

La crue du 19 ou 20 mai 1998 à la station limnimétrique de l'Antizana 15.

G. Bontron

N.G.T. Equateur
Publication N° 4
juin 1998

Introduction :

Alors que la station limnimétrique était en travaux et que le rio était détourné, une crue d'une ampleur encore jamais enregistrée s'est produite. Le rio en crue est retourné dans son lit en occasionnant des dégâts à la station : débordements et érosion des rives, dépôts de sédiments et de pierres, arrachement des marches en métal ...

En étudiant les traces laissées par cette crue, il est possible de se faire une idée de ce qui s'est réellement produit. Ainsi, on peut donner dans le cas présent deux valeurs de débit de pointe : une valeur de débit minimum de l'événement, et une valeur de débit "possible". Ceci nous permet de cerner l'ampleur réelle de cette crue.

I. Le contexte :

I-1. Etat du canal au moment de l'événement :

Le lundi 18 mai 1998, des travaux ont été entrepris sur la station limnimétrique de l'Antizana 15. Ces travaux consistaient en l'installation de marches en métal sur le plan incliné, et en la remise à niveau du radier du canal (fig 1).

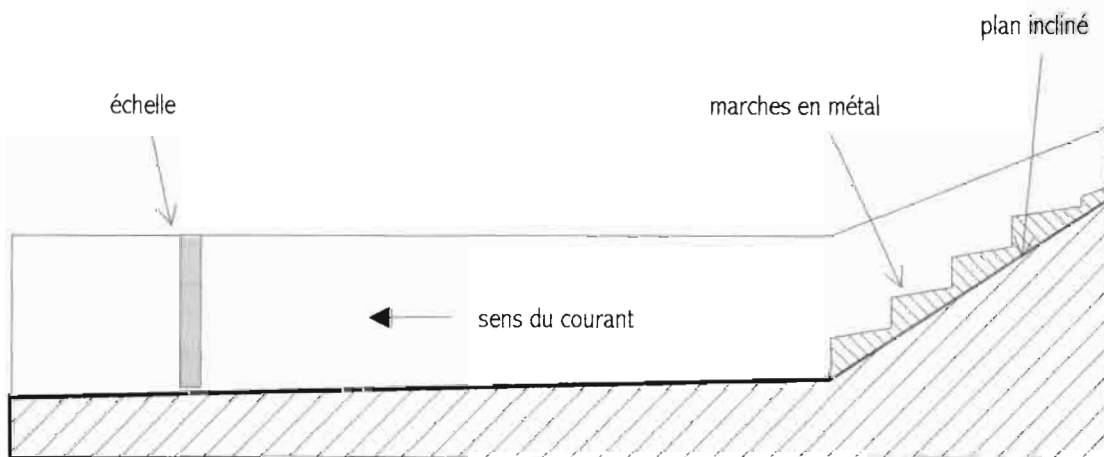


Fig 1 : coupe longitudinale schématique de la station limnigraphique.

Pour procéder aux travaux, le rio a été détourné de son lit, 30 mètres en amont de la station. Une fois les travaux achevés, il était prévu de faire la mise en eau le jeudi 21 mai, en laissant le rio détourné jusqu'à cette date, afin de laisser sécher le béton. Durant la période de séchage du béton, la station limnimétrique n'effectuait pas de mesures.

I-2. Conditions climatiques :

Alors que les journées du 19 au 21 mai ont été plutôt sèches, le 18 mai a connu une pluie relativement importante (12,4 mm mesurés à La Mica, Tab. 1). Même si cette pluie est importante, elle n'est nullement exceptionnelle. Ainsi, en ce début d'année 1998, nous avons déjà mesuré à La Mica quatre journées de pluie plus importante : 15,8 mm le 9 janvier, 13,1 mm le 23 avril, 14,7 mm le 3 mai et 14,6 mm le 10 mai. De plus, la pluie antérieure est quasi nulle (0,1 mm le 17 mai).

	17 mai	18 mai	19 mai	20 mai	21 mai
hauteur de pluie mesurée (mm)	0,1	12,4	0,3	0,0	0,0

Tableau 1 : pluie journalière mesurée à La Mica

Lors de l'événement, les conditions pluviométriques n'étaient donc pas exceptionnelles. Il en est de même pour l'état de la couverture de neige du glacier, dont la limite inférieure oscillait entre 5050 m le 18 mai, et 5100 m le 21 mai. Cette hausse de l'altitude de la limite de la neige montre que les 19 et 20 mai correspondent à des journées de fusion pour le glacier.

II. Etat de la station le 21 mai :

Le jeudi 21 mai, en venant effectuer la remise en eau du canal, nous avons constaté que le rio était retourné dans son lit initial (se retrouvant d'ailleurs en rive gauche de ce lit, alors que précédemment, il était en rive droite). Il s'est manifestement produit une crue qui a laissé de nombreuses marques de son passage sur les installations de la station :

- le bassin de retenue situé en rive gauche de la station, ainsi que le canal lui-même, le plan incliné et la cuve située en aval du canal, étaient entièrement remplis de sédiments et de pierres (jusqu'à 30 cm de diamètre) (photo 1, 2, 3, 4).
- en rive droite du canal, et en rive gauche du bassin, une forte érosion a eu lieu (photo 5). En rive droite du canal, le niveau du sol s'est abaissé de 30 à 40 cm, et un trou s'est creusé sous le plan incliné (photo 6), menaçant l'intégrité de l'ouvrage.
- les marches en métal ont été arrachées (photo 1)



Photo 1 : vue du plan incliné



Photo 2 : vue du bassin de retenue et du canal, depuis l'amont



Photo 3 : vue du canal depuis l'aval

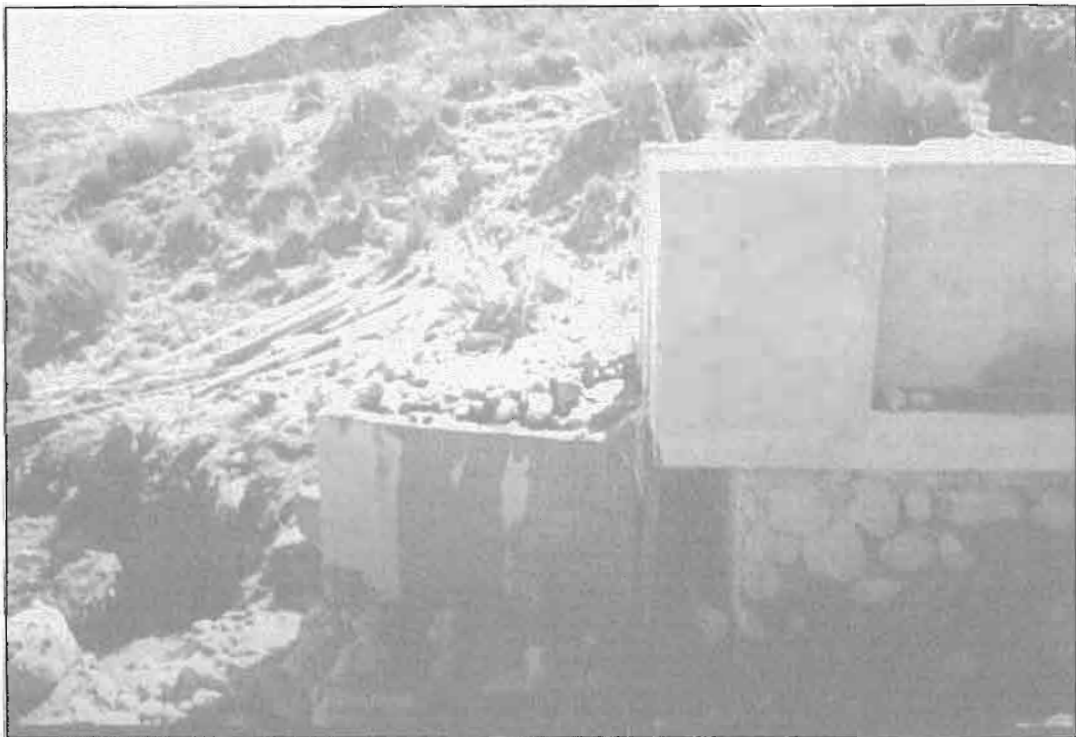


Photo 4 : vue de la cuve située à l'aval du canal



Photo 5 : vue de l'exutoire du canal depuis l'aval



Photo 6 : vue du trou sous le plan incliné

III. Estimation du débit de pointe de l'événement :

III-1. Approche adoptée :

Au vu du nombre et de la taille des pierres déposées au niveau de la station, la crue du 19 ou 20 mai 1998 semble d'une ampleur inhabituelle. Le rio ayant été détourné pour les travaux, il n'y avait pas de mesures effectuées par la station limnographique lors de l'événement. Il nous faut donc reconstituer ce qui s'est produit uniquement à partir des traces laissées par la crue. Ces traces sont interprétées avec les formules de l'hydraulique classique : on considère que l'écoulement liquide n'a pas été modifié par la présence du matériau transporté.

Malgré l'importance des dépôts observés au niveau de la station, il ne semble pas que nous ayons eu affaire à une lave torrentielle, mais bien à un phénomène de charriage classique. En effet, les débordements rive droite du canal sont dus à une sur-verse du canal. En cas de lave torrentielle, ces débordements auraient aussi été chargés par des blocs charriés et auraient donc donné lieu à des dépôts vu la faible pente de l'endroit. Or au contraire, nous observons une forte érosion en rive droite (photo 3) : c'est donc une eau peu chargée qui a débordé de ce côté, les blocs étant piégés au fond du canal suivant le mécanisme classique du charriage.

III-2. Estimation d'un débit de pointe atteint minimum :

Au niveau de la station, il y a des traces évidentes de débordement aussi bien en rive droite qu'en rive gauche. On compte quatre endroits où il y a eu passage de l'eau (fig 2):

- ① le canal lui-même
- ② rive droite du canal
- ③ seuil en rive gauche du canal
- ④ rive gauche du seuil

Mais on ne sait pas a priori si ces débordements ont eu lieu dès la pointe de crue, ou seulement ensuite lorsque le canal s'est bouché, du fait des dépôts de matériaux à la décrue.

Dans la cuve située en aval du canal, on a retrouvé des pierres dont le diamètre allait jusqu'à 25-30 cm. Si ces pierres sont dans la cuve, c'est qu'elles sont passées dans le canal. Or, pour que de telles pierres transitent par le canal, il faut des hauteurs d'eau minimales de 78 et 93 cm d'eau dans le canal, soit des débits de 1,2 à 1,4 m³/s (annexe 1). On peut donc considérer que, avant que le canal ne s'obstrue, celui-ci était entièrement rempli d'eau (la profondeur du canal est de 1m), avec un débit de l'ordre de 1,5 m³/s, au minimum.

En conséquence, si lors de la pointe de crue le canal était entièrement rempli, il semble logique de supposer que les débordements ont aussi eu lieu lors de cette pointe de crue. Ainsi, au vu des traces laissées, on peut dire que les débits dans les

passages ③ et ④ étaient au minimum de 0,6 et de 0,2 m³/s (annexe 2). Il est possible que ces débits soient encore très en deça de la vérité.

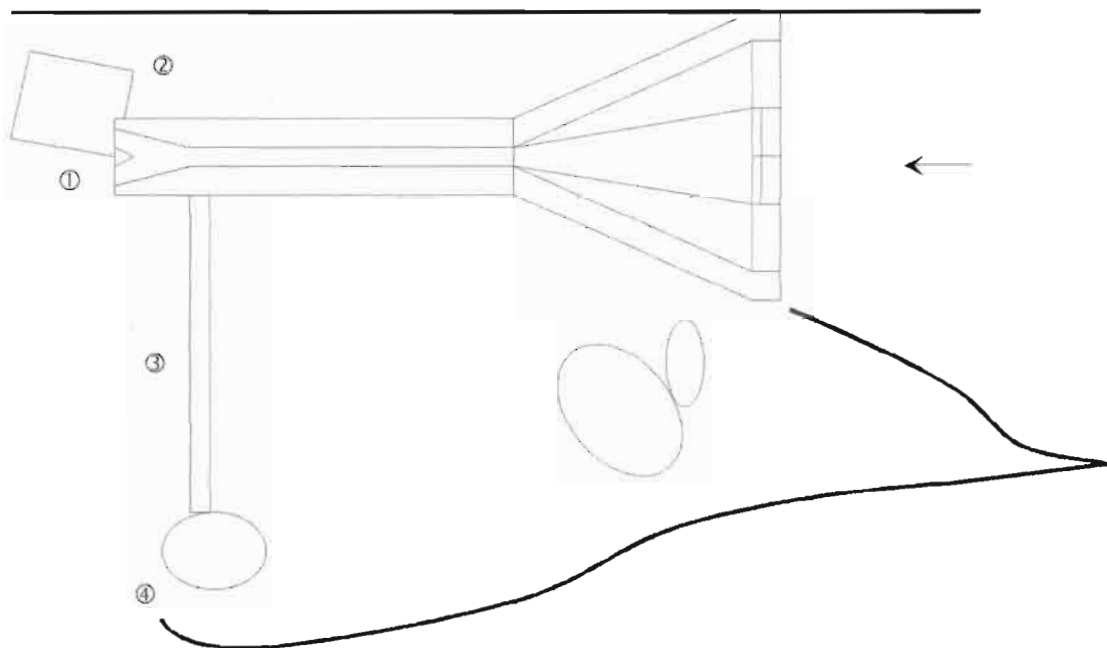


Fig. 2 : Schéma en vue aérienne de la station.

Par contre, il n'est pas possible de faire une estimation, même minimaliste du débit dans le passage ②. En effet, après que le canal se soit obstrué, le rio a débordé préférentiellement en rive droite, aggravant ainsi l'érosion de cette partie. Il n'est pas possible de différencier si les traces laissées l'ont été par la pointe de crue, ou par l'écoulement consécutif à l'obstruction du canal.

Nous obtenons donc un débit *minimum* de 2,3 m³/s.

III-3. Estimation d'un débit de pointe "possible" :

L'estimation précédente nous donne un débit de pointe minimum assez robuste, mais elle est susceptible de minimiser fortement la réalité de l'événement. Ainsi, bien que l'estimation d'un débit possible soit beaucoup plus sujette à caution, du fait des fortes hypothèses et simplifications sur lesquelles elle se base, cette deuxième estimation cerne peut-être mieux l'importance du phénomène.

Nous avons donc en plus considéré une section du torrent un peu à l'amont de la station, en un endroit où des marques de niveau maximum atteint étaient facilement visibles. Si l'on suppose que les pierres de 30 cm de diamètre sont aussi passées dans cette section, alors on peut estimer un débit de 5 m³/s (cf. annexe 3). Le problème de cette estimation est qu'elle considère l'écoulement permanent, à cause du manque de données disponibles pour faire mieux. Néanmoins, la hauteur d'eau atteinte dans cette hypothèse correspond aux traces relevées sur le terrain.

Nous considérons donc un débit *possible* de 5 m³/s.

IV. La cause de la crue :

IV-1. La fonte journalière du glacier :

D'après les enregistrements effectués de novembre 1997 à mai 1998, les débits habituels de la station limnigraphique sont au maximum de l'ordre de 300 à 350 l/s. Il y a eu des mesures à 800 l/s avant cette période, mais elles sont fortement sujettes à caution, à cause du phénomène d'anti-dune, non encore détecté à cette époque. Cependant, même si l'on considère un débit habituel maximal de l'ordre de 800 l/s, cela reste très en deça des débits estimés pour l'événement du 19 ou 20 mai 1998, aussi bien pour le débit possible (5 m³/s) que pour le débit minimum (2,3 m³/s). Cette crue ne peut donc pas s'expliquer entièrement par la fusion glaciaire d'une journée.

IV-2. La pluie :

Seule la pluie du 18 mai fut significative. Cependant, si l'on considère les débits de pointe des crues engendrées par les quatre journées de pluies plus importantes enregistrées depuis le début de l'année, on s'aperçoit que aucun de ces débits ne dépasse les 150 l/s (Tab. 2).

	9 janvier	23 avril	3 mai	10 mai
pluie à La Mica (mm)	15,8	13,1	14,7	14,6
débit de pointe de la crue générée (l/s)	60	140	94	140

Tableau 2 : débit de pointe de crues générées par 4 pluies supérieures à celle du 18 mai

Si l'on ajoute à cette observation que l'état de saturation préalable du sol était plutôt faible (0,1 mm de pluie le 17 mai), il paraît inconcevable, même en l'absence de données d'intensités horaires, que la pluie du 18 mai soit à l'origine de la crue observée.

IV-3. Rupture d'une poche d'eau :

La crue ne pouvant être expliquée ni par la fonte journalière du glacier, ni par la pluviométrie, il reste l'hypothèse de la rupture d'une poche d'eau située soit dans le glacier lui-même, soit dans la moraine, soit encore dans la glace morte. Cette hypothèse peut expliquer l'importance du débit de pointe de la crue sans forcément mettre en jeu des volumes d'eau trop importants.

Un repérage du cours amont du rio à montré que le lit du rio situé entre le glacier et la glace morte, a lui aussi connu le passage d'une crue exceptionnelle : le mélange de sable et de graviers qui formait ce lit est maintenant creusé par un cañon de 2,50 à 3 mètres de profondeur et d'à peu près 4 mètres de large. La poche d'eau était donc située en amont de la glace morte et de la moraine, sûrement sous le glacier.

L'observation de la langue du glacier montre qu'au moins une partie de l'eau est venue de sous de glacier (creusement d'une petite arche). Cependant, les traces d'érosion observées sur le glacier montrent qu'une partie de l'eau s'est, elle, écoulée sur la surface même du glacier. Sur le bord d'une des premières crevasses du glacier, nous avons retrouvé un tas de sable et de gravier de 40 à 50 cm de haut, probablement formé par une résurgence de la crue au niveau de cette crevasse.

Le glacier en lui-même ne semble pas montrer de changement morphologique permettant de localiser l'emplacement de la poche d'eau. Celle-ci devait donc bien être de taille modeste. C'est la soudaineté de la rupture qui a créé la violence de l'événement.

V. Conclusion :

La crue exceptionnelle observée entre le 19 et le 20 mai 1998 peut être estimée à un débit minimum de $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$ et à un débit possible de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Elle semble due à la rupture d'une poche d'eau de taille modeste située sous le Glacier 15α lui-même. L'eau ainsi libérée aurait cheminé en partie sous le glacier et en partie sur la surface du glacier via la remontée par des crevasses.

Il est possible que la rupture de cette poche d'eau soit liée à l'activité sismique de l'Antizana qui est, ne l'oublions pas, un volcan actif. Ce dernier est équipé d'une station sismographique (Réseau Nationale Equatorien). Malheureusement, cette station était hors-service au moment de l'événement, ce qui ne permet pas de rechercher la trace de la signature sismique soit de l'événement lui-même, soit de la secousse qui aurait pu provoquer la rupture.

En l'absence d'enregistrements limnigraphiques, il nous est impossible d'estimer le volume d'eau transité lors de la crue, et donc la taille exacte de la poche d'eau. A l'avenir, même lorsque le canal sera hors-d'eau, nous continuerons les enregistrements de la station limnimétriques.

Notons que cet événement n'est pas isolé. Plusieurs autres torrents de l'Antizana montrent des traces d'érosion et de dépôts qui semblent générées par ce type de crues soudaines (cf. Contribution hydrologique des glaciers de l'Antizana au système collecteur de La Mica, M. Stephan, NGT Equateur, juin 1998). C'est donc un

phénomène dont il sera nécessaire de tenir compte dans les études futures sur l'Antizana.

Enfin, il est possible que les traces de cette crue puissent se voir maintenant sur les enregistrements limnimétriques effectués à la station limnigraphique. En effet, les hydrogrammes semblent décalés dans le temps de 2 heures : les pointes de crues qui survenaient avant l'événement entre 14 et 15 heures arrivent maintenant entre 16 et 17 heures. La crue peut avoir creusé dans la glace morte (ou ailleurs ...) des cavités et des réseaux souterrains expliquant ce décalage temporel. Il pourrait être fort intéressant d'aller prochainement faire des traçages en amont de la station afin de savoir ce qu'il en est exactement.

Annexe 1 :

Pour estimer le débit de début d'entraînement des pierres, la formulation en débit apparent de l'équation de Meyer-Peter (Meyer Peter, 1948) est utilisée :

$$q_s = \frac{25}{(S-1).(1-p)} \left[\left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} . h . i - 0,047 . (S-1) . d_m \right]^{3/2} \quad (1.1)$$

Où : q_s est le débit solide en volume apparent par unité de largeur
S est la densité relative par rapport à l'eau du matériau
 k_s est le coefficient de Strickler total du fond
 k_r est le coefficient de rugosité de Strickler du grain
h est la hauteur d'eau
i est la pente de la ligne d'énergie
 d_m est le diamètre moyen des pierres
p est la porosité

Suivant (1.1), le débit d'entraînement à lieu pour :

$$\left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} . h . i = 0,047 . (S-1) . d_m \quad (1.2)$$

Pour le canal limnimétrique, nous ne prenons pas en compte le terme correcteur en $(k_s/k_r)^{3/2}$ qui correspond à l'effet de masquage, car on considère que les matériaux à transporter ne forment pas le radier du canal, mais viennent de l'amont. Nous obtenons donc l'équation simplifiée suivante :

$$h = 0,047 . (S-1) . d_m / i \quad (1.3)$$

Nous ne pouvons pas faire autrement que de considérer l'écoulement comme permanent, donc i est pris comme égal à la pente du radier, soit $i = 2,5 \%$ pour le canal de la station. Ainsi, à partir de l'équation (1.3), pour des pierres de densité apparente $S = 2,65$, nous obtenons les résultats suivants :

$$\begin{aligned} d_m = 25 \text{ cm} &\Rightarrow h = 78 \text{ cm} \\ d_m = 30 \text{ cm} &\Rightarrow h = 93 \text{ cm} \end{aligned}$$

En extrapolant la courbe de tarage établie pour la station limnigraphique (suivant une équation de Manning), nous obtenons des débits respectifs de 1,2 et 1,4 m^3/s

Annexe 2 :

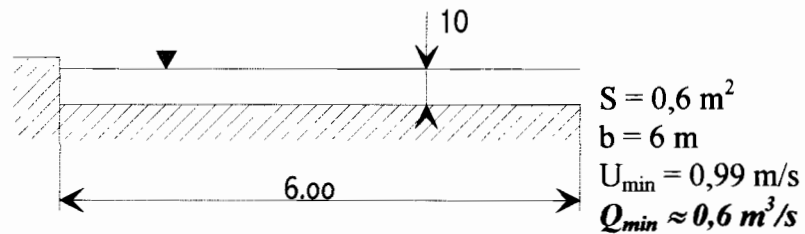
Les sections ③ et ④ marquent une rupture de pente de quasi-nulle à verticale. La vitesse de l'eau dans ces sections est donc au moins égale à la vitesse U_{\min} telle que le nombre de Froude dans ces sections soit égal à 1 (vitesse égale à U_{\min} si l'écoulement amont est fluvial, vitesse supérieure s'il est torrentiel) :

$$1 = \frac{U_{\min}}{\sqrt{g \frac{S}{b}}} \quad (2.1)$$

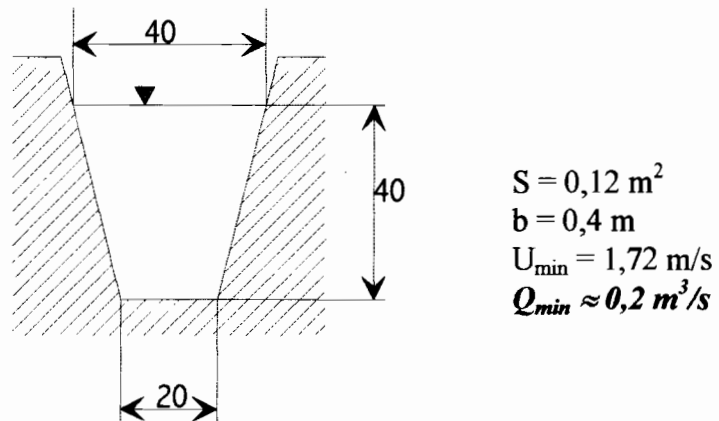
Où : g est l'accélération de la pesanteur (prise égale à 9.81 m/s^2)
 S est la surface mouillée de la section
 b est la largeur au miroir à la section

A partir de simplement les caractéristiques géométriques des sections ③ et ④ et des traces marquant les niveaux atteints par l'eau, l'équation (2.1) permet de calculer les débits minima Q_{\min} qui se sont écoulés dans ces sections. Soit :

section ③ :



section ④ :



Annexe 3 :

La hauteur d'eau de début d'entraînement nous est donnée par l'équation (1.2). Cette fois-ci, nous prenons en compte le terme correcteur $(k_s/k_r)^{3/2}$. Le lit du cours d'eau étant constitué principalement de pierres dont le diamètre varie de 5 à 40 cm, nous choisissons dans les tables un coefficient de Strickler total du fond $k_s = 25$. Le coefficient de rugosité du grain nous est donné par la formule empirique (3.1) :

$$k_r = \frac{21,1}{\sqrt[6]{d_m}} \quad (3.1)$$

Donc, pour des pierres de diamètre $d_m = 30$ cm, nous avons $k_r = 25,8$.

Une fois encore nous considérons l'écoulement permanent, ce qui nous permet d'assimiler i à la pente du lit du rio. Nous estimons $i = 5$ %. Ainsi, pour des pierres de densités apparentes $S = 2,65$ et de diamètre moyen $d_m = 30$ cm, (1.2) nous donne une hauteur de début d'entraînement : $h = 44$ cm.

Cette hauteur est cohérente avec celle relevée sur le site : $h = 42$ cm. Les hypothèses concernant l'évaluation des différents paramètres paraissent donc correctes. Nous estimons le débit en appliquant la formule de Manning (3.2), valable en régime permanent :

$$Q = k_s \cdot \sqrt{i} \cdot \left(\frac{S^5}{P^2} \right)^{1/3} \quad (3.2)$$

Où : Q est le débit

S est la surface mouillée de la section de passage

P est le périmètre mouillé de la section de passage

La section relevée sur le terrain peut-être assimilée à une section rectangulaire de largeur 4,2 m et de hauteur 0,42 m. L'équation (3.2) nous donne donc un débit :

$$Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$$