

PREMIÈRE PARTIE

**ÉTUDE DE DÉPLACEMENTS
DE GALETS RADIOACTIFS SUR LA BRUCHE.
COMPARAISON DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX OBTENUS ET DE
L'APPLICATION DE LA FORMULE DE MEYER-PETER.**

par G. Courtois *
M. Gasnier *
M. Maire **
et M. Scherrer **

Résumé

Une expérience de traceurs radioactifs dans un torrent vosgien donne pour charriage 1 730 t dues à trois crues successives étalées sur deux mois. Avec les données expérimentales à la disposition des auteurs, on tente d'estimer le même charriage par l'intermédiaire d'une formule de Meyer-Peter.

On arrive à une incompatibilité entre les deux résultats; en supposant le débit critique de début d'entraînement égaux dans les deux cas, la formule de Meyer-Peter donnerait un charriage vingt fois plus important que celui observé par traceurs; réciproquement si on suppose les charriages égaux, il faut convenir que le débit critique de début d'entraînement est deux fois plus élevé que celui observé.

Les auteurs soulèvent ici le problème de cette incompatibilité.

Expériences de déplacements de galets radioactifs sur la Bruche

De l'automne 1967 à l'hiver 1968-1969, il a été procédé à une étude de charriage dans la Bruche, torrent vosgien, en effectuant un marquage radioactif des galets de ces rivières.

Les résultats complets de cette expérience sont rapportés dans [1]. Ils montrent que les galets ont été retrouvés sur 350 m de longueur, sur toute la largeur de la rivière soit 15 m, et sur une épaisseur de 50 cm, correspondant, d'après les répartitions spatiales des galets retrouvés, à un charriage total de 1 730 t \pm 170 pendant la période considérée :

$$Q_{\text{exp}} = 1\,730 \text{ t} \pm 170 \text{ t}$$

d'octobre 1967 à novembre 1968.

D'autre part, on a constaté à partir des détections successives dans le temps que 90 % du charriage précédent était dû aux diverses crues de la Bruche en décembre 1967 et janvier 1968. Entre le mois de février 1968 et décem-

bre 1968, le transport a été quasi négligeable, et on a considéré que le plus fort débit liquide observé pendant cette période correspond au débit liquide de début d'entraînement.

Ceci nous a conduit à prendre comme débit liquide expérimental de début d'entraînement 15 m³/s :

$$q_{l \text{ exp}} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$$

Il en résulte que le charriage observé est dû à trois crues situées respectivement du 23 au 29 décembre 1967, du 6 au 10 janvier 1968 et du 14 au 23 janvier 1968. Les débits de ces crues sont représentés sur la courbe *a* en trait plein du graphique de la figure 1.

Résultats expérimentaux et formules semi-empiriques

Généralités. Notations.

On peut tenter de rapprocher les résultats expérimentaux de ceux qu'on pourrait obtenir par l'emploi de formules semi-empiriques telles que celles de Schoklitsch, Kalinske, Meyer-Peter.

Cette dernière formule est la plus couramment employée dans ce genre de calcul, malgré qu'elle ne s'applique guère aux conditions hydrauliques rencontrées; citons à cet effet Quesnel :

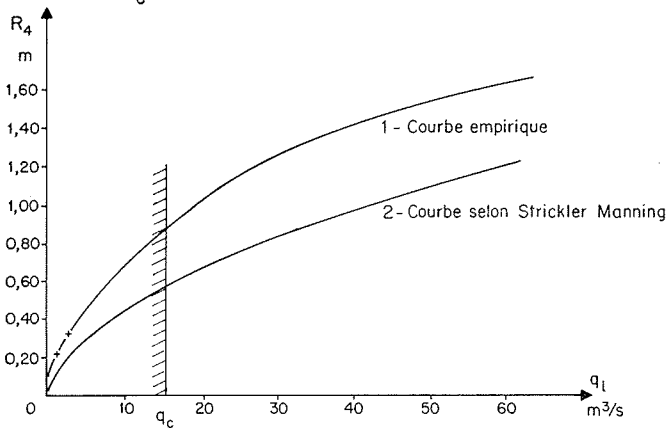
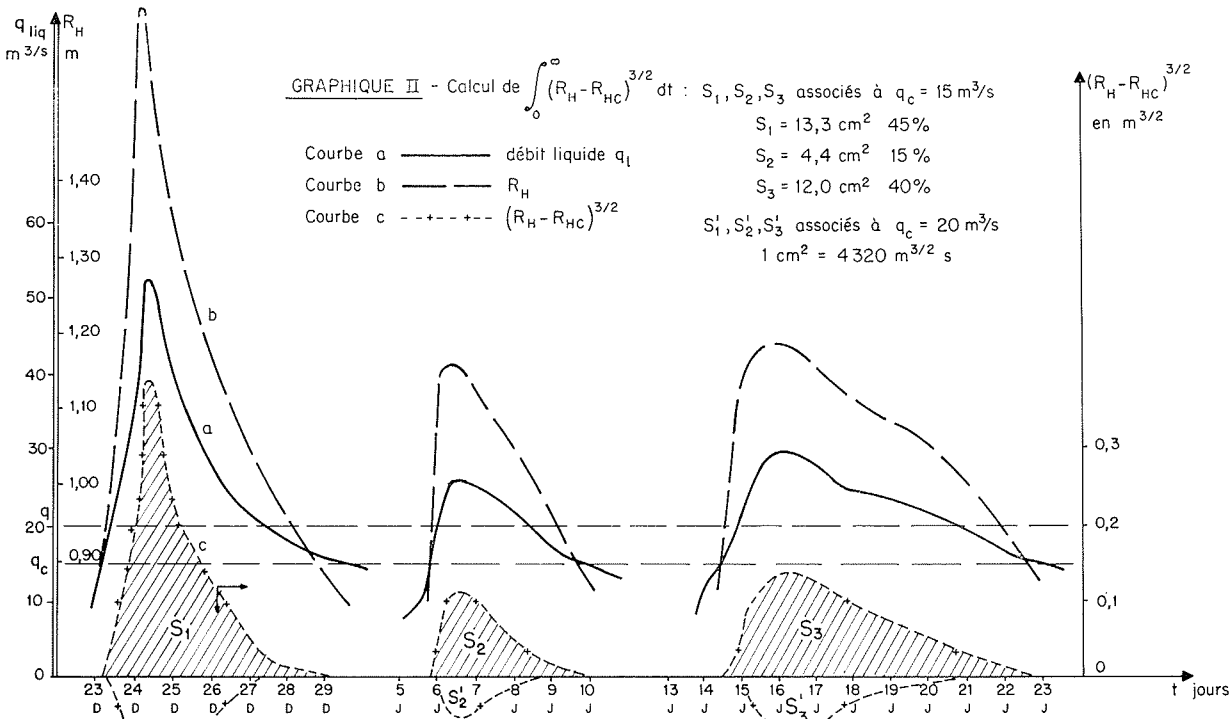
« Les formules de Meyer-Peter ne s'appliquent pas aux cours d'eau qui coulent sur un sol rocheux, sur un lit de conglomérats insensibles à l'érosion, sur un lit de galets dont la stabilité reste assurée tant que n'interviennent pas des crues de caractère diluvien donc exceptionnelles. »

« Ces formules impliquent un régime permanent tant du débit liquide que du débit solide, c'est-à-dire le parallélisme du lit et de la ligne d'eau, et par suite également de la ligne d'énergie. »

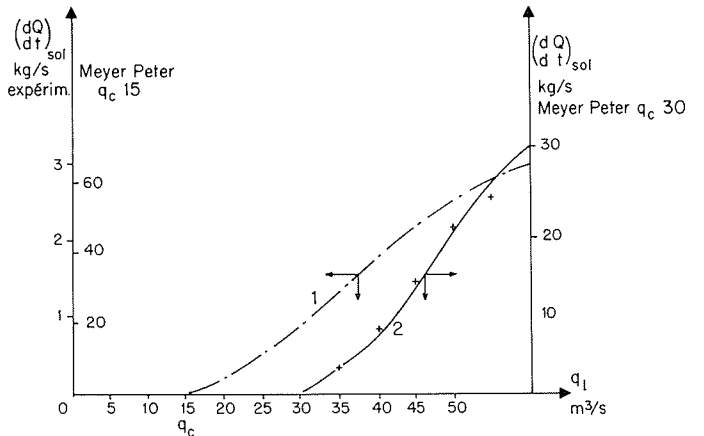
Nous sommes conscients de ces restrictions, mais les formules de Meyer-Peter ont pour conséquences à travers l'intéressante comparaison directe entre la force tractrice τ d'entraînement correspondant au débit solide observé et la force tractrice critique τ_c correspondant au début de charriage, de déterminer si nous sommes en période de charriage ou non. De plus, il est généralement admis que la formule de Meyer-Peter rend bien compte des phénomènes de charriage pour une phase galets.

* Section d'Application des Radioéléments de Saclay, Centre d'Etudes Nucléaires.

** Centre de Géographie Appliquée, Université de Strasbourg.



GRAPHIQUE I - Rayon hydraulique fonction du débit liquide.



GRAPHIQUE III - Courbes des débits de charriage en fonction du débit liquide.

1/ Dépouillement Meyer-Peter suivant Strickler-Manning.

Dans le développement qui va suivre :

1° Nous adopterons le système M.Kp.S. Ce système n'est pas le système officiel, mais le débit y est exprimé en kg/s, au lieu de Newton/s, donc sous une unité plus familière.

2° Nous adopterons les notations faisant l'objet du tableau I.

Rayon hydraulique en fonction du débit. Formule de Strickler-Manning.

Dans tout ce qui va suivre nous aurons besoin de connaître le rayon hydraulique R_H celui-ci étant directement relié à la force tractrice τ par la relation :

$$\tau = a \bar{\omega} i R_H \text{ avec : } a = \frac{q_a}{q_l} \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2}$$

En tout état de cause, le rayon hydraulique n'a pas été déterminé de façon expérimentale sur le site, mais on peut être amené à l'atteindre de deux manières différentes.

a) par estimation en évaluant les hauteurs d'eau à différentes valeurs du débit.

b) à partir de la formule de Strickler-Manning.

La formule de Strickler-Manning relie V , i , R_H et le coefficient k de Strickler par :

$$V = k R_H^{2/3} i^{1/2}$$

La vitesse V n'étant pas une donnée directement accessible, nous la remplacerons par :

$$V = \frac{q_l}{S} = \frac{q_l}{pR_H}$$

ce qui donne :

$$q_l = kpR_H^{5/3} i^{1/2}$$

qui permet, pour chaque débit q_l , de déterminer R_H en estimant p (ce qui est beaucoup plus facile que V) et k .

Le résultat de l'application de la formule de Strickler-Manning avec un coefficient k de rugosité du fond égal à 32, conduit au tracé de la courbe théorique 2 du graphique 1 de la figure 1.

Notons que cette courbe théorique 2 s'éloigne assez de la courbe 1 que nous avons admis implicitement comme plus probable, et que notamment elle ne passe pas par les points expérimentaux. Mais il faut remarquer que le coefficient k est dans notre système relativement mal déterminé, il peut tomber à 25 et à 20, exceptionnellement même à 15 (Quesnel, haut de la page 105) [2].

Or la courbe 1 du graphique correspond de façon très satisfaisante à une courbe qui aurait été établie avec la

formule de Strickler-Manning avec un coefficient $k = 16,2$ qui n'est pas incompatible avec la réalité.

Quoi qu'il en soit, nous continuerons le dépouillement sur formules semi-empiriques à partir des deux hypothèses $R_H = f(q_l)$ représentées par les courbes 1 et 2 du graphique 1 de la figure 1.

Applications brutales de la formule de Meyer-Peter.

τ_c : FORCE TRACTRICE CRITIQUE.

La force tractrice critique sera calculée par :

$$\tau_c = 0,02 \bar{\omega}'_s d_{95}$$

avec $\bar{\omega}'_s = 1\,700$ et $d_{95} = 0,136$.

ce qui donne :

$$\tau_c = 4,6 \text{ kgf/m}^2$$

τ : FORCE TRACTRICE.

La force tractrice est de la forme :

$$\tau = \frac{q_a}{q_l} \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \bar{\omega} R_H i$$

Notations

Tableau I

SYMBOLE	DÉSIGNATION	UNITÉS	VALEUR ADOPTÉE
l	Largeur du transport; largeur de la rivière.	m	5 m
d	Diamètre des grains.	m	
d_{90}	Diamètre des particules au-dessous duquel on trouve 90 % du matériau.	m	
d_{95}	Diamètre des particules au-dessous duquel on trouve 95 % du matériau.	m	
q_l	Débit liquide observé.	$\text{m}^3 \times \text{s}^{-1}$	
q_a	Débit liquide qu'on observerait dans l'hypothèse de parois identiques au lit.	$\text{m}^3 \times \text{s}^{-1}$	
q_s	Débit solide en poids pesé dans l'air par unité de largeur du lit.	$\text{kg} \times \text{s}^{-1} \times \text{m}^{-1}$	
Q	Charriage total observé.	kg	$1,57 \cdot 10^6 \text{ kg}$
S	Section de la rivière pour un débit donné.	m^2	
V	Vitesse débitante du liquide $q_l = SV$.	$\text{m} \times \text{s}^{-1}$	
p	Périmètre mouillé.	m	15 à 18 m suivant débit
i	Pente de la ligne d'énergie.	sans dim.	710^{-3} (val. moyenne)
R_H	Rayon hydraulique $R_H = S/p$.	m	
R_{Hc}	Rayon hydraulique critique correspondant au débit d'entraînement.		
$\bar{\omega}$	Masse volumique du fluide.	kg/m^3	1 000
$\bar{\omega}_s$	Masse volumique du matériau de fond.	kg/m^3	2 700
$\bar{\omega}'_s$	Masse volumique du matériau posé sous l'eau.	kg/m^3	1 700
k_r	Coefficient de rugosité du matériau de fond.		
$k = k_s$	Coefficient de rugosité global du lit.		
τ	Tension tangentielle ou force tractrice.	kgf/m^2	
τ_{max}	Force tractrice maximum $= \bar{\omega} R_H i$.	kgf/m^2	
τ_c	Force tractrice critique.	kgf/m^2	
a	Coefficient de rapport de τ et τ_{max} :		
	$a = \frac{\tau}{\tau_{\text{max}}} = \frac{q_a}{q_l} \times \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2}$	sans dim.	
K	Coefficient de la formule de Meyer-Peter :		
	$k_s = K (\tau - \tau_c)^{3/2}$		1,29
U_*	Vitesse de frottement : $\sqrt{\tau/\bar{\omega}}$.	m/s	
t_c	Temps équivalent de crue à $40 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ par Meyer-Peter.	heure	
q_c	Débit liquide critique de débit d'entraînement.		

FORCE TRACTRICE MAXIMALE.

Chacun des deux rapports q_a/q_l et k_s/k_r , étant inférieur à 1, une estimation par excès de la force tractrice sera donnée par :

$$\tau_{\max} = \bar{\omega} R_{II} i$$

D'autre part, en considérant cette force tractrice maximale, on peut trouver le débit critique de débit d'entraînement q_c associé au rayon hydraulique critique en faisant :

$$\tau_{\max} = \tau_c = 4,6 \text{ kgf/m}^2$$

$$\bar{\omega} R_{IIc} i = 4,6 \text{ kgf/m}^2 \rightarrow R_{IIc} = 4,6/\bar{\omega} i$$

ce qui donne :

$$R_{IIc} = 0,66 \text{ correspondant à } q_c$$

9 m³/s selon la courbe 1;

20 m³/s selon la courbe 2.

FORCE TRACTRICE.

On peut tenter d'avoir une meilleure estimation de la force tractrice réelle en attribuant à q_a/q_l et k_s/k_r , des valeurs inférieures à 1, choisies un peu arbitrairement à 0,8 valeur compatible avec la morphologie de la rivière rencontrée, on aura alors :

$$\frac{q_a}{q_l} = \frac{k_s}{k_r} = 0,8 \quad a = \frac{q_a}{q_l} \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} = 0,57$$

$$\text{et } \tau = 0,57 \tau_{\max}$$

En considérant la journée du 24 décembre, on obtiendrait alors, pour un débit liquide de 40 m³/s :

$$R_{II} = 1,40 \text{ m (courbe 1)} \quad \tau_{\max} = 5,6 \text{ kgf/m}^2$$

$$R_{II} = 0,96 \text{ m (courbe 2)} \quad \tau_{\max} = 3,8 \text{ kgf/m}^2 < \tau_c$$

pas de charriage.

Cette dernière hypothèse est incompatible avec le charriage observé.

De la même manière, les débits critiques de début d'entraînement seraient donnés par :

$$R_{IIc} = \frac{4,6}{a\bar{\omega}i} = 1,16$$

correspondant à :

$$q_c = 26 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_c = 50 \text{ m}^3/\text{s (incompatibilité) car } > 40 \text{ m}^3/\text{s}$$

Les calculs précédents montrent combien il est difficile d'évaluer avec précision une force tractrice et le débit du début de charriage; selon les estimations faites, ce dernier pourrait théoriquement varier entre 9 et 50 m³/s.

DÉBITS DE CHARRIAGE PAR LA FORMULE DE MEYER-PETER.

La formule de Meyer-Peter donne le débit de charriage q_s par mètre de rivière, en fonction des forces tractrices et forces tractrices critiques selon :

$$q_s = K (\tau - \tau_c)^{3/2}$$

dans laquelle K est une constante (non sans dimension) et qui vaut dans le système M.Kp.S. adopté 1,29.

A partir de cette formule et des quatre hypothèses précédentes, (τ_{\max} et $\tau = a\tau_{\max}$ associé à chacune des courbes 1 et 2 donnant R_{II} en fonction de q_l) nous allons calculer :

1. Le débit de charriage par mètre linéaire q_s pour une crue de 40 m³/s.

2. Le temps équivalent pendant lequel ce débit aurait dû être assuré pour obtenir le charriage total Q. On a pris pour Q, la valeur trouvée à la détection de février 1968, à savoir 1 570 t. Ce temps est donné par :

$$t_c = \frac{Q}{q_s \times l} = \frac{1\,570 \cdot 10^3}{q_s \times 15} = \frac{104 \cdot 10^3}{q_s}$$

On trouve alors :

1° Courbe 1 :

$$R_{II} = 1,40 \text{ m} \quad \tau = \tau_{\max}$$

$$q_s = 15,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad t_c = 6\,850 \text{ s} \sim 2 \text{ h}$$

2° Courbe 1 :

$$R_{II} = 1,40 \text{ m} \quad \tau = a\tau_{\max}$$

$$q_s = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad t_c = 81\,000 \text{ s} \sim 22 \text{ h}$$

3° Courbe 2 :

$$R_{II} = 0,96 \text{ m} \quad \tau = \tau_{\max}$$

$$q_s = 3,67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad t_c = 28\,500 \text{ s} \sim 8 \text{ h}$$

4° Courbe 2 :

$$R_{II} = 0,96 \text{ m} \quad \tau = a\tau_{\max}$$

$$q_s = 0 \quad t_c = \infty$$

L'ensemble des résultats obtenus, associé à chaque hypothèse fait l'objet du tableau II ci-dessous.

Tableau II

HYPOTHÈSES POUR $q_l = 40 \text{ m}^3/\text{s}$	FORCE TRACTRICE CRITIQUE	τ_{\max}	τ	DÉBIT CRITIQUE DE DÉBUT D'ENTRAI- NEMENT	DÉBIT DE CHARRIAGE	TEMPS ÉQUIVALENTS DE CRUES
	(kgf/m ²)	(kgf/m ²)	(kgf/m ²)	(m ³ /s)	(kg/m × s)	(heures)
$R_{II} = 1,40 \text{ m}; \quad \tau = \tau_{\max}$	4,6	9,8		9	15,3	2 h
$R_{II} = 1,40 \text{ m}; \quad \tau = a\tau_{\max}$	4,6		5,6	20	1,29	22 h 30
$R_{II} = 0,96 \text{ m}; \quad \tau = \tau_{\max}$	4,6	6,7		26	3,67	8 h
$R_{II} = 0,96 \text{ m}; \quad \tau = a\tau_{\max}$	4,6		3,8	> 40 ~ 50	0	∞

Ce tableau met nettement en évidence, la difficulté d'appliquer une formule du type de Meyer-Peter; cette difficulté est la conséquence de deux faits :

a) La méconnaissance de la relation exacte liant le rayon hydraulique R_H au débit liquide q_l . Ce facteur, dans le cas étudié peut faire varier les résultats d'un facteur 4 environ. On peut facilement remédier à ce défaut, dans une expérience ultérieure en établissant expérimentalement cette relation.

b) La méconnaissance du facteur « a » qui, dans le cas choisi, toutes choses égales par ailleurs, fait varier le débit d'un facteur 12 environ. Ceci met en évidence l'énorme influence de ce facteur dont l'estimation expérimentale est très difficile et toujours sujette à caution.

Quoi qu'il en soit, avec les données à notre connaissance, une application que nous estimons honnête de la formule de Meyer-Peter conduit à des débits solides par mètre linéaire variant de 0 à 15,3 kg/m.s.

Cette partie traite de l'application brutale de la formule de Meyer-Peter, sans se préoccuper si celle-ci est compatible avec l'expérience de traceurs radioactifs menée. A priori, cette compatibilité peut être mise en doute car les temps équivalents de crue sont dans trois cas sur quatre très faibles.

Nous allons dans la partie suivante examiner une méthode permettant de comparer les résultats expérimentaux avec les résultats suivant une formule du type Meyer-Peter.

La formule du type Meyer-Peter et les résultats expérimentaux.

Supposons que le débit de charriage réponde bien instantanément à une formule de Meyer-Peter, c'est-à-dire que le débit de charriage est proportionnel à la puissance trois demis de la force utile agissante :

$$q_s = K (\tau - \tau_c)^{3/2} = K (a \bar{\omega} R_H i - \tau_c)^{3/2}$$

Nous allons considérer que « K » et « a » sont des constantes, et sont les inconnues du problème, que nous allons tenter de déterminer à partir des résultats expérimentaux. Deux inconnues nécessitent deux relations qui seront trouvées sur les bases suivantes :

1° Le débit critique de début d'entraînement est de 15 m³/s.

Pour ne pas alourdir le texte d'hypothèses multiples, nous ne traiterons en premier lieu que le cas de la courbe 1 donnant R_H , considérant cette dernière comme la plus probable.

Pour le débit liquide critique de 15 m³/s, le rayon hydraulique R_{Hc} vaut 0,90 m et on a :

$$a \bar{\omega} i R_{Hc} = \tau_c = 4,6 \text{ kgf/m}^2$$

ce qui donne :

$$a = \frac{\tau_c}{\bar{\omega} i R_{Hc}} = \frac{4,6}{1\,000 \times 710^{-3} \times 0,90} = 0,730$$

« a » = 0,730

est une valeur comprise entre celles précédemment adoptées (1 et 0,57).

2° On connaît par expérience le charriage total Q qui est l'intégrale sur toute l'année du débit de charriage instantané q_s :

$$q_s = \frac{1}{l} \frac{dQ}{dt} \rightarrow Q = \int_0^l l q_s dt$$

En considérant la période entre l'immersion et la fin de février, le charriage a été estimé à 1 570 t et on a :

$$1,57 \cdot 10^6 = \int_0^{28 \text{ Fév.}} l K (\tau - \tau_c)^{3/2} dt$$

L'intégrale se modifie ainsi :

$$\int_0^{28 \text{ Fév.}} l K (\tau - \tau_c)^{3/2} dt = \int l K (a \bar{\omega} i)^{3/2} (R_H - R_{Hc})^{3/2} dt$$

$$= l K (a \bar{\omega} i)^{3/2} \int (R_H - R_{Hc})^{3/2} dt$$

Cette dernière intégrale a été estimée graphiquement de la manière suivante : figure 1, graphique 2.

On considère tout d'abord la courbe « a » de débit liquide en fonction du temps, pendant les périodes de temps où le débit liquide atteint ou dépasse le débit liquide critique de début d'entraînement $q_l = 15 \text{ m}^3/\text{s}$. Par l'intermédiaire de la courbe $R_H = f(q_l)$, on peut tracer alors la courbe « b », qui pendant la même période fournit R_H en fonction du temps. On peut toujours, graphiquement, passer de cette courbe (b) à (c) qui donne $(R_H - R_{Hc})^{3/2}$ en prenant $R_{Hc} = 0,90 \text{ m}$.

La surface totale S sous cette dernière courbe, résultant de la somme des trois surfaces partielles S_1 , S_2 et S_3 , des trois périodes où le débit a dépassé 15 m³/s, est l'intégrale cherchée.

On trouve :

$$S = 1,51 \cdot 10^5 (\text{m}^{3/2} \text{ s}) = \int (R_H - R_{Hc})^{3/2} dt$$

Et on peut déterminer la constante K par :

$$K = \frac{1,5710^6}{l (a \bar{\omega} i)^{3/2} S} = \frac{1,5710^6}{15 (0,730 \cdot 10^3 \cdot 710^{-3})^{3/2} 1,510^5}$$

$$K = 0,061 \text{ au lieu de } 1,29$$

Ainsi donc l'exploitation des résultats expérimentaux conduit à un charriage total expérimental environ vingt fois inférieur au charriage total estimé à partir de la formule de Meyer-Peter et de sa constante de proportionnalité 1,29.

Les résultats expérimentaux répondraient alors à la formule de charriage :

$$q_s = 0,061 (\tau - \tau_c)^{3/2}$$

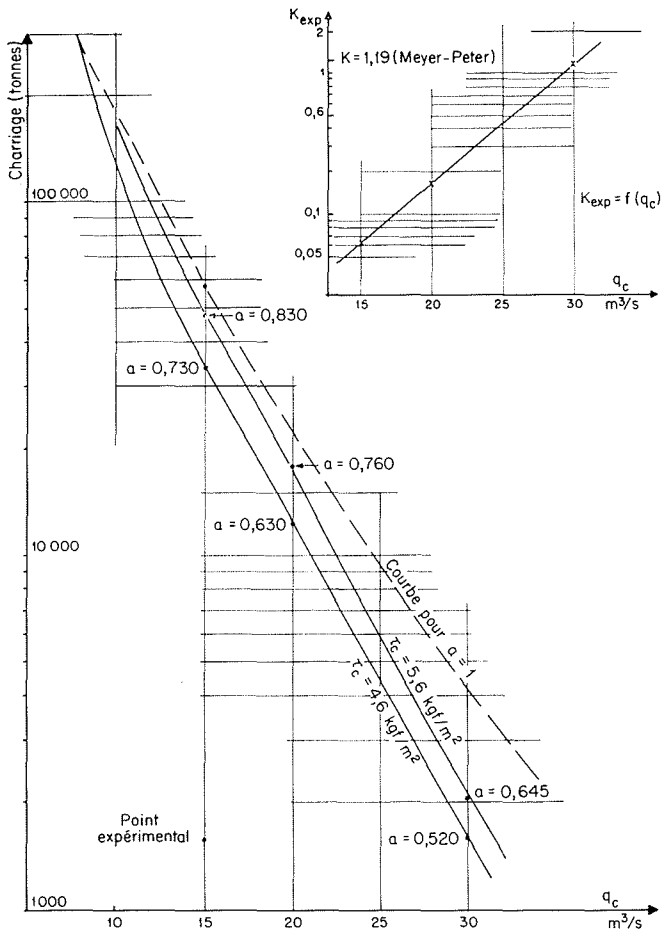
Le même processus de dépouillement peut s'appliquer avec des hypothèses de bases différentes :

1° A partir de la courbe 2 donnant R_H en fonction de q_l .

2° En supposant que le débit critique de charriage est de 20 m³/s.

Les résultats de ces dépouillements donnent alors le tableau III.

Tableau III			
HYPOTHÈSES	«a»	K _{exp}	K/K _{exp}
$q_c = 15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ $R_{Hc} = 0,90 \text{ m}$ (courbe 1) $R_{Hc} = 0,58 \text{ m}$ (courbe 2)	0,730 incompatibilité	0,061	21
$q_c = 20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ $R_{Hc} = 1,10 \text{ m}$ (courbe 1) $R_{Hc} = 0,67 \text{ m}$ (courbe 2)	0,630 0,98	0,165 0,106	7,8 12,2



2/ Chariage total selon Meyer-Peter en fonction du débit critique de début d'entraînement.

Ce tableau met en évidence que le choix de q_c influe énormément sur le facteur K : si le débit critique passe de 15 à 20 m^3/s , K/K_{exp} traduisant l'accord entre Meyer-Peter théorique et expérimental passe de 21 à 7,8, soit une diminution de 28 % pour une augmentation de q_c de 30 %. D'ailleurs, on trouvera en haut et à droite de la figure 2 une variation du coefficient expérimental K_{exp} en fonction de q_c .

Dès lors, on peut poser le problème de façon différente et se demander pour quel débit critique q_c , on aurait accord entre théorie de Meyer-Peter et pratique.

Cela revient à résoudre en R_{IIc} donc en q_c :

$$1,57 \cdot 10^6 = 1,1,29 (a\bar{\omega}i)^{3/2} \int (R_{II} - R_{IIc})^{3/2} dt$$

Ce qui se fait par approximations successives, en se donnant un R_{IIc} , dont on déduit un « a » et la valeur de l'intégrale. On trouve alors :

$$q_c = 30 m^3/s \text{ avec un facteur } \ll a \gg = 0,520$$

Résolution faite à partir de la courbe 1 de $R_{II} = f(q_c)$.

Remarquons que si le débit q_c est le débit critique réel, seule la première crue a créé un charriage pendant les seules journées des 24 et 25 décembre.

Discussions. Courbes de débits de charriage.

L'incompatibilité mise en évidence entre résultats expérimentaux et théoriques est grave et mérite qu'on s'y attarde.

En effet, rappelons les conclusions :

— Une application de la formule de Meyer-Peter avec « a » = 0,730 eut conduit à une estimation du charriage total pendant la période envisagée de 34 000 t. Avec un « a » égal à 1, ce qui est fréquemment fait par les utilisateurs, on trouverait un débit liquide critique de l'ordre de 9 m^3/s et un charriage total de l'ordre de 300 000 t, ce qui témoigne une fois de plus de l'incertitude qui peut régner sur l'application d'une telle formule.

— Les résultats expérimentaux donnent un charriage pour la période de décembre 1967 à janvier 1968 de 1 570 t.

Ces deux valeurs de 34 000 t et 1 570 t étant déterminées pour un même débit liquide critique de 15 m^3/s , la différence est telle qu'il faut nécessairement trancher entre théorie et mesure expérimentale : ou la formule de Meyer-Peter donne des résultats erronés, ou c'est l'expérience de traceurs radioactifs et il importe de savoir laquelle. Examinons les charges de chacune des méthodes :

1° Formule de Meyer-Peter :

Outre les restrictions que nous avons déjà signalées sur l'application d'une telle formule au cas rencontré, on retiendra la très grande incertitude de cette méthode; les incertitudes proviennent du calcul ou de l'estimation :

- de τ_c ;
- de τ ;
- du débit critique de début d'entraînement ou de « a », facteurs qui jouent le même rôle;
- de la relation $R_{II} = f(q_c)$.

Ainsi avons-nous appliqué cette formule aux trois crues envisagées suivant le processus défini précédent et les résultats obtenus sont reportés sur la figure 2, donnant le charriage total Q en fonction du débit liquide de début d'entraînement q_c : pour une force tractrice critique τ_c de 4,6 kgf/m^2 , le charriage variera de 400 000 t à 1 500 t pour un débit critique d'entraînement variant de 8 à 32 m^3/s . Cette figure met en évidence l'énorme influence de q_c donc de « a ».

Par contre, la variation de τ_c influe peu sur le résultat : si τ_c croît de 4,6 kgf/m^2 à 5,6 kgf/m^2 , le charriage total augmentera de 30 % environ, pour le même débit liquide de début d'entraînement (*).

Sur ce même graphique, figure 2, est placé le point expérimental; on constatera que de toute manière, il s'éloigne considérablement de la zone des résultats par la méthode de Meyer-Peter : facteur 22 dans le sens des ordonnées (charriage à débit liquide critique égal); facteur 2 dans le sens des abscisses (charriage égal pour des débits liquides critiques différents).

2° Résultats expérimentaux.

Dire que le charriage est de 34 000 t au lieu de 1 500 t, c'est dire que, en supposant l'épaisseur de charriage restée égale à 50 cm, le centre de gravité du nuage radioactif est à 3 km au lieu de 150 m ou encore en gardant cette distance de 150 m que les galets sont répartis sur 10 m de

(*) Cette phrase peut paraître contradictoire : si la force tractrice critique croît, le charriage croît à débit liquide de début d'entraînement égal. Cette contradiction n'est qu'apparente; si à même débit liquide de début d'entraînement, la rivière est capable de combattre une force tractrice plus grande, c'est que son efficacité c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'elle utilise pour le charriage est plus grande (traduit mathématiquement par le terme « a ») et le charriage résultant en sera plus élevé.

profondeur au lieu de 50 cm; ou enfin en prenant un moyen terme, qu'il eut fallu trouver des galets sur 1,50 m de profondeur et leur centre de gravité à plus de 1 km.

Un expérimentateur sérieux qui retrouve 260 galets sur 400 localisés dans un nuage de 350 m \times 0,50 m, ne peut croire en ces faits et nous n'y croirons pas.

Ce qui est peut être vrai, est le choix critiquable du débit liquide de début d'entraînement; les expériences ne sont pas assez précises pour assurer à coup sûr que les deux détections de février 1968 et décembre 1968, donnent des résultats distincts. Or, le désaccord fond vite au fur et à mesure que l'on augmente ce débit critique :

désaccord d'un facteur 21 pour $q_c = 15 \text{ m}^3/\text{s}$
désaccord d'un facteur 8 pour $q_c = 20 \text{ m}^3/\text{s}$
désaccord d'un facteur 2,5 pour $q_c = 25 \text{ m}^3/\text{s}$
accord pour $q_c = 30 \text{ m}^3/\text{s}$

Le désaccord croît exponentiellement comme le montre le graphique en haut et à droite de la figure 2 suivant :

$$\frac{K_{\text{exp}}}{K_{\text{théo}}} = e^{0,2(q_c - 30)}$$

ou encore :

$$K_{\text{exp}} = 1,29 e^{0,2(q_c - 30)}$$

Outre ceci, le seul point qui peut troubler notre quiétude est le suivant : il se trouve que la crue la plus importante donc susceptible de créer le plus fort enfouissement a été chronologiquement la première; les crues suivantes, responsables au total de la moitié du charriage en supposant un débit liquide critique de 15 m³/s sont sensées éroder le lit moins profondément : c'est-à-dire charrier plus en surface; ce faisant, les deuxième et troisième crues n'auraient pas intéressé la totalité des galets marqués mais seulement ceux des couches superficielles.

En fait, nous constatons :

a) Que cette explication qui, au maximum, fait gagner un facteur 2, en considérant que les galets marqués ne sont représentatifs que de la première crue, est très nettement insuffisante pour expliquer la différence de 34 000 t à 1 500 t observée;

b) Si le « triage » en profondeur dû à ces crues successives avait été important, on eut assisté simultanément à un triage longitudinal des mêmes galets : les galets superficiels (0 à 10 cm) eussent dû aller plus loin que les galets les plus enfouis, or le centre de gravité de la couche 0 à 10 cm

est de 158 m, à comparer au centre de gravité global éloigné de 150 m;

c) Dire que pour les deuxième et troisième crues l'épaisseur d'enfouissement diminue notablement, c'est également dire que pour le même charriage de ces crues, les galets ont été d'autant plus loin que l'épaisseur est faible. Ainsi, ce n'est plus sur 3 km que l'on eut dû retrouver les galets, mais sur 6 ou 10, ce qui accroît d'autant plus l'in vraisemblance.

Dès lors, nous devons conclure sur un semi-constat d'échec : il y a une réelle incompatibilité entre Meyer-Peter et les résultats expérimentaux sans que nous puissions ni en déterminer les causes réelles, ni trancher entre les deux estimations, *quoique notre esprit expérimentateur nous pousse à penser que la valeur expérimentale est fortement la plus probable.*

Conclusions

La précédente analyse montre la grande incompatibilité entre la formule de Meyer-Peter et les résultats expérimentaux dans le cas envisagé; ou bien cette incompatibilité est un phénomène isolé due à des conditions expérimentales particulières, et il devra être pris comme tel, ou bien il s'agit d'un phénomène systématique, et il faudra tôt ou tard trancher entre résultats expérimentaux et formules de Meyer-Peter. *C'est le but qu'il faudrait atteindre dans les prochaines expériences.*

Le raisonnement et le dépouillement que nous avons suivi ne sont sûrement pas exempts de critiques, d'interprétations erronées, de choix discutables de constantes, voire d'erreurs importantes. Nous demandons donc à tout lecteur de bien vouloir nous exprimer ses critiques, suggestions et remarques, nous serons très heureux d'entamer la discussion avec eux sur ce sujet.

Bibliographie

- [1] COURTOIS (G.) et GASNIER (M.). — Etude de charriage de la Bruche et de la Mossig au moyen de galets radioactifs. Rapport DR/SAR.S/69-05/MG-MB, février 1969.
- [2] QUESNEL (M.). — Traité d'hydraulique fluviale appliqué. Eyrolles Editeur.

