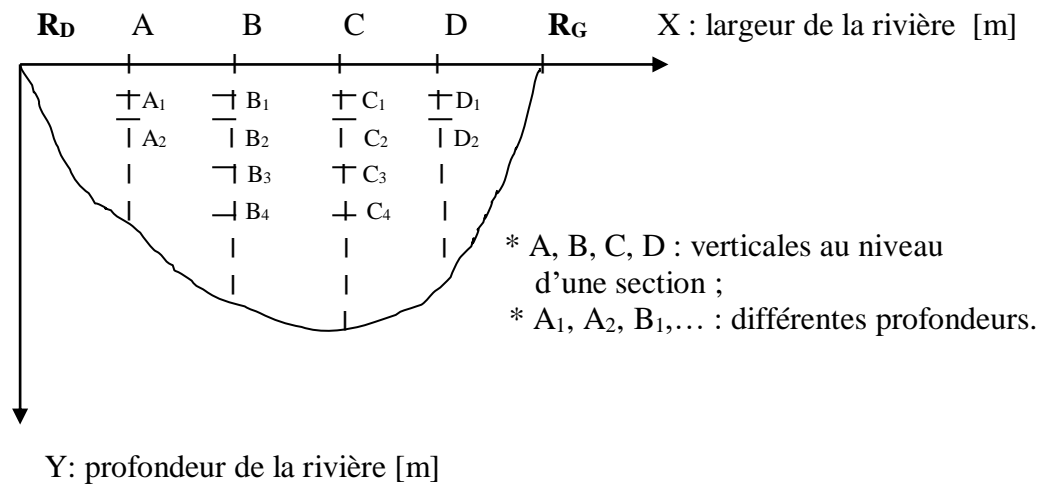


Figure II.1 Répartition des verticales.

Sur un certain nombre de points répartis sur plusieurs verticales A, B, C, D, ... d'une section donnée, on mesure simultanément la vitesse v du courant avec un moulinet et la concentration C en g/m^3 des matériaux en suspension. En rapportant cette section à un système XOY, en abscisse, la largeur de la rivière (rive droite à rive gauche) et, en ordonnée, les profondeurs à partir de la surface de l'eau, n'importe quel point sera identifié.

Sur chaque verticale, on représente le débit solide rapporté à l'unité de surface qu'est le produit de la concentration C par la vitesse de l'eau V mesuré aux différentes profondeurs par des vecteurs horizontaux dirigés dans le sens du courant pour une verticale donnée (figure II.2).

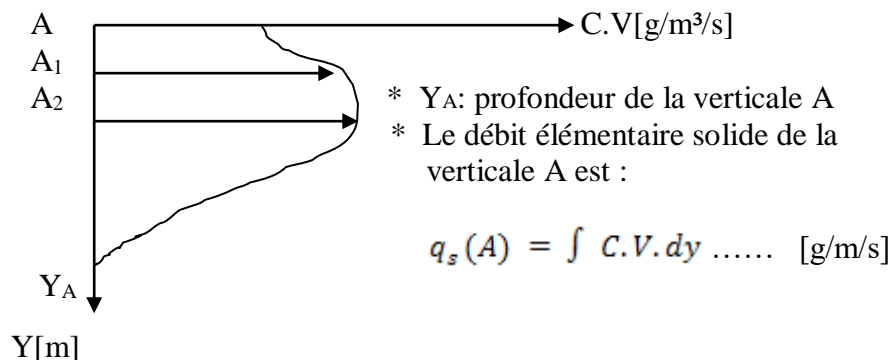


Figure II.2 Epure du débit solide élémentaire.

On détermine graphiquement le débit solide en suspension par unité de largeur de la rivière au droit d'une verticale.

Le débit solide $[kg/s]$ n'est que l'intégration des différents débits élémentaires des différentes verticales représenté sur un système d'axe xoy, où x est la largeur de la rivière et, Y le débit élémentaire q_s , le débit solide total Q_s est planimétré, c'est la surface comprise entre la courbe des débits élémentaires et l'axe x (figure II.3).

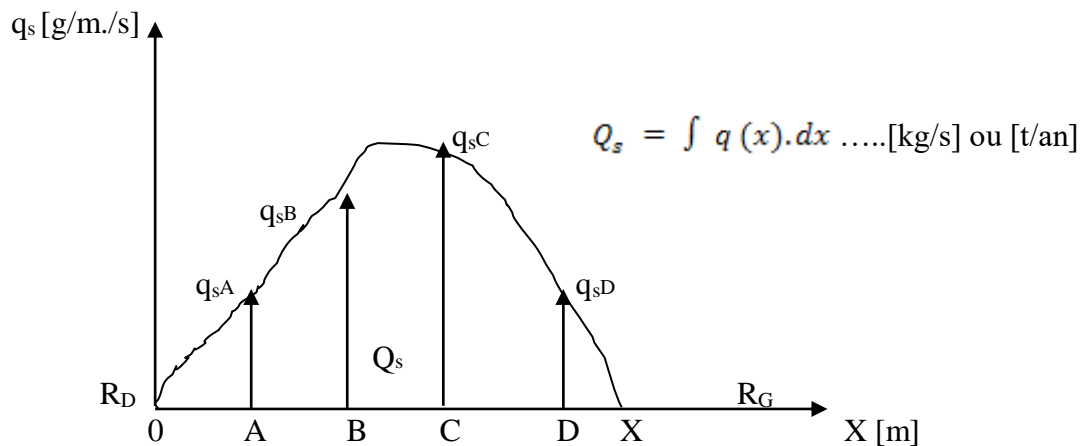


Figure II.3 Epure du débit solide sur toute la section de mesure.

Pour la détermination de la concentration des matériaux en suspension, les prélèvements d'eau sont filtrés sur des filtres pesés au préalable, séchés à 100 °C à l'étuve et, par double pesée, le poids des matériaux en suspension est déterminé et ramené à l'unité de volume [g/m³; g/l; kg/m³], après calcination de la matière organique si elle existe.

Il existe plusieurs appareils de prélèvement d'eau pour la détermination de la concentration du transport solide en suspension entre autres, nous citerons:

- La turbidisonde Neyrpic pour le prélèvement d'échantillon en profondeur ;
- La turbidisonde OTT pour les prélèvements de plusieurs échantillons sur une verticale et qui s'adapte très bien au téléphérique. Seulement, c'est un appareil lourd et coûteux malgré sa bonne précision.

La méthode classique de prélèvement ébauchée plus haut, paraît rigoureuse à première vue mais son emploi est chargé d'inconvénients:

- Manipulation lourde et matériel cher ;
- Temps de mesure très long entre chaque point de prélèvement, il faut remonter le tout, vider ou changer de flacon preneur, ce qui en Algérie, où les crues sont rapides rend rédhibitoire cette technique en ne pouvant pas serrer les mesures dans le temps (particulièrement durant la montée ou la points de crue) ;
- La turbulence des rivières algériennes en crue permet d'émettre une hypothèse plausible sur une distribution homogène des concentrations due au brassage.

Pour surmonter ces limitations, des simplifications furent adoptées dans les cas normaux de mesures quantitatives. On prélève des échantillons à l'aide de bouteilles de 0,5 à 01 litre de capacité.

Les prélèvements doivent être effectués au centre de la section si la rivière est franchissable, mais en aucun cas dans une zone calme ou en surface. La fréquence des prélèvements sera fixée pour chaque station en fonction de la vitesse de montée et de descente des crues liée à la superficie des bassins et à l'intensité des crues.

Pour des raisons techniques, l'échantillonnage se fait en bordure, les valeurs de concentration instantanée, ainsi obtenues, sont utilisées pour l'étude de la variation temporelle du phénomène et la technique reste toujours limitée car elle ne permet pas une mesure intégrale de la concentration en tout point de la section de mesure.

II.3.2.2 De fond

Le charriage de fond est difficilement accessible à des mesures directes in situ sur les cours d'eau à régime torrentiel.

L'efficacité des méthodes de mesure et d'évaluation, citées dans le paragraphe II.1.2, est de plus en plus significative si les prélèvements sont opérés en mode continue sur des périodes assez longues. Par défaut d'une telle organisation, à la fois technique et financière, ces dernières s'avèrent inapplicables en Algérie.

Cependant, des essais de prélèvement ont été effectués à travers quelques oueds en utilisant des techniques simples permettant de donner un ordre de grandeur des volumes charriés recueillis.

On retrouve par exemple:

- Les tranchées creusées dans le lit de l'oued perpendiculairement au courant, reçoivent les matériaux en mouvement. La valeur du charriage sur le fond est déterminée en mesurant la quantité de matériaux recueillis en un temps donné ;
- Méthodes cubatures, très sûre mais qui n'est pas toujours applicable car elle demande un grand travail topographique. On fait un relèvement du fond et on en suit l'évolution en calculant les volumes creusés ou déposés. Les relevés doivent se faire sur une distance en longueur du lit telle qu'aucun élément ne puisse lors d'une crue traverser la section observée et échapper ainsi à la mesure. Ceci est conduit surtout dans les torrents de montagne à des distances de plusieurs kilomètres. Cette méthode doit être complétée par une étude des fonds, de façon à déterminer les parties stables et celles susceptibles d'être mises en mouvement.

Toutefois, en laboratoire, le charriage a fait l'objet de nombreuses études expérimentales, mais face à une d'étude, les formules les mieux adaptées au problème, peuvent être utilisées à l'aide d'estimation de quelques paramètres propres au cas étudié, et déterminer théoriquement le volume de matériaux charriés qui transitera dans une section donnée de la rivière ou se déposera dans une retenue.

Le choix d'une relation appropriée devient encore plus difficile quand on ne dispose pas, comme c'est le cas, de mesure des quantités transportées dans le bassin à étudier.

Plusieurs relations de calcul du charriage ont été vérifiées dans d'autres pays, mais on ne connaît pas assez bien leur performance sur des cas algériens

II.4 Calcul et estimation du transport solide

Introduction

Le calcul du transport solide est le calcul du débit solide. Ce dernier est le volume de matériaux transportés par le courant par unité de temps. Il s'exprime en m^3/s . Il constitue depuis longtemps un défi pour les ingénieurs et chercheurs, qui ont élaboré une panoplie complexe de méthodes et de formules pour faciliter ce travail. De nombreux hydrauliciens ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreuses mesures en modèle réduit ou sur des fleuves. Ces différentes formules donnent rarement des résultats comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes. Il n'y a pas de formule universelle de transport solide. On peut présenter ce calcul par un organigramme. Il est donné comme suit :

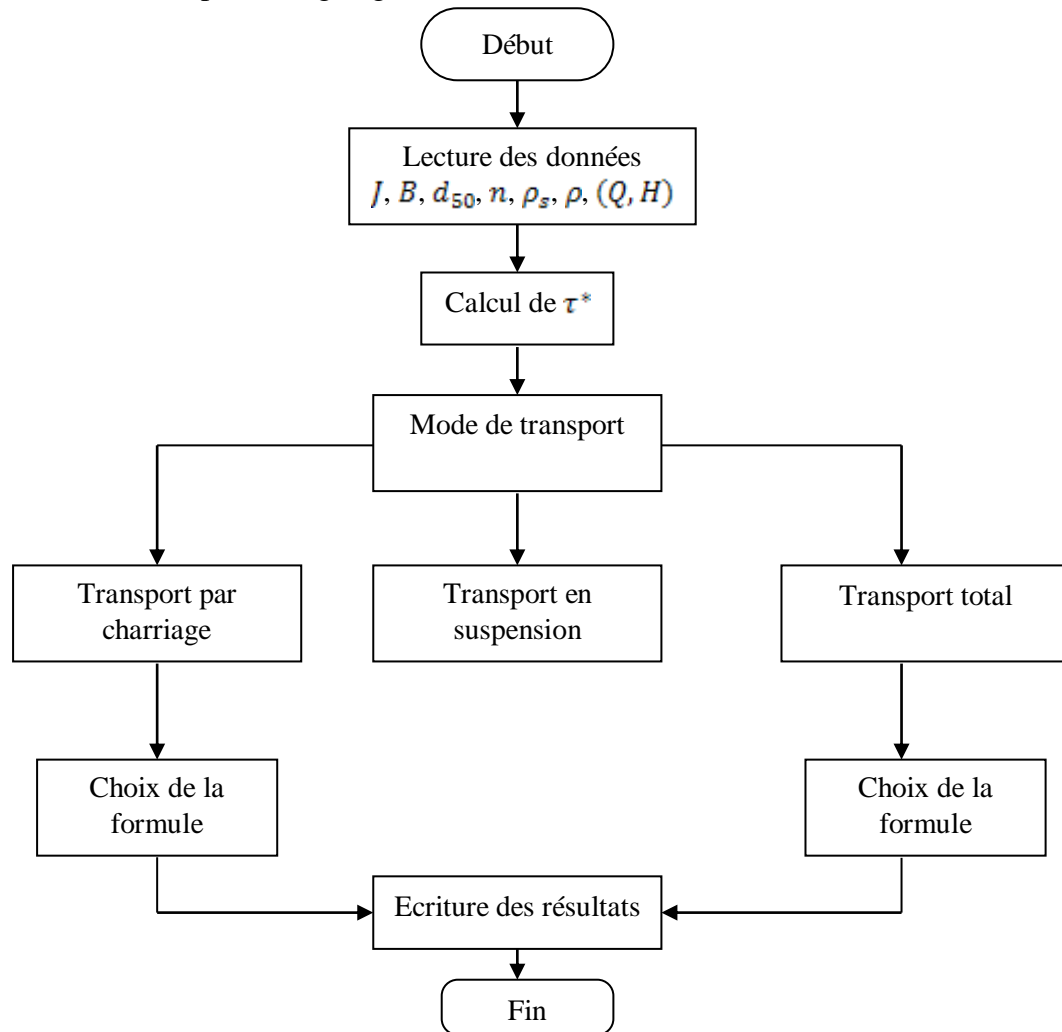


Figure III.1 Organigramme principal du calcul de transport solide.

II.4.1 Calcul du débit solide en suspension

Le calcul du débit solide en suspension est basé sur la mesure du débit liquide de l'écoulement puisque:

$$Q_s = c \cdot Q_l \quad (III \cdot 1)$$

Où,

Q_s : débit solide en suspension [kg/s] ;
 Q_l : débit liquide [m^3/s] ;
 C : concentration ou turbidité [g/l].

Si les sédiments en suspension étaient uniformément distribués dans la section du cours d'eau, un échantillon prélevé à n'importe quel point dans la section donnerait une mesure de la concentration moyenne des sédiments suspendus. Mais, cette concentration connaît une variabilité spatiale et temporelle. En effet, la concentration en sédiments varie le long d'une section de mesure, du fond du cours d'eau vers la surface et d'un instant à l'autre.

La principale difficulté de mesure des concentrations réside donc dans le prélèvement d'un échantillon qui représente fidèlement l'écoulement; d'où le caractère approché de cette méthode.

L'évaluation des apports solides journaliers, mensuels et annuels des cours d'eau algériens est effectuée par les services de l'agence nationale des ressources hydriques (l'A.N.R.H.) de la même manière que pour les apports liquides sur la base d'un dépouillement des enregistrements limnigraphiques. Pour une station hydrométrique donnée, on sélectionne les journées de crues pour lesquelles un nombre suffisant et représentatif de prélèvements a été effectué permettant une bonne reconstitution du turbidigramme.

Un organigramme de la méthode de calcul d'un débit solide (Demmak, 1982) est donné comme suit (figure III.2):

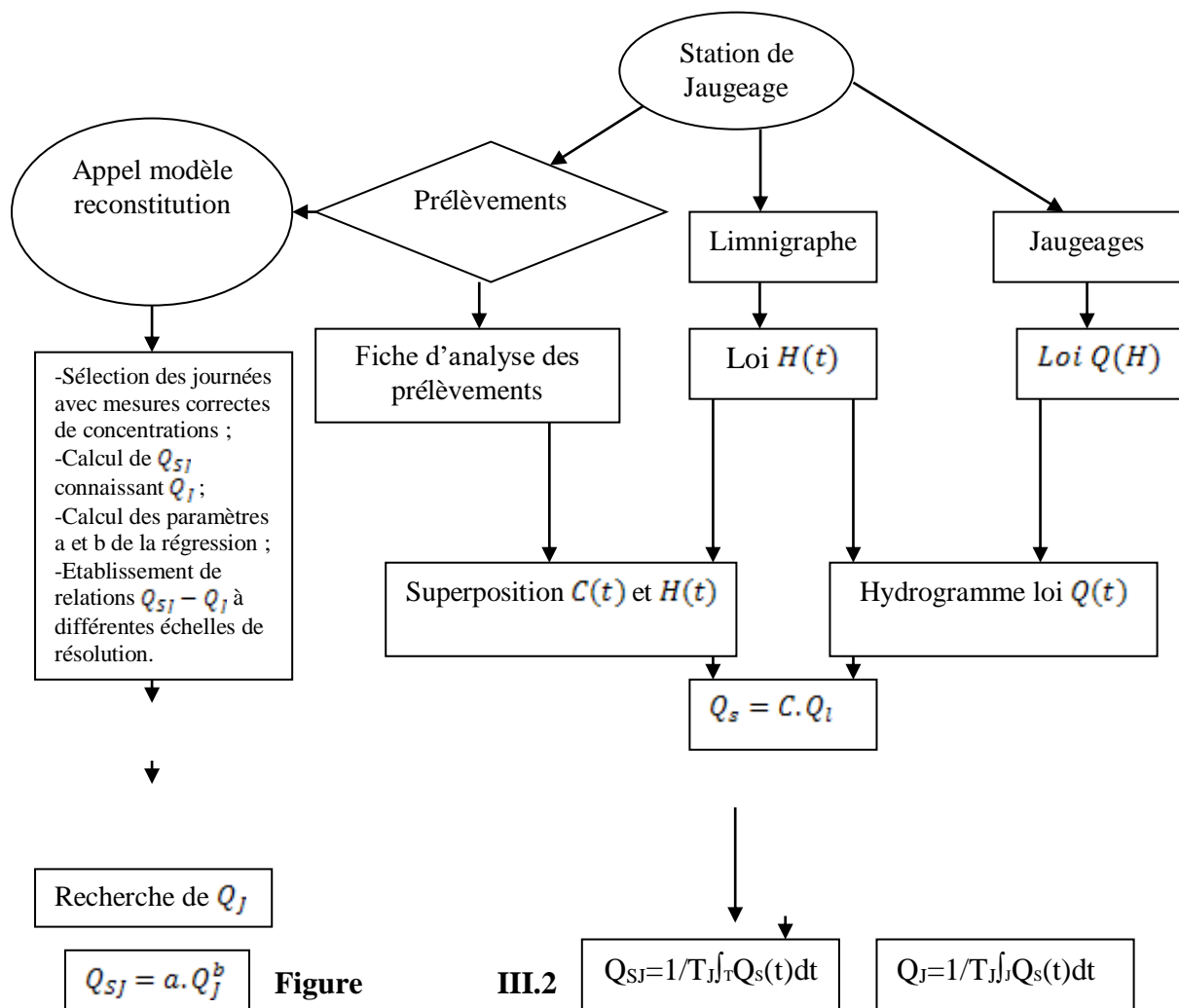


Figure III.2 Organigramme de

calcul d'un débit solide moyen journalier (Demmak, 1982).

Cette méthode opérationnelle, bien qu'automatisée s'avère insuffisante et limitée en raison du caractère aléatoire du phénomène, du système de collecte d'échantillons qui raréfie le prélèvement des concentrations élevées et enfin des lacunes inévitables au sein des séries d'observations.

L'équation III.1 est traduite par une relation curviligne entre les mesures du débit liquide et le débit solide. Elle est dérivée sur papier logarithmique. La relation est ainsi appliquée aux débits liquides pendant des périodes où le débit solide ne peut pas être calculé directement.

III.4.2 ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

Si les enregistrements du débit liquide et de la concentration des sédiments en suspension sont continus à la fois, l'estimation de la charge annuelle du transport solide d'un cours d'eau sera assez simple. Malheureusement, l'enregistrement continu n'est pas disponible d'où on utilise des méthodes indirectes.

Il existe deux approches d'estimation. L'une est le produit du débit annuel avec la concentration moyenne (équation III.1), l'autre utilise la courbe du transport

solide (Fergusson, 1987; Gordova et Gonzalez, 1997). La première a montré qu'elle conduisait à des erreurs sérieuses lorsque les conditions d'écoulement varient dans une large proportion et l'échantillonnage est non intensif tandis que la deuxième est par conséquent la plus largement utilisée.

Les concentrations en MES (matières en suspension) sont corrélées aux débits liquides journaliers par une équation de type (Wood, 1977; Walling et Webb, 1981; Etchanchu et Brobst, 1986):

$$C = a \cdot Q^b \quad (III \cdot 2)$$

Où,

C : concentration en MES [g/l];

Q : débit moyen journalier [m³/s] ;

a et b : coefficients empiriques (paramètres propres au bassin versant considéré).

La relation (III.1) ou (III.2) peut servir de base pour:

- Le comblement des lacunes d'observation et par suite, l'évaluation des apports solides à différents pas de temps ;
- L'amélioration des paramètres statistiques des séries courtes de débits solides par corrélation avec les séries longues de débits ;
- L'analyse du phénomène du transport solide.

La formule (III.2), communément appelée courbe du transport solide (Campbell et al., 1940; Crawford, 1991) peut s'écrire sous une autre forme en liant le débit solide au débit liquide. Elle est comme suit:

$$Q_s = a \cdot Q^b \quad (III \cdot 3)$$

Où,

a et b sont estimés par régression linéaire des variables transformées en logarithme et, le débit liquide est considéré comme variable indépendante (Phillips et al., 1999; Asselman, 2000) selon l'équation:

$$\log Q_s = \log a + b \cdot \log Q \quad (III \cdot 4)$$

L'équation (III.4) suppose qu'une transformation en coordonnées logarithmiques des données de débit et de concentration est exigée avant toute éventuelle analyse. Bien que l'exactitude de cette approche ait été remise en cause (Walling, 1977), son application semble être appropriée pour plusieurs objectifs (Campbell et Bauder, 1940; Miller, 1951; Colby, 1956; Glysson, 1987; Crawford, 1991). L'équation a une longue histoire du développement et d'utilisation due à sa facilité relative d'application et de flexibilité.

La formule (III.3) a été écrite de différentes manières, bien que simple en théorie. Elle pose en réalité de nombreux problèmes au niveau de l'évaluation critique des données d'entrée et l'appréciation de ses limites d'application. Par exemple, concernant les débits liquides, il peut s'agir soit des données instantanées, soit des débits moyens journaliers, mais beaucoup de chercheurs ont utilisé des débits moyens mensuels ou annuels aussi bien pour le débit liquide que pour la charge solide (White, 1986). Une courbe de transport solide élaborée à partir de données instantanées est théoriquement inapplicable au calcul direct des débits solides à partir de débits journaliers sauf pour les journées où les débits sont restés constants.

Fergusson (1986) a démontré que cette équation sous-estimait le débit solide jusqu'à 50% et a proposé un facteur correctif basé sur des considérations statistiques.

Plusieurs auteurs (Walling et Webb, 1988; Asselman, 2000) en comparant les données observées et prévues de concentration dans le nuage de points autour de la droite de régression aussi bien sur l'échelle arithmétique que sur l'échelle logarithmique ont trouvé que les courbes de transport solide peuvent sous estimer substantiellement les concentrations réelles. Plusieurs méthodes ont été appliquées pour compenser cette estimation arbitraire (Cohn, 1995). Ces méthodes incluent la séparation du nuage de points en groupes de données saisonniers par exemple sur le tracé log-log, le développement de divers facteurs de correction, ou l'emploi d'équations de régression non linéaire (Duan, 1983; Fergusson, 1986; Walling et Webb, 1988; De Vries et Klavers, 1994; Phillips et al., 1999; Asselman, 2000).

Dans le cas de la division du nuage de points en plusieurs groupes de points, chaque groupe peut être alors représenté par une relation séparée qui a généralement un coefficient de corrélation plus élevée que la courbe de transport solide initiale calculée sur l'ensemble des points.

La courbe d'estimation est simple, et, en incluant des variables additionnelles de régression (Cohn et al., 1992), peut être facilement modifiée pour expliquer la variabilité associée à la dépendance non linéaire de l'écoulement.

II.4.2.1 Le Concept de la charge solide

Le concept de base de la charge solide d'un cours d'eau est trompeusement simple. La charge solide est la masse ou le poids de sédiments qui passe une section transversale du cours d'eau durant une période de temps donnée. Les charges sont exprimées en unités de masse (par exemple, tonnes, kilogrammes,...), mais l'intervalle de temps durant lequel la charge se produit est toujours implicite et devrait être claire dans le contexte. Un concept relatif est celui du débit liquide qui est le volume d'eau qui passe une section transversale du cours d'eau dans une quantité de temps donnée (Benkhaled, 2006).

Les flux pendant les événements d'averses et de fusion nivale sont souvent de plusieurs ordres de grandeur plus grands que ceux pendant les périodes de basses eaux. Il n'est pas rare de trouver que 80 à 90 % ou plus de la charge solide annuelle est atteinte durant les 10% du temps, avec des flux les plus élevés (Richards, 2001). Par conséquent, on imagine difficilement que prélever un échantillon pendant ces périodes est critiquable, si une évaluation précise de charge doit être obtenue.

Plusieurs aspects du problème de l'estimation de la charge solide en suspension sont liés au type de résolution temporelle des données. La qualité de l'estimation de la charge diminue à mesure que la résolution du temps des données devient plus faible. La variabilité des données est généralement beaucoup plus grande pour des résolutions fortes (journalière ou instantanée). Les échelles temporelles faibles (par exemple, mensuelles ou saisonnières) peuvent constituer des contributions à l'erreur de l'estimation de la charge de sédiments (Benkhaled, 2006).

Les séries mensuelles, sous-estimeraient les charges de sédiments dans le cas où elles n'incluent aucune observation sur les averses et précisément les pics.

Il est clair de ce qui précède que beaucoup d'échantillons seront nécessaires pour obtenir de manière précise et fiable la charge solide réelle. La fréquence des prélèvements a donc créé le problème de base de l'estimation de la charge en suspension.

Les mesures de concentration en Algérie ne sont pas coûteuses si l'on considère l'échantillonnage uni ponctuel. Elle se fait en parallèle avec le transport salin. L'obtention des mesures de concentration implique habituellement de prendre des échantillons d'eau à un laboratoire pour l'analyse chimique. De telles mesures peuvent être faites avec la même fréquence que des mesures de débit, et sont peu coûteuses en regard de l'investissement initial dans l'équipement.

II.4.2.2 Conditions d'une approche pratique pour l'estimation de la charge solide

La littérature sur l'estimation du transport solide contient un certain nombre de publications rapportant d'intéressantes études dans lesquelles les détails du transport solide dans un cours d'eau ont été soigneusement établis et résolus sous forme d'un modèle très précis d'estimation du débit solide pour ce cours d'eau.

D'autres articles décrivent les procédures élaborées de prélèvement ainsi que des aspects problématiques du transport solide dans les cours d'eau. Tandis que de telles études sont les contributions valables à notre connaissance d'estimation de la charge solide en suspension, elles sont souvent difficiles et chères à mettre en application, et exigent parfois l'évaluation et la modification continues afin de fournir des résultats corrects et précis.

D'une façon générale, l'approche de l'estimation de la charge solide en suspension doit être aussi précise et exacte pour le nombre d'échantillons prélevés c'est-à-dire aussi efficace que possible. Walling et Webb (1981) ont montré dans une étude de simulation que le produit du débit annuel et de la concentration moyenne était fortement décentré mais assez précis, et ont souligné qu'il pourrait être utile pour des études de tendance, malgré la déviation systématique.

II.4.2.3 Méthodes d'estimation des charges solides

Plusieurs approches ont été utilisées pour calculer des charges solides à partir des données observées de concentration et de débit. Certaines sont plus précises que d'autres; certaines sont seulement appropriées sous des conditions spéciales. Cette brève revue est destinée à indiquer la diversité des approches qui sont employées. Parmi les méthodes, on cite:

a Méthode numérique

L'approche la plus simple est l'intégration numérique directe. La charge totale est donnée par:

$$Charge = \sum_{i=1}^n C_i Q_i t_i \quad (III \cdot 5)$$

Où,

C_i est la concentration du nième échantillon; Q_i est le débit correspondant; et t_i est l'intervalles de temps représenté par le nième échantillon, donné par $t_{i+1} - t_{i-1}$. Il n'est pas exigé que t_i soit le même pour chaque échantillon.

L'intégration numérique est seulement satisfaite si la fréquence de prélèvement est élevée (souvent de l'ordre de 100 échantillons par an ou plus), telle que la majorité des évènements d'écoulement sont bel et bien prélevés. Roman-Mas et al. (1994) ont suggéré qu'une fréquence suffisante de prélèvement pour obtenir 20 échantillons pour un hydrogramme typique de ruissellement ait été nécessaire afin d'obtenir des estimations de charge avec une erreur inférieure à 05 %. Yaksich et Verhoff (1983) suggèrent 12 échantillons sur l'hydrogramme.

b Méthode de "moyenne"

L'approche la plus simple de multiplier la concentration moyenne pour une certaine période par le débit moyen journalier pour chaque jour dans la période de temps afin d'obtenir une succession de charges journalières (unitaires) estimées.

Une autre approche implique de multiplier la concentration observée moyenne par le débit moyen basé sur tous les jours de l'année pour obtenir une charge "moyenne" journalière, qui est alors convertie en charge totale. D'autres variantes sont la concentration moyenne mensuelle fois le débit moyen pour le mois considéré, la concentration moyenne saisonnière fois le débit moyen saisonnier, etc... Plusieurs de ces approches sont décrites et évaluées par Dolan et al. (1981) et Walling et Webb (1981).

D'une façon générale, cette approche tend à être biaisée si la concentration est corrélée avec le débit: la charge calculée est trop petite si la corrélation est positive et trop élevée si la corrélation est négative. Cependant, quelques techniques de cette approche ont montré la précision relativement élevée dans quelques études, et pourraient être utiles dans des situations spéciales, par exemple si le but est de détecter une variation de la charge, et détecter la variation est parfois plus important que la connaissance de la grandeur réelle de la charge.

c Méthode d'intervalle de débit

Cette technique est semi-graphique (Yaksich et Verhoff, 1983). Elle commence par le report sur un graphique des flux instantanés observés dans l'année en fonction des débits instantanés. Le graphique est divisé en plusieurs intervalles de taille uniforme couvrant la gamme des débits moyens journaliers pour tous les jours de l'année. Pour chaque intervalle, le flux moyen est calculé et le nombre de jours avec des débits moyens journaliers dans l'intervalle est déterminé. La charge d'intervalle est calculée comme produit du flux moyen, du nombre de jours dans l'intervalle, et du facteur approprié de conversion d'unités. La charge annuelle est calculée en additionnant les charges d'intervalle.

d Méthode de régression

Elle développe une relation entre la concentration et le débit basé sur les échantillons prélevés, puis emploie la relation pour estimer une concentration représentative durant les jours où il n'y a pas eu de prélèvements. L'estimation s'effectue en utilisant le débit moyen journalier comme entrée dans l'équation de régression. Des

relations multivariées de régression ont été développées dans certaines études. La relation est parfois développée en utilisant le flux et le débit plutôt que la concentration et le débit, mais les résultats sont identiques (White, 1986).

La plupart des estimateurs de régression sont basés sur un modèle de régression linéaire, bien que ceci soit souvent appliqué après transformation. La transformation logarithmique est fréquemment employée, parce que beaucoup de paramètres environnementaux ont approximativement une distribution log-normale. Les relations de régression entre la concentration ou le flux et le débit après transformation log s'appellent souvent les courbes d'étalonnage ou courbe de transport solide dans la littérature spécifique.

Un problème généralement rencontré avec les estimateurs de régression est ce qui est communément appelé la retransformation de la déviation systématique ou biais, qui peut mener à de grandes erreurs dans les charges estimées. Fergusson (1986, 1987) et Koch et Smillie (1986) ont discuté de ce problème et ont développé des solutions à ce type de problème. Des chercheurs de l'U.S. Geological Survey ont développé les techniques de retransformation qui sont en grande partie indépendantes du biais.

On signale que la méthode de régression est la plus utilisée et qui est recommandées à l'usage des hydrologues et statisticiens d'où on la détailler plus dans le III.2.5.

e Echantillonnage proportionnel au débit

C'est une approche totalement différente, mécanique plutôt que mathématique, qui suppose essentiellement qu'on peut obtenir un ou plusieurs échantillons couvrant la période entière considérée. Chaque échantillon représentant un débit connu avec une concentration proportionnelle à la charge qui a transité par le point de prélèvement pendant le remplissage de l'échantillon. Si cette hypothèse est rencontrée, la charge pour chaque échantillon est facilement calculée comme étant le débit fois la concentration, et la charge totale pendant l'année est obtenue par addition. En principe, c'est une méthode très efficace et rentable pour obtenir une charge totale.

II.4.3 Performances des méthodes

Certaines méthodes d'estimation des charges solides en suspension fournissent une mesure de l'incertitude de l'estimation de charge. En outre, les évaluations d'incertitude de différentes méthodes de calcul de charge ne peuvent pas être directement comparées, parce qu'elles reflètent différents genres d'"erreurs". Si on s'intéresse à la charge annuelle pendant cette année, on ne considérera pas ceci comme étant une source d'erreur, mais plutôt une partie de la variation normale du système que nous étudions. Il est préférable de confiner la notion d'erreur à la différence entre les charges moyennes journalières estimées et les charges réelles moyennes journalières (inconnues), une différence qui est due seulement au prélèvement et à l'erreur analytique.

Pour ces raisons, les mesures d'incertitude ne fournissent pas le moyen fiable de choisir entre les méthodes. En conséquence, l'évaluation des méthodes d'estimation de charge doit se fonder sur des études comparatives dans lesquelles plusieurs méthodes sont employées pour calculer les charges à partir des mêmes données, et les résultats sont comparés à la charge "vraie" qui est indépendamment connue.

Il y a des avantages et des inconvénients à chaque méthode, et plusieurs études des approches d'estimation des charge ont été publiées (Dickenson, 1981; Dolan et al., 1981; Richards et Holloway, 1987; Walling, 1978; Walling et Webb, 1988; Young et al., 1988; Preston et al., 1989, 1992; Burn, 1990; Kao, 2001; Horowitz, 2002).

Plusieurs points de consensus émergent de ces études:

- ✓ La précision et l'exactitude augmentent avec l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage ;
- ✓ Les méthodes de moyenne sont généralement décentrées, et le biais augmente à mesure que la taille de la moyenne augmente. Par exemple, une charge mensuelle peut être calculée en multipliant la concentration moyenne pour le mois par le débit du mois, et une charge saisonnière peut être pareillement dérivée en utilisant le débit saisonnier et la concentration moyenne. En général, la charge annuelle qui est la somme des quatre charges saisonnières sera plus décentrée que la charge annuelle qui est la somme des 12 charges mensuelles ;
- ✓ Dans la plupart des études, l'approche de régression est plus performante que l'approche par moyenne ;
- ✓ Les approches de régression sont performantes si la relation entre le débit et la concentration est suffisamment bien définie, linéaire dans toute la gamme des débits, et constante tout au long de l'année. Cependant, l'approche de régression peut mener à de grandes erreurs dans les charges estimées si les données disponibles contiennent les observations peu communes qui tombent loin de la tendance du reste des données, particulièrement si ceux-ci sont associés aux débits élevés.

II.4.4 La méthode de régression

II.4.4.1 Description générale

La relation de régression est développée entre la concentration et le débit, basée sur les jours où des échantillons sont obtenus. Cette relation peut impliquer la régression simple ou multiple, et la concentration ou le flux peuvent être employée comme variable dépendante. Dans la plupart des applications, la concentration (ou le flux) et le débit sont transformés en log pour créer un ensemble de données mieux approprié à l'analyse de régression. La relation de régression peut être basée entièrement sur les échantillons de l'année en cours ou sur des échantillons recueillis durant les années précédentes ou les deux à la fois. Le temps peut être employé comme variable pour expliquer des tendances linéaires possibles.

Une fois le rapport de régression est établi, il est employé pour estimer des concentrations pour chaque jour où un échantillon n'a pas été pris. La charge totale est calculée par addition des charges journalières, obtenue en multipliant la concentration mesurée ou estimée par le débit.

II.4.4.2 Hypothèses

Les approches de régression supposent seulement qu'il y a une relation linéaire entre une variable dépendante, concentration ou flux, et une ou plusieurs variables

indépendantes, typiquement le débit. La concentration, le flux, et le débit sont souvent transformés en log, en utilisant les logarithmes naturels ou les log à base 10, pour créer une relation plus linéaire et/ou pour réduire l'influence des concentrations les plus élevées.

Quand les transformations log sont appliquées, la transformation inverse (élévation à une puissance) est exigée pour obtenir des concentrations estimées, puisque le modèle de régression rapporte des estimations de concentration logarithmique, et non la concentration elle-même. Cette transformation crée une déviation systématique (biais) dans les charges, et d'autres suppositions doivent être faites et validées au sujet de la distribution des résidus des concentrations estimées afin de corriger la déviation.

II.4.4.3 Méthodologie d'échantillonnage

Le but de l'échantillonnage est de caractériser minutieusement la relation entre le débit et la concentration (ou le flux). Cependant, il est difficile de traduire ceci en rapport statistique qui peut être employé pour calculer le nombre d'échantillons exigés. Cohn et al., (1992) ont utilisé 75 échantillons pour établir leurs modèles de régression. Ils recommandent que les échantillons soient prélevés sur une période de deux ans, environ la moitié de ces échantillons rassemblés pendant les périodes de hautes eaux, et l'autre moitié sélectionnée au hasard ou en intervalle fixe entre les échantillons.

Puisque le but de l'échantillonnage est de caractériser de manière approfondie la relation entre le débit et la concentration ou le flux, le programme devrait être conçu pour obtenir des échantillons sur la gamme entière des débits prévus. Si les différences saisonnières dans le rapport de débit /concentration sont possibles, la gamme entière des débits devrait être échantillonnée dans chaque saison.

La relation concentration-débit dans un événement averse-crue est d'habitude beaucoup plus homogène que celle dans différents événements averses-crues. Pour cette raison, il est important d'éviter d'échantillonner une ou deux averses dans le détail, plutôt que de prélever beaucoup d'averses avec peu d'échantillons par averse.

L'estimation de la charge solide en suspension par la méthode de régression a été toujours faite sans calculs stratifiés. Cependant, Walling et Webb (1981) ont démontré qu'on pouvait réduire le biais et augmenter la précision, en augmentant le nombre d'échantillons en période de hautes eaux et en calculant les relations de régressions séparément pour l'hiver et l'été, les hautes eaux et les basses eaux.

II.4.4.4 Méthode d'estimation de la charge

Le nombre désiré d'observations de concentration instantanée et de débit est en fait réparti sur le régime d'écoulement. Ces données sont employées pour établir une relation de régression de la forme:

$$C = a \cdot Q + b \quad (III \cdot 6)$$

Où, C est la concentration, Q est le débit, a est la pente de la droite, et b est une constante. Les paramètres a et b sont déterminés par la méthode des moindres carrés. Une fois que la relation de régression est calculée, elle est employée pour estimer des concentrations pour chaque jour de l'année, en substituant le débit moyen journalier dans l'équation, en résolvant la concentration estimée, on aura :

$$\hat{C} = a \cdot \bar{Q} + b \quad (\text{III} \cdot 7)$$

Où, \hat{C} est employé au lieu de C pour rappeler que la concentration est une estimation, et \bar{Q} est utilisé au lieu de Q pour désigner le débit moyen journalier et non le débit instantané.

De ce fait, la charge annuelle est calculée par addition des flux journaliers basés sur les charges solides journalières estimées et les débits moyens journaliers, appliquant un facteur de conversion k pour le changement des unités, d'où :

$$\text{Charge} = k \sum_{i=1}^{365} \hat{C}_i \cdot \bar{Q}_i \quad (\text{III} \cdot 8)$$

II.4.5 Méthodes de correction des courbes de transport solide en suspension

Les hydrologues et les géomorphologues ne semblent actuellement plus ignorer le biais, et les moyen de le corriger, quoiqu'il soit bien connu aux statisticiens de puis longtemps. L'existence de biais signifie que beaucoup de résultats édités pour des charges de cours d'eau sont sous-estimés et nécessitent la correction. Le degré de la sous-estimation varie d'un cours d'eau à un autre et pour différents types de charge dans le même cours d'eau.

Le biais statistique intervient lors de la retransformation de l'équation (III.4) en équation (III.3), même si une loi en puissance telle que (III.3) est la forme fonctionnelle correcte pour la relation entre Q_s et Q . La régression $\log - \log$ (III.4) assure que la moyenne résiduelle de l'échantillon est zéro. Si la relation de $\log Q_s - \log Q$ est réellement linéaire avec une dispersion aléatoire, la valeur prévue de $\log Q_s$ donnée par (III.4) est la moyenne arithmétique de la distribution conditionnelle de $\log Q_s$ à $Q = Q_i$. Cependant, la valeur prévue de Q_s donnée par la relation (III.3), est la moyenne géométrique, non arithmétique, de la distribution conditionnelle de Q_s à $Q = Q_i$. La moyenne géométrique est nécessairement plus petite que la moyenne arithmétique.

Les estimations de débits solides en suspension sont souvent dérivées des données périodiques en utilisant des modèles de régression. Plusieurs des modèles de régression utilisés impliquent la transformation dans l'espace logarithmique mais les résultats finaux sont souvent exigés d'être dans les unités originales. Donc, la retransformation des données de débit solide est nécessaire. Cette retransformation implique "un problème de correction biaisé" qui a suscité beaucoup d'attention.

La comparaison des estimations des courbes de transport solide et des mesures directes de charge solide en suspension montre que les méthodes des courbes de transport solide peuvent être décentrées et fortement variables (Colby, 1956; Walling, 1977). Dans les études avec données de terrain (Walling et al., 1981; Fenn et al., 1985), ces biais ont parfois excédé 50 %. En outre, les estimations de courbes de transport solide dépendent du protocole de prélèvement (Bennett et Sabol, 1973; Beschta, 1978; Thomas, 1988). Des méthodes pour corriger la déviation systématique ou biais dans les données logarithmiquement transformées ont été suggérées comme solution (Fergusson, 1986, 1987). Cependant, bien que la correction biaisée soit avantageuse, elle ne rectifie pas les problèmes dans les estimations obtenues à partir des modèles mal ajustés (Thomas, 1985, 1988; Koch et Smillie, 1986; Walling et Webb, 1988). Cohn et al. (1992) précisent que certaines estimations corrigées semblent ne pas être sérieusement affectées par le manque

d'ajustement, mais ceci a été démontré pour un échantillon de données de courbe de transport solide plutôt qu'un hydrogramme complet. La concentration des sédiments en suspension dépend en réalité de facteurs autres que la débit mesuré simultanément (Rieger et olive, 1984), et les courbes de transport solide, reflètent rarement la dynamique du bassin versant à donner des estimations fiables d'apports solides.

Trois méthodes pour compenser ce biais sont en général utilisées: l'estimateur de quasi-maximum de vraisemblance (QMV), l'estimateur non biaisé de variance minimum (MVUE), et l'estimateur de Duan. Deux de ces méthodes sont recommandés par Cohn et Gilroy (1991). Ces deux méthodes sont l'estimateur non biaisé de variance minimum (MVUE) quand la distribution des erreurs est supposée normale et l'estimateur de Duan pour les situations dans lesquelles la distribution non-normale des erreurs est identifiée.

II.4.5.1 Estimateur du quasi-maximum de vraisemblance (QMV)

C'est une méthode paramétrique qui fournit une évaluation biaisée. Il est à noter que le calcul pour la correction biaisée est effectué sur chaque valeur journalière. Par conséquent, cette méthode est particulièrement utile s'il y a une grande variance dans les débits journaliers, si l'intervalle de prévision change considérablement sur la gamme des données ou si plusieurs des prévisions sont faites vers les extrémités de la relation. Identifiant le biais de la méthode de courbe de transport solide, Fergusson (1986) recommande:

$$\hat{C}_{SMV} = \hat{C}_S \cdot e^{\frac{S^2}{2}} \quad (III \cdot 9)$$

Où,

\hat{C}_{SMV} : débit solide estimé à l'aide de l'estimateur quasi-maximum de vraisemblance (QMV) ;

\hat{C}_S : débit solide estimé à partir de la courbe d'estimation ;

S^2 : l'erreur quadratique moyenne de la régression.

Bien qu'utilisée intensivement, cette méthode n'est pas généralement recommandée car les résultats ne sont pas des évaluations biaisées et la méthode sur évalue souvent les corrections pour le biais de haut en bas de la courbe d'estimation (Cohn et Gilroy, 1991). Cette méthode de QMV peut convenir si les débits prévus sont dans l'intervalle d'une série de données assez calibrage et l'erreur quadratique moyenne de l'échantillon S^2 est un estimateur satisfaisant pour l'erreur quadratique moyenne de la population.

II.4.5.2 Estimateur de Duan

Thomas (1985), Koch et Smillie (1986) recommandent l'estimation de Duan (1983), une fonction non paramétrique de retransformation appropriée pour des distributions non-normales des erreurs. L'estimateur de Duan est une méthode non paramétrique qui est basée sur l'équation:

$$\hat{C}_{SDuan} = \hat{C}_S \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^N e^{\varepsilon_i}}{N} \right] \quad (III \cdot 10)$$

Où,

\hat{C}_{SDuan} : débit (charge) solide estimé en utilisant l'estimateur de Duan ;

ε_i : résidus de la régression aux moindres carrés. Ce sont les différences dans les logarithmes normaux du débit solide mesuré et calculé.

$$\text{L'estimateur de Duan est exprimé par: } \beta = \frac{\sum_{i=1}^N e^{\varepsilon_i}}{N} \quad (\text{III} \cdot 11)$$

C'est l'équivalent de la moyenne exponentielle des résidus.

C'est une méthode qui exige seulement l'hypothèse que les résidus sont indépendants et identiquement distribués mais ils peuvent suivre n'importe quelle distribution. Quand les résidus sont normalement distribués, elle est aussi performante que MVUE (Cohn et de Gilroy, 1991). En outre, cet estimateur peut être généralisé aux transformations autres que le logarithme. Par exemple, si la fonction de transformation est la racine ou l'inverse, alors la fonction utilisée est l'inverse de la transformation choisie.

II.4.5.3 Estimateur non biaisé de variance minimum (MVUE) appelé aussi estimateur Bradu-Mundlak

Dans cette méthode, la correction biaisée est appliquée à chaque débit journalier pour la période considérée dans les calculs utilisant l'expression suivante:

$$\hat{C}_{SMVUE} = \hat{C}_{S(t)} \cdot g_m \quad (\text{III} \cdot 12)$$

et,

$$g_m = \frac{m+1}{2m} \cdot (1-V)S^2 \quad (\text{III} \cdot 13)$$

où,

\hat{C}_{SMVUE} : débit solide estimé pour le jour à l'aide de l'estimateur non biaisé de variance minimum ;

$\hat{C}_{S(t)}$: charge solide estimée à partir de la courbe de transport pour chaque jour (t) ;

g_m : est une fonction introduite par Finney (1951) et utilisée par Bradu et Mundlak (1970). Cette fonction peut être évaluée par un programme machine (Cohn et al., 1989) ;

m : degré de liberté de l'équation de régression ;

V : estimation de la variabilité à une valeur donnée de débit liquide et calculée par l'équation suivante:

$$V = \frac{1}{N} \cdot \frac{(\ln Q^* - Q)^2}{Q_{var}} \quad (\text{III} \cdot 14)$$

Où,

Q^* : débit moyen journalier pour le jour où la charge est prévue ;

Q_{var} : variance des débits instantanés utilisés dans la régression ;

N : nombre de points de données utilisés dans la régression.

L'estimateur non biaisé de variance minimum (MVUE) peut être évalué en utilisant un programme machine.

Les trois méthodes de correction biaisée donnent des résultats presque identiques dans les conditions suivantes:

- Le modèle assumé linéaire est approximativement correct ;
- Il y a un échantillon raisonnablement grand pour calibrer le modèle de régression c'est-à-dire 30 observations ou plus ;
- Le modèle n'est pas employé pour extrapoler au delà de la gamme des données utilisées pour le calibrage du modèle. Par exemple, si seulement des données de débit faible sont employées pour calibrer le modèle de régression, alors les méthodes

produiront différents bilans estimatifs de charge pour des périodes d'écoulement élevés.

Si la première condition est satisfaite, l'estimateur MVUE est le meilleur. Là, où la deuxième et la troisième condition sont également satisfaites, l'estimateur QMV peut être un bon choix parce qu'il est relativement facile de calculer et se rapproche étroitement de MVUE. Là, où des résidus de régression ne sont pas normalement distribués, l'estimateur non paramétrique de Duan peut être le meilleur. Cependant, dans de telles circonstances, on doit vérifier que l'utilisation d'un modèle de régression est appropriée.

II.4.6 Calcul du débit solide de fond

La connaissance du débit solide est très importante car c'est celui qui détermine la forme du lit du cours d'eau. Ce débit solide est en général exprimé par la poids de sédiments q_s [m³/m/s] pesé dans l'eau charriée par unité de largeur du lit mobile.

Plusieurs théories ont proposées dans le but de prévoir le comportement des sédiments transportés par un écoulement permanent à surface libre. Certaines sont basées sur le comportement mécanique des particules solides, mais d'autres sont basées sur l'analyse dimensionnelle.

Plusieurs formules ont donc vu le jour, dont la complexité et l'étendue d'application varient d'une équation à une autre. Le choix de telle ou telle méthode est très difficile. Elles ne donnent des résultats satisfaisant que dans un domaine limité de paramètres. Leur application doit alors se faire avec beaucoup de prudence.

Le transport des sédiments sans cohésion par l'écoulement permanent et uniforme d'un fluide dans un cours d'eau est un phénomène très complexe, et le comportement mécanique de ce mouvement bi phasique est encore mal compris. La recherche de précision dans ce domaine implique de plus en plus de paramètres, ce qui complique la résolution mathématique. Cependant, avec l'avènement et le développement de l'informatique et de ses moyens de calcul, de grands progrès ont été accomplis.

De nombreuses formules de calcul existent. Ne pouvant pas les évaluer toutes, nous avons choisi quelques unes des plus utilisées:

II.4.6.1 Formule de Du Boys

Elle représente la première tentative de quantification du charriage de fond et la formule de base de presque toutes les formules empiriques trouvées par la suite, il est intéressant de citer cette formule (Leliavisky, 1961 ; Larras, 1972, 1977 ; Lebreton, 1974):

$$g_s = \psi \cdot \tau \cdot (\tau - \tau_c) \quad (III \cdot 15)$$

Où,

g_s est le débit solide en poids par unité de largeur du fond et ψ un coefficient caractéristique des propriétés physiques du granulat.

Toutes les formules similaires donnent le débit solide égal à la différence ($q - q_c$) ou la différence ($\tau - \tau_c$) multipliée par une fonction de la pente et de la dimension du matériau. Citons par exemple (Larras, 1972):

- La formule de Mac Dougall (1933):

$$q_s = A \cdot J \cdot m \cdot (q - q_c) \quad (III \cdot 16)$$

- La formule de Straub (1935):

$$q_s = C_c \cdot \tau \cdot (\tau - \tau_c) \quad (III \cdot 17)$$

- La formule de Shields (1936):

$$q_s = \frac{10 \cdot q \cdot J}{(s-1) \cdot \rho_s \cdot d} \cdot (\tau - \tau_c) \quad (III \cdot 18)$$

- La formule de Chang (1939):

$$q_s = A \cdot n \cdot \tau \cdot (\tau - \tau_c) \quad (III \cdot 19)$$

Il faut noter qu'il était facile d'établir et de vérifier ces équations en laboratoire, mais il était très difficile de les appliquer aux cours d'eau naturels dont on ne peut mesurer avec précision la pente et le débit solide.

II.4.6.2 Formule de Schoklitsch

Schoklitsch a proposé deux formules empiriques, l'une en 1934 et l'autre en 1950, présentons la plus récente (Graf, 1996):

$$q_s = \frac{2,5}{s} \cdot J_s^{\frac{5}{8}} (q - q_c) \quad (III \cdot 20)$$

Où,

q_c , le débit liquide critique caractérise le début de l'érosion, il est donné par la formule suivante:

$$q_c = 0,26 \cdot (s - 1)^{\frac{5}{8}} \cdot \frac{d^{\frac{5}{2}}}{J_s^{\frac{5}{8}}} \quad (III \cdot 21)$$

valable pour $d \geq 0,006$ [m]. Pour un mélange de granulométrie non uniforme, on prend $d = d_{40}$ comme diamètre équivalent.

La formule de Schoklitsch s'applique à des diamètres de grains plutôt importants $d \geq 6$ [mm], à peu près uniformes et pour des pentes du fond plutôt moyennes à importantes (0,003 à 0,1).

II.4.6.3 Formule de Meyer-Peter et Muller

En analysant plusieurs formules empiriques obtenues en laboratoires, mais en vérifiant les conditions de similitude de Froude, que Meyer-peter et Muller ont obtenu en 1948 leur dernière formule en [kg/s/m] (Leliavisky, 1961 ; Larras, 1972 ; Lebreton, 1974 ; Graf, 1996 ; Belleudy, 1996):

$$0,25 \cdot \rho_s^{\frac{1}{3}} \cdot (g_s')^{\frac{2}{3}} = \gamma \cdot R_h \cdot \xi_M \cdot J_s - 0,047 \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d \quad (III \cdot 22)$$

Cette formule présente l'avantage d'être homogène et de rester valable pour des matériaux de granulométrie largement étendue. En posant: $\tau' = \xi_M \cdot \gamma \cdot R_h \cdot J_s$ et $\tau_c = 0,047 \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d$. Il vient:

$$g'_s = 8 \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho}} \cdot (\tau' - \tau_c)^{\frac{3}{2}} \quad (III \cdot 23)$$

Où,

$g'_s = g_s \cdot \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s}$ est le débit solide en poids dans l'eau et $\frac{g_s}{\gamma_s} = q_s$ est le débit solide volumique net [m³/s/m]:

$$q_s = 8 \cdot \frac{1}{\gamma_s - \gamma} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho}} \cdot (\tau' - \tau_c)^{\frac{3}{2}} \quad (III \cdot 24)$$

Ou, sous la forme suivante:

$$q_s = 8 \cdot \sqrt{g \cdot (s - 1) \cdot d^3} \cdot (\tau'^* - \tau_c^*)^{\frac{3}{2}} \quad (III \cdot 25)$$

Avec,

R_h : le rayon hydraulique du lit ;

τ'^* : la force tractrice adimensionnelle corrigée ;

τ_c^* : la tension adimensionnelle critique de frottement ;

ξ_M : un paramètre de rugosité donnée par,

$$\xi_M = \left(\frac{K'_s}{K_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (III \cdot 26)$$

Où,

K'_s : la rugosité due aux granulats, évaluée au moyen de la formule de Strickler ;

K_s : la rugosité totale du lit, évaluée avec la formule de Manning-Strickler.

$$K_s = \frac{U}{R_h^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}}} \text{ et } K'_s = \frac{26}{d_{90}^{\frac{1}{6}}} = \frac{21,1}{d_{50}^{\frac{1}{6}}} \quad (III \cdot 27)$$

Pour une granulométrie non uniforme, on prend le diamètre moyen, $d = d_{50}$, comme diamètre équivalent.

Lorsque le fond est plat (s'il n'y a pas d'ondulations) $\xi_M = 1$, par contre, en présence d'ondulations (dunes ou rides) une partie de l'énergie se dissipe en rugosité de forme, on prend $0,35 < \xi_M < 1$ (Graf, 1996).

La formule a été établie en canal pour des écoulements uniformes de 1 à 5000 l/s sur des granulats de 0,4 à 30 mm, de granulométrie tantôt uniforme tantôt étendue, et pour des pentes comprises entre 0,0004 et 0,024. La profondeur du canal dans les expériences allait de 1 à 120 cm. La gamme de ρ_s/ρ couverte allait de 1,25 à 4,22.

La formule de Meyer-Peter et Muller a subi des extrapolations sur d'autres conditions pour représenter mieux le phénomène.

Plusieurs auteurs ont testé cette formule en l'appliquant sur des cours d'eau naturels, sur le tiers central du Rhône par exemple, la formule s'accordait assez bien avec les faits, sur la partie française du Rhin, elle a donné de mauvais résultats, sur le fleuve Mondago à Coimbra (Portugal), elle était tout à fait conforme à la réalité, dans le cas de la Gail (Autriche), la formule MPM était complètement en désaccord avec les faits, et dans le cas

de la rivière Niobrara (Nebraska, USA), elle conduisait à des débits solides jusqu'à 5 fois trop faibles.

Il est donc recommandé de n'utiliser cette formule que pour des granulats plutôt grossier, $d > 2$ [mm], à granulométrie uniforme et non uniforme, et pour une gamme de pentes de fond allant de 0,0004 à 0,024, et pour des régimes de transport τ^{*f} allant de 0,047 à 0,25.

II.4.6.4 Formule de Shields

Elle s'écrit:

$$g_s = 10 \cdot q \cdot J \cdot \frac{\tau_0 - \tau_{cr}}{[(\rho_s - \rho) - 1]^2 \cdot d_{50}} \quad (III \cdot 28)$$

Où,

g_s : le débit charrié de fond par unité de largeur ;

q : le débit liquide instantanée [m^3/s] ;

J : la pente énergétique [%] ;

τ_0 : la contrainte de frottement dépendant de l'écoulement ;

τ_{cr} : la contrainte critique de début de charriage pour laquelle Shields admet:

$$\tau_{cr} = 0,060 \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d_{50} \quad (III \cdot 29)$$

Cette formule a été établie à l'aide d'essai en canal de laboratoire. Elle est applicable pour des rivières torrentielles ou de piémont.

III.4.6.5 Formule d'Einstein-Brown (1950)

Einstein étudia le problème du charriage par la méthode des paramètres hydrauliques significatifs. Il suppose que le mouvement d'un grain s'effectue par bonds dont la longueur et la fréquence dépendent de ses dimensions, le nombre et le volume des particules en mouvement donnent alors le débit solide de charriage. Il considère ensuite la probabilité pour qu'une particule commence à se déplacer dans un intervalle de temps donné (Lebreton, 1974).

La formule est donnée par:

$$\Phi = 40 \cdot \left(\frac{1}{\psi}\right)^3 \text{ pour } \frac{1}{\psi} \geq 0,09 \quad (III \cdot 30)$$

Avec,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\psi} = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d}, \tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot J \\ \Phi = \frac{E_s}{\rho_s \cdot g \cdot F \cdot [g \cdot (s-1) \cdot d^3]} \end{array} \right. \quad (III \cdot 31)$$

Et,

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 \cdot V^2}{g \cdot (s-1) \cdot d^3}} - \sqrt{\frac{36 \cdot V^2}{g \cdot (s-1) \cdot d^3}} \quad (III \cdot 32)$$

Cette formule est confirmée pour des granulats de diamètre d allant de 0,3 à 7 mm en laboratoire (Lebreton, 1974). D'où, la formule:

$$q_s = 40 \cdot F \cdot [g \cdot (s-1) \cdot d^3]^{\frac{1}{2}} \cdot \tau^{*3} \quad (III \cdot 33)$$

Le phénomène du transport solide est peu connu à cause des grandes difficultés rencontrées dans la réalisation des mesures directes. Ces difficultés augmentent en fonction des dimensions du matériau de fond, des sédiments transportés, ainsi que du fait qu'ils présentent toujours, une grande variabilité spatio-temporelle et une durée limitée en phase de crue.

La plupart des formules ne doivent pas être utilisées en dehors des conditions dans lesquelles elles ont été établies. En général, elles sont établies avec des données expérimentales obtenues en laboratoire et, moins souvent, in situ.

La vérification de ces formules dans les cours d'eau naturels s'avère extrêmement délicate, car il est difficile de mesurer correctement le débit solide in situ. De plus, une évaluation est souvent subjective à cause de la délimitation entre les zones de mode de transport solide.

Pour apprécier la validité des formules, il est intéressant de comparer les résultats avec des mesures directes de débit solide dans la nature.

