

L'INFLUENCE DE LA FORME DES CAILLOUX EN TANT QUE FACTEUR DE RESISTANCE A L'EROSION

Dr François PETIT
Laboratoire de Géographie physique
Université de Liège, BELGIQUE

RÉSUMÉ :

Des expériences ont été menées dans un flume à fond caillouteux en utilisant des cailloux marqués, ceci afin de cerner l'influence de la forme des éléments en tant que facteur de résistance à l'érosion. Les forces tractrices nécessaires à la mise en mouvement des éléments plats sont près de 1,5 fois supérieures à celles qui sont nécessaires à la mise en mouvement des éléments bien arrondis de même diamètre. Ces valeurs ont été confirmées par des observations - principalement composition et structure des dallages résistant à l'érosion - faites dans une rivière de Moyenne Belgique où se présentent conjointement des éléments aplatis et des éléments arrondis.

MOTS CLÉS : FORCE TRACTRICE CRITIQUE - FORME DES CAILLOUX - PARAMÈTRE DE SHIELDS - EXPÉRIENCE EN FLUME.

ABSTRACT :

A series of experiments was conducted in a pebble bottomed flume with marked pebbles, in order to test the influence of pebble shape on the resistance to erosion. Critical shear stresses are about 1.5 times greater for flat pebbles than those required for well rounded pebbles of the same diameter. This is confirmed by observations of bed structure and composition made in a natural stream in Middle Belgium where flat and well rounded pebbles are present at the same sites.

KEY WORDS : CRITICAL SHEAR STRESS - PEBBLES SHAPE - DIMENSIONLESS SHIELDS PARAMETER - FLUME EXPERIMENTS.

INTRODUCTION

La force tractrice apparaît comme un critère de plus en plus utilisé en géomorphologie pour préciser le début de l'entraînement des particules par charriage. Toutefois, dans la détermination des forces tractrices propres au matériel caillouteux, il subsiste un certain nombre de problèmes car des caractéristiques spécifiques à ce type de matériel peuvent permettre une résistance plus ou moins grande des particules à l'érosion : hétérogénéité du matériel, position des particules sur le lit, assemblage de ces dernières, mais également la forme même des cailloux. Ainsi plusieurs caractéristiques tendent, de façon indirecte, à retarder la mise en mouvement des particules qui présentent un aplatissement important par rapport à des particules sphériques : faible exposition au flux, centre de gravité abaissé, contact plus large avec le lit. Toutefois, les études qui traitent de ce problème sont relativement peu nombreuses, que ce soit en flume ou plus encore en rivières naturelles ; elles présentent en outre certains aspects parfois contradictoires.

Ainsi, LANE et CARLSON (1954) ont trouvé, à partir d'études menées en flume, que des particules sphériques sont près de 2,5 fois plus susceptibles d'être mises en mouvement que des particules présentant un fort aplatissement. JOHANS-SON (1963, 1976), toujours en flume, a montré lui aussi que les particules plates résistaient mieux à la mise en mouvement, sans toutefois quantifier ce point de façon précise. Mais pour des conditions de flux plus sévère, il trouve cependant que les cailloux plats peuvent être mis plus facilement en mouvement et peuvent surtout être transportés sur de plus longues distances, du fait qu'ils progressent alors plus par glissement

que par roulage. Par ailleurs, dans les travaux qu'ils ont effectués en flume, LI et KOMAR (1986) ont utilisé la notion d'angle de pivotabilité, fonction de l'agencement des particules mais aussi de leur aplatissement. Sur cette base, ils proposent certains rectificatifs aux valeurs du paramètre adimensionnel de Shields, c'est-à-dire aux valeurs des forces tractrices critiques, arrivant à des valeurs de résistance 4 à 5 fois supérieures pour des éléments présentant un fort aplatissement.

En revanche, des mesures effectuées à posteriori sur des dépôts édifés en rivières naturelles ont montré que les variations de la forme des éléments n'ont que très peu d'importance du point de vue du comportement hydraulique (Sedimentary Petrology Seminar, 1965). Mais, ceci a été attribué au fait que ces dépôts s'étaient constitués pour des forces tractrices fort élevées, ayant probablement engendré un charriage en vrac, tel que décrit par TRICART (1965). Cette supposition était renforcée par le fait que ces auteurs ne trouvaient pas non plus de différences significatives liées à la taille des éléments. Il faut néanmoins noter que dans les dépôts considérés dans cette étude, les particules les plus grossières étaient systématiquement celles qui présentaient un aplatissement plus important.

A partir d'études effectuées dans deux rivières de la chaîne Penines (U.K.), CARLING (1983) lui non plus, n'a pas trouvé de relation nette entre la forme des éléments et les forces tractrices critiques. Mais, comme le souligne cet auteur, l'éventail des formes du matériel disponible dans les rivières étudiées était relativement restreint - avec très peu d'éléments présentant un net aplatissement - ce qui limitait la partie des conclusions quant à cette absence de relation.

Les relations mises en évidence en flume ne se retrouvent donc pas clairement dans les études effectuées en rivières, soit que ces études aient porté sur des sédiments où n'existe pas de diversité de forme suffisante, soit que les conditions de mise en place des éléments aient présenté un caractère exceptionnel.

Dans cette optique, nous sommes en train d'étudier la genèse et la résistance des dépôts dans une rivière de Moyenne Belgique (la Burdinale) qui se caractérise par une charge caillouteuse composée conjointement par des éléments bien arrondis proches de la sphère d'une part, par des éléments présentant un très bon aplatissement d'autre part. Parallèlement à ces mesures, nous procédons également à une série d'expériences en flume, en utilisant ces deux types de cailloux comme éléments tests, ceci afin d'affiner les valeurs des forces tractrices critiques en relation avec la forme des éléments.

I. — EXPÉRIENCES EN FLUME

1. - PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Caractéristique du flume et du matériel caillouteux utilisé.

Les expériences ont été menées dans un des flumes que le Département de Géographie physique de l'Université d'Uppsala a eu l'amabilité de mettre à notre disposition. La longueur de travail du flume est de 6 m, sa largeur de 0.5 m. La pente longitudinale peut varier de 0°/∞ à 35°/∞. Le débit connu de façon précise grâce à un déversoir triangulaire placé juste en amont du flume, peut atteindre 0.4 m³ s⁻¹. Les différences altimétriques sont mesurées grâce à un pointeur monté sur un chariot susceptible de se déplacer tout au long du flume. Tout point du lit et du plan d'eau peut ainsi être positionné de façon précise dans les trois dimensions, ce qui permet de connaître les profondeurs et les éventuelles pentes longitudinales et transversales du plan d'eau.

Un moulinet OTT - C2 muni d'hélices de 3 cm et de 5 cm de diamètre a été monté sur un système analogue de façon à mesurer les vitesses ponctuelles du courant. Nous avons également utilisé une sonde électromagnétique qui permet l'enregistrement des vitesses instantanées du courant à partir de 1 cm du fond.

Le fond du flume et les parois sont, à l'origine, constituées de plexiglass. Mais des cailloux ont été disposés sur le fond et fixés au moyen de colle. Ce matériel provient des dépôts fluvioglaciaires qui constituent l'Esker Uppsala et est composé principalement de granite. Le matériel originel a été trié de façon à ce qu'il présente une répartition relativement homogène. Les mesures suivantes ont été réalisées sur 100 éléments pris au hasard : mesure des trois axes perpendiculaires définissant longueur, largeur et épaisseur, vérification de la densité, pesée et conversion en diamètre équivalent.

La taille moyenne du matériel (D50) est de 19.6 mm avec la répartition granulométrique suivante :

$$D_{90} = 28.5 \text{ mm}, D_{75} = 23.0 \text{ mm}, D_{65} = 21.2 \text{ mm}$$

En se référant à la classification de ZINGG, 27 % des éléments ont une forme dite sphérique contre 39 % de disques, 18 % de languettes et 16 % de plaques. Ceci pourrait laisser croire qu'une forte proportion du matériel présente un aplatissement important mais il n'en est rien car bon nombre d'éléments ont un rapport C/B juste inférieur à la limite de la classification de ZINGG et, en fait, plus des deux tiers du matériel présentent un rapport C/B > 0,6.

Une soixantaine de cailloux ont été sélectionnés dans la Burdinale afin d'être utilisés comme éléments tests en flume. Après avoir marqué ces éléments, nous avons effectué les mêmes mesures que pour les éléments constituant le lit. Ces éléments se présentent en deux populations bien distinctes (fig. 1). Les premiers sont relativement proches de la sphère avec un rapport C/B proche de 0,8 et sont principalement constitués de dragées de quartz. Les seconds ont un très bon aplatissement (de l'ordre de 0,3) et sont constitués principalement de phyllades et de schistes.

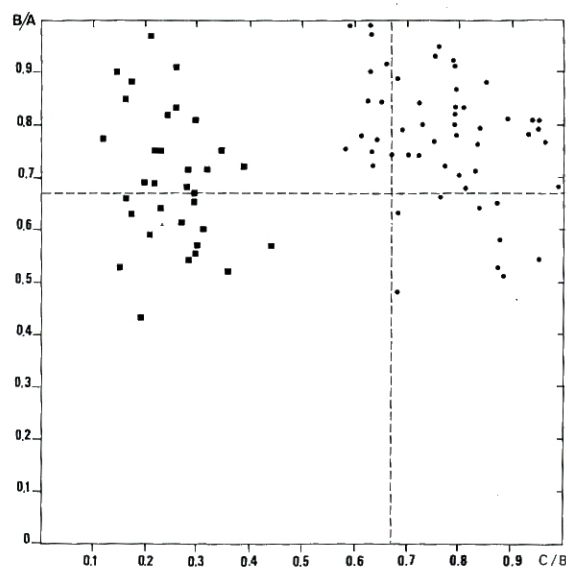


Fig. 1. — Caractéristique des cailloux marqués utilisés en flume (selon la nomenclature de ZINGG) ; A, B, C, représentant respectivement le grand axe, l'axe intermédiaire et le petit axe.

Dans la première série de cailloux, les éléments marqués ont un diamètre compris entre 10.0 mm et 41.5 mm, dans la seconde série leur diamètre varie entre 11.5 mm et 34.5 mm

Évaluation des forces tractrices

Les forces tractrices (τ) ont été évaluées par la méthode basée sur la détermination des vitesses de frottement :

$$\tau = \rho U^{2*} \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique du fluide et

U^* la vitesse de frottement

Cette dernière peut être évaluée à partir de la distribution des vitesses en fonction de la profondeur, qui obéit à une loi logarithmique :

$$\frac{U}{U^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{y_1} \quad (2)$$

où U est la vitesse mesurée à une distance y à partir d'une surface de référence (proche du fond), k est la constante de Von Karman et y_1 un paramètre de rugosité.

En fonction des caractéristiques du flume et du matériel qui constitue le fond, les valeurs suivantes ont été adoptées $k = 0,4$, $y_1 = 1.8$ mm, le niveau de référence à partir duquel y est mesuré se situant à environ $0,2 D$ sous le sommet des particules les plus élevées du lit (D étant le diamètre médian des éléments qui constituent le lit). Une discussion détaillée de ces différents paramètres a été présentée par ailleurs (PETIT, 1989b).

D'autre part, les expériences menées précédemment ont montré qu'il y avait une très bonne concordance entre la force tractrice calculée par l'équation (1) et celle évaluée par la seconde méthode classique qui fait appel à la pente de la ligne d'énergie (PETIT, 1989a). Il s'est également vérifié qu'en présence d'un lit plat sans différenciation sensible des formes du lit - ce qui est le cas dans cette série d'expériences - la force tractrice due à la résistance des formes était négligeable et donc que la force tractrice évaluée par la relation (1) représentait la seule force tractrice due à la résistance des grains, celle-là même qui doit être prise en compte pour la mise en mouvement des particules (PETIT, 1989a).

2. - ÉQUATIONS DE MISE EN MOUVEMENT

Plusieurs relations ont été proposées qui donnent la valeur critique du début d'entraînement des particules en fonction

de leur taille (MILLER *et al.*, 1977). Toutefois la plus utilisée est la fonction de SHIELDS qui donne une relation non dimensionnelle entre la densité du sédiment (ρ_s), le diamètre des grains (D), la densité du fluide (ρ), la viscosité cinématique (ν) l'accélération due à la gravité (g) et la force tractrice exercée sur un grain par le fluide ; de sorte que :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) g \cdot D} = f \left(\frac{U^* D}{\nu} \right) \quad (3)$$

θ est la fonction d'entraînement de Shields et a besoin d'être pourvue d'une valeur critique (θ_c = critère de Shields) afin que cette équation puisse être résolue pour une particule de diamètre déterminé.

D'après le diagramme bien connu de Shields (fig. 2) (MILLER ET *al.* 1977), θ_c varie en fonction de $U^* D/\nu$ (plus communément appelé le "nombre de Reynolds étoilé" noté Re^*) mais pour des lits hydrauliquement rugueux définis par un $Re^* > 10^2$, θ_c devient indépendant des conditions de rugosité et tend à s'approcher d'une valeur constante égale à 0,06 ou encore égale à 0,05 si l'on envisage une probabilité de mise en mouvement des particules égale à 0.5 (GLESSER, 1972). De la sorte, on peut déduire de l'équation (3) une relation linéaire $\tau_c = D$, où τ_c est la force tractrice critique exprimée en $kg \cdot m^{-2}$ et D le diamètre des particules exprimées en cm (BAKER & RITTER, 1975).

Plusieurs études ont mis en évidence des divergences assez sensibles par rapport à cette relation et NEILL (in ANDREWS, 1983) concluait que la valeur limite pour un lit constitué de particule homogène était approximativement de 0,03.

Par ailleurs, CARLING (1983) a montré à partir d'études faites en rivières - dans des conditions de lit pourtant rugueux

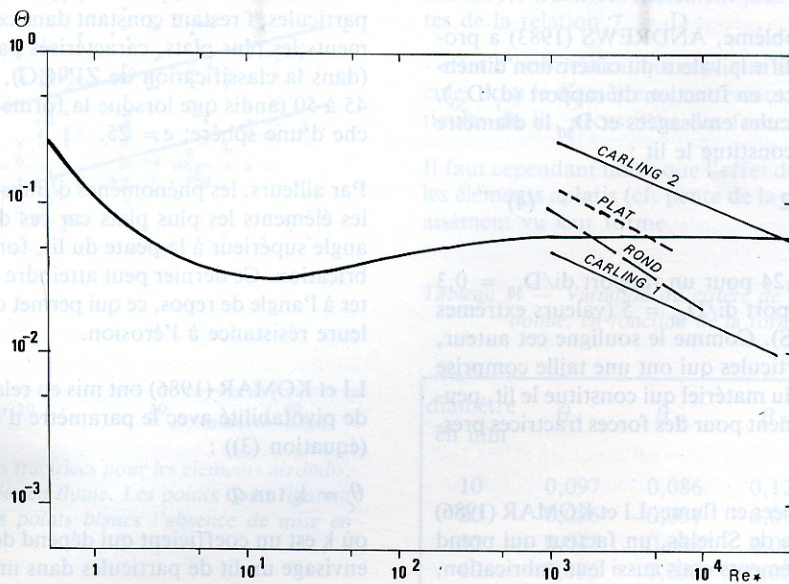


Fig. 2. — Variation du critère adimensionnel de Shields (θ) en fonction du nombre de Reynolds étoilé (Re^*) (d'après GRAF, 1971)

($Re^* > 10^3$) - que θ_c diminuait lorsque Re^* augmentait ; pour l'une des rivières θ_c varie de 0,045 (pour $Re^* = 10^3$) à 0,01 (pour $Re^* = 10^4$) alors que pour une seconde rivière θ_c passe, pour les mêmes valeurs de Re^* , de 0,30 à 0,07 (fig. 2). A noter que ces dernières valeurs sont extrêmement élevées, KOMAR et LI (1986) attribuant cela au fait que, dans son analyse, CARLING a utilisé la force tractrice totale et non la seule force tractrice due à la résistance des grains, la différence entre les deux étant beaucoup plus importante dans la seconde rivière vu ses caractéristiques morphologiques.

Une telle diminution de θ_c en fonction de Re^* a également été mise en évidence par HAMMOND *et al.* (1984) dans un chenal de marée dont le fond est constitué notamment de graviers. Ces auteurs trouvent des valeurs passant de $\theta_c = 0,07$ pour $Re^* = 200$ à $\theta_c = 0,01$ pour $Re^* = 4.10^3$.

Différents éléments entrent en ligne de compte pour expliquer - au moins partiellement - ces variations du critère non dimensionnel de la force tractrice critique. Ainsi, FENTON et ABBOTT (1977) ont étudié en flume, l'effet de saillie relative, c'est-à-dire le degré d'exposition d'un grain individuel sur un lit, composé de mêmes particules dans ce cas. Ainsi, pour des particules se situant au-dessus d'un lit plat - dans les conditions de saillie maximale possible - ces auteurs trouvent une valeur limite égale à 0,01. Lorsque la saillie relative diminue, la valeur de θ_c augmente très rapidement : pour des particules situées au même niveau que le lit, elle vaut 0,10, arrivant à des valeurs plus importantes encore lorsque le sommet des particules se trouve plus bas que la surface du lit.

Ceci implique que les particules nettement plus grossières que celles qui forment le lit, pourront être mises en mouvement pour des valeurs limites plus faibles et, inversement, que ces valeurs limites devront être considérablement plus élevées pour pouvoir éroder des particules plus petites que celles qui forment le lit.

Afin de quantifier ce problème, ANDREWS (1983) a proposé une relation qui modifie la valeur du critère non dimensionnel de la force tractrice, en fonction du rapport (d_i/D_{50}), d_i étant la taille des particules envisagées et D_{50} le diamètre médian du matériel qui constitue le lit :

$$\theta_c = 0.0834 \left(\frac{d_i}{D_{50}} \right)^{-0.872} \quad (4)$$

Ce qui donne un $\theta_c = 0,24$ pour un rapport $d_i/D_{50} = 0,3$ et $\theta_c = 0,02$ pour un rapport $d_i/D_{50} = 5$ (valeurs extrêmes mesurées par ANDREWS). Comme le souligne cet auteur, ceci implique que des particules qui ont une taille comprise entre 0,3 et 4,2 fois celle du matériel qui constitue le lit, peuvent être mises en mouvement pour des forces tractrices presque similaires.

A partir de recherches menées en flume, LI et KOMAR (1986) ont intégré dans le critère de Shields, un facteur qui prend en compte la forme des éléments mais aussi leur imbrication, ceci par le biais de l'angle de pivotabilité. La valeur de cet angle dépend du rapport entre le diamètre de la particule à mettre en mouvement et celui de la particule sur laquelle repose la première. En pratique, on considère que cet angle

de pivotabilité est égal à l'angle de repos ; mais des mesures directes faites notamment par LI et KOMAR (1986) ont abouti à la relation suivante :

$$\Phi = e \left(\frac{d}{D} \right) - f \quad (5)$$

où Φ est l'angle de pivotabilité, d le diamètre d'une sphère sur le lit, D la taille du matériel constituant le lit, e et f des coefficients empiriques dépendant respectivement de la forme des éléments et du classement du matériel du lit.

La valeur de ces coefficients dépend d'abord du rapport d/D . Ainsi, lorsque la particule située sur le lit est de taille identique à celles qui forment le lit, $f = 0$ et $\Phi =$ angle de repos. Si la particule est plus petite e garde sa valeur voisine de 35 et f atteint 0,55 ; lorsque le rapport d/D est supérieur à 1, e reste toujours constant et $f = 0,72$. Ainsi, par exemple, dans ce dernier cas, l'angle de pivotabilité a une valeur plus faible, ce qui traduit en fait une moindre résistance à la mise en mouvement, tout comme cela avait été noté par ANDREWS (1983) notamment.

Ce type de relation rejoint celle mise en évidence par MILLER et BYRNE (1966), entre l'angle de repos et le rapport du diamètre des particules défini par d/D :

$$\Phi_0 = \cos^{-1} \left(\frac{d/D + Z}{d/D + 1} \right) \quad 6$$

Z^* étant considéré comme le niveau moyen du fond de grains mobiles dépendant principalement de la sphéricité et de l'éroussé des particules, avec par exemple comme valeur -0,02 pour du sable avec un indice de sphéricité supérieur à 0,7 (nomenclature de ZINGG), de -0,16 pour des quartzites concassés (indice < 0,6) mais de 0,14 pour des billes de verre.

LI et KOMAR (1986) ont également précisé les valeurs du coefficient e de l'équation (5), en fonction de la forme des particules, f restant constant dans ce cas. Ainsi, pour les éléments les plus plats, caractérisés par un rapport $C/B < 0,6$ (dans la classification de ZINGG), e atteint des valeurs de 45 à 50 tandis que lorsque la forme des éléments se rapproche d'une sphère, $e = 25$.

Par ailleurs, les phénomènes d'imbrication affectent surtout les éléments les plus plats car ces derniers s'entassent à un angle supérieur à la pente du lit, formant un angle dit d'imbrication. Ce dernier peut atteindre 20 à 25° qu'il faut ajouter à l'angle de repos, ce qui permet donc d'opposer une meilleure résistance à l'érosion.

LI et KOMAR (1986) ont mis en relation la valeur de l'angle de pivotabilité avec le paramètre d'entraînement de Shields (équation (3)) :

$$\theta_c = k \tan \Phi \quad (7)$$

où k est un coefficient qui dépend de Re^* . Toutefois, si l'on envisage un lit de particules dans un flux déterminé où Re^* est fixé, k peut être considéré comme constant, de sorte que les variations de θ_c pour les différents types de particules sont dues à Φ seulement. Les résultats peuvent être ainsi ramenés à l'entraînement des sphères, de telle sorte :

$$\frac{\theta_c}{\theta_{cs}} = \frac{\tan \Phi}{\tan \Phi_s} \quad (8)$$

où l'indice s représente les valeurs spécifiques de la sphère.

De cette façon, LI et KOMAR (1986) ont pu montrer que pour des éléments imbriqués, θ_c était 5 à 6 fois supérieur à celui des sphères ; ce rapport est de l'ordre de 3 à 4 fois pour des éléments angulaires et, pour des éléments présentant un bon aplatissement ($C/B < 0,6$), il est de 2,5 fois supérieur à celui de la sphère.

3. - RESULTATS DES EXPERIENCES

Huit séries d'expériences ont été menées avec des pentes du flume comprises entre 5°/100 et 15°/100 et des débits variant de 0.02 à 0.1 m³s⁻¹. Avant chaque série d'expériences, les cailloux marqués étaient disposés sur le fond du flume constitué, rappelons-le, de cailloux fixes, et ensuite le débit était augmenté par étapes successives. Les modifications - mise en mouvement et éventuellement arrêt du mouvement - mais aussi l'absence de mouvement ont été observées pour chacun des éléments marqués et la force tractrice mesurée à l'endroit précis où ces derniers se trouvaient. Les mesures ont été effectuées non seulement à partir du moment où il y avait eu mise en mouvement, mais également en l'absence de mise en mouvement, ceci malgré des conditions dynamiques qui apparaissaient pourtant sévères.

Les résultats sont présentés séparément pour chacun des types de cailloux (fig. 3 et fig. 4).

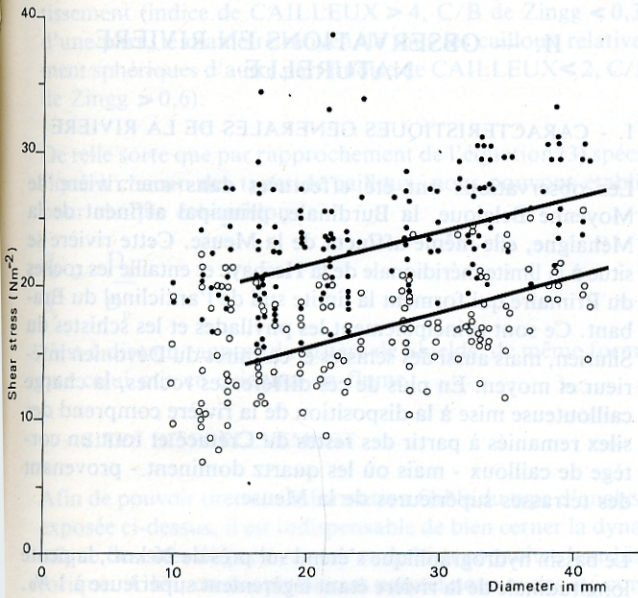


Fig. 3. — Valeurs des forces tractrices pour les éléments arrondis, d'après les expériences menées en flume. Les points noirs figurent la mise en mouvement ; les points blancs l'absence de mise en mouvement.

Deux remarques préliminaires s'imposent :

Tout d'abord, sur chacun des graphiques, deux droites relativement parallèles ont été tracées : l'une représentant la limite

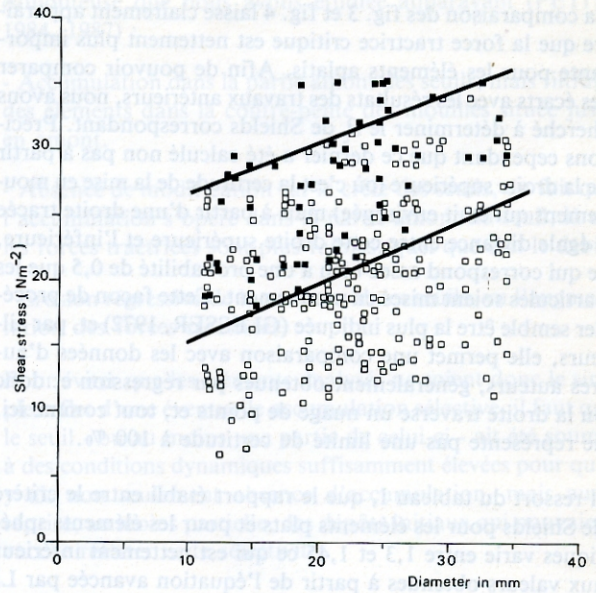


Fig. 4. — Valeurs des forces tractrices pour les éléments aplatis, d'après les expériences menées en flume. Les points noirs figurent la mise en mouvement ; les points blancs l'absence de mise en mouvement.

en dessous de laquelle il est certain qu'il n'y aura pas mise en mouvement, la seconde représentant la limite au-dessus de laquelle il est certain qu'il y aura érosion. Il s'individualise donc une zone intermédiaire où c'est une probabilité plus ou moins grande de mise en mouvement qui doit être prise en compte.

Par ailleurs, quel que soit le type de cailloux, on retrouve à des degrés divers l'influence de certains facteurs mis en évidence dans les précédentes expériences :

- effet de saillie expliquant la mise en mouvement d'éléments plus grossiers que les particules constituant le lit, ceci pour des forces tractrices nettement plus faibles que celles déduites de la relation $\tau_c = D$;
- effet d'imbrication qui explique au contraire que les particules dont le diamètre est nettement inférieur à celui des particules du lit, nécessitent des forces tractrices plus élevées.

Il faut cependant noter que l'effet de saillie joue moins pour les éléments aplatis (cf. pente de la droite), ce qui se conçoit aisément vu leur forme.

Tableau 1. — Variation du critère de Shields, pour un diamètre donné, en fonction de la forme des particules.

diamètre en mm	θ_s	θ_{ss}	θ_p	θ_p/θ_s	θ_p/θ_{ss}
10	0,097	0,086	0,127	1,31	1,42
20	0,056	0,051	0,078	1,39	1,53
30	0,043	0,038	0,061	1,421	1,61
40	0,036	0,032	0,052	1,43	1,63

Indice s pour les éléments arrondis (première population)
 Indice p pour les éléments aplatis (deuxième population)
 Indice ss pour les sphères (voir texte ci-dessous)

La comparaison des fig. 3 et fig. 4 laisse clairement apparaître que la force tractrice critique est nettement plus importante pour les éléments aplatis. Afin de pouvoir comparer ces écarts avec les résultats des travaux antérieurs, nous avons cherché à déterminer le θ_c de Shields correspondant. Précisons cependant que ce dernier a été calculé non pas à partir de la droite supérieure (où c'est la certitude de la mise en mouvement qui était envisagée) mais à partir d'une droite tracée à égale distance entre cette droite supérieure et l'inférieure, ce qui correspond assez bien à une probabilité de 0,5 que les particules soient mises en mouvement. Cette façon de procéder semble être la plus indiquée (GLESSER, 1972) et, par ailleurs, elle permet une comparaison avec les données d'autres auteurs, généralement obtenues par régression et donc où la droite traverse un nuage de points et, tout comme ici, ne représente pas une limite de certitude à 100 %.

Il ressort du tableau I, que le rapport établi entre le critère de Shields pour les éléments plats et pour les éléments sphériques varie entre 1,3 et 1,45 ce qui est nettement inférieur aux valeurs obtenues à partir de l'équation avancée par LI et KOMAR. Il faut cependant préciser que les cailloux utilisés dans notre première population ne sont pas des sphères parfaites (cf. fig. 1), ce qui atténue évidemment le rapport θ_p/θ_s . Pour cette raison, nous avons construit un diagramme similaire à la fig. 3 et calculé les valeurs du critère de Shields correspondant, en ne considérant que les sept cailloux marqués qui se rapprochent le plus de la sphère, avec un rapport $B/A > 0,75$ et $C/B > 0,85$ (cf. position de ces points dans la fig. 1). Ces valeurs reprises au tableau I (θ_{ss}), sont de fait moins élevées que pour l'ensemble de la population des cailloux de premier type, ce qui donne certes un rapport θ_p/θ_{ss} plus élevé (de 1,42 - 1,63) mais encore bien inférieur à celui avancé par LI et KOMAR. Ajoutons par ailleurs que l'application de l'équation (6) proposée par MILLER et BYRNE, avec un $Z^* = -0,02$ pour la première population de cailloux, un $Z^* = -0,16$ pour la seconde, donnerait un rapport maximum de 1,21. Si même $Z^* = +0,14$ était retenu pour les éléments les plus sphériques, ceci donnerait un rapport de 1,50. Les valeurs mises en évidence dans notre expérience se rapprochent donc bien de cette dernière équation.

D'autre part, les valeurs du critère de Shields sont de façon générale fort élevées, nettement supérieures au $\theta_c = 0,03$ avancé par NEILL (in ANDREWS, 1983) en synthèse de sa revue bibliographique, et même au $\theta_c = 0,06$ initialement proposé dans la relation de Shields. Tout comme CARLING (1983) et HAMMOND *et al.* (1984), nous trouvons une évolution de θ_c avec Re^* bien que nous sommes dans la partie du diagramme de Shields, où, en principe, θ est constant (fig. 2).

Les valeurs élevées de θ_c et sa diminution en fonction de Re^* - et donc de la taille des particules - reflètent les effets combinés de la saillie d'un côté, de l'imbrication de l'autre.

Au sujet de cette dernière tout d'abord, rappelons les valeurs mises en évidence par FENTON et ABBOTT (1977) pour des particules dont le sommet est plus bas que celui du lit - et donc, notamment, pour des plus petites particules - ou encore celles déduites de la relation d'ANDREWS (1983) où les particules plus petites que celles qui forment le lit résistent à des

forces tractrices très élevées ($\theta_c = 0,154$ pour un rapport $d_p/D_{50} = 0,5$ par exemple) pouvant même arriver jusqu'à 6 fois la valeur nécessaire à la mise en mouvement d'une sphère libre (LI & KOMAR, 1986). Cet effet d'imbrication a été confirmé - mais dans un rapport bien moins élevé que celui de LI & KOMAR - par les travaux de REID et FROSTICK (1984) en rivières, ces auteurs montrant que les forces tractrices nécessaires à l'initiation du mouvement de petites particules au sein d'un matériel hétérogène, devraient parfois être jusqu'à trois fois supérieures aux forces tractrices qui suffisent à l'entretien du mouvement de ces petits éléments.

En ce qui concerne la saillie relative, rappelons les valeurs mises en évidence par FENTON et ABBOTT (1977) : $\theta = 0,010$ pour une saillie maximale possible. C'est un effet similaire qui avait été mis en évidence dans nos précédentes expériences effectuées notamment avec un cailloux marqué de 80 mm ($\theta = 0,020$). Cette valeur correspond bien aux résultats obtenus par POESEN (1987) à partir d'expériences menées dans des ravines d'érosion développées sur sol limoneux, cet auteur concluant que la valeur du critère de Shields la plus indiquée pour mobiliser des éléments isolés - dont un cailloux marqué de 90 mm de diamètre - était de l'ordre de 0,015.

Ainsi, mis à part ce double effet d'imbrication et de saillie, il ressort de nos expériences que les éléments plats résistent mieux à l'érosion que les éléments sphériques suivant un rapport $\theta_p/\theta_{ss} = 1,5$, valeur qui cadre très bien avec celle déduite de l'équation de MILLER & BYRNE, mais de loin inférieure à celle déduite de la relation de LI & KOMAR (rapport voisin de 2,5).

II. — OBSERVATIONS EN RIVIERE NATURELLE

1. - CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA RIVIERE

Les observations ont été effectuées dans une rivière de Moyenne Belgique, la Burdinale, principal affluent de la Méhaigne, elle-même affluent de la Meuse. Cette rivière se situe à la limite méridionale de la Hesbaye et entaille les roches du Primaire qui forment la limite sud de l'anticlinal du Brabant. Ce sont principalement les phyllades et les schistes du Silurien, mais aussi des schistes et calcaires du Dévonien inférieur et moyen. En plus de ces différentes roches, la charge caillouteuse mise à la disposition de la rivière comprend des silex remaniés à partir des restes du Crétacé et tout un cortège de cailloux - mais où les quartz dominent - provenant des terrasses supérieures de la Meuse.

Le bassin hydrographique s'étend sur près de 26 km², la pente longitudinale de la rivière étant légèrement supérieure à 1 ‰. Le débit de la rivière est connu grâce à deux stations limnigraphiques que nous avons installées, l'une en tête de bassin (7 km²), l'autre à proximité de la confluence ; chacun de ces limnigraphes est couplé avec une lame déversante en paroi mince (LAMALLE, 1987) La réponse des débits aux précipitations est relativement rapide, vu les pentes du bassin (indice de pente de Roche = 0.093) et son affectation du sol (plus de 60 % de cultures). La valeur du débit à pleins bords représente approximativement 2,2 m³ s⁻¹, sa récurrence

n'étant pas encore déterminée étant donné que la série d'observation est trop courte (à partir de 1985).

2. - METHODES D'ETUDES

Un secteur de rivière long d'un peu moins de 100 m a été équipé de façon à pouvoir suivre les modifications géomorphologiques de la rivière et y mesurer de façon précise les paramètres qui permettent d'évaluer les forces tractrices par les deux approches classiques.

Par ailleurs, les lames déversantes se présentant en quelque sorte comme des pièges à sédiments, des repères et des plateaux ont été installés juste en amont de ces dernières de façon à avoir des indications concernant la charge de fond transportée par la rivière : quantité, mais aussi caractéristiques.

Ces équipements ont été effectués afin de connaître les sites où des lots de cailloux ont été prélevés. Le fait que des éléments soient présents dans un même site implique qu'ils ont pu résister à des forces tractrices de la même importance ; le fait que ces éléments puissent avoir une taille différente - en fonction même de leur forme - permet donc de cerner de façon indirecte l'effet de la forme comme facteur de résistance à l'érosion.

Ceci demande une analyse du matériel élément par élément. Ainsi, dans chaque échantillon, nous avons mesuré tous les cailloux suivant les trois dimensions puis déterminé, après pesée, le diamètre équivalent de chacun d'entre eux. Ensuite, pour un même échantillon, nous avons calculé séparément le diamètre moyen de tous les cailloux présentant un fort aplatissement (indice de CAILLEUX > 4 , C/B de Zingg $< 0,3$) d'une part, le diamètre moyen de tous les cailloux relativement sphériques d'autre part (indice de CAILLEUX < 2 , C/B de Zingg $> 0,6$).

De telle sorte que par rapprochement de l'équation (3) spécifique à chacun des types de cailloux, nous pouvons établir pour chaque échantillon :

$$\theta_p = \frac{D_s}{D_p}$$

c'est à dire un rapport du critère de Shields, de même forme que celui mis en évidence en flume.

3. - SITES DE PRELEVEMENT

Afin de pouvoir tirer une information fiable du type d'analyse exposée ci-dessus, il est indispensable de bien cerner la dynamique des sites de prélèvement et de bien connaître leur historique. Ainsi, un des problèmes auquel nous avons été confrontés est d'être certain que la différence de taille du matériel analysé est bien le résultat d'une résistance différentielle à l'érosion et non celui, par exemple, d'une accumulation sélective. Pour les raisons que l'analyse suivante va montrer, les seuils offrent à cet égard, de meilleures garanties.

Les relevés topographiques effectués sur la Burdinale montrent que les seuils présentent une dynamique assez proche de celle mise en évidence sur une autre rivière à charge

caillouteuse que nous avons étudiée auparavant (PETIT, 1984, 1987) :

- Accumulation dans la partie amont des seuils, mais filtrage des éléments dans la contre-pente des mouilles située juste en amont.

- Absence de modification sur la crête des seuils, du fait que l'accumulation s'opère dans la partie amont du seuil, là où les forces tractrices sont plus faibles, quel que soit le débit.

- Erosion régressive de la partie aval des seuils, vu l'augmentation des forces tractrices.

Pour éviter que les éléments analysés ne soient donc le simple reflet d'une éventuelle accumulation sélective, il faut que le seuil - ou au moins une partie de celui-ci - ait été soumis à des conditions dynamiques suffisamment élevées pour qu'il y ait non seulement absence d'accumulation, mais aussi reprise, au moins partielle, des dépôts initiaux qui pouvaient encore refléter cette sélectivité.

Ceci implique que les conditions dynamiques aient été supérieures aux conditions qui ont présidé à l'accumulation, ou, en d'autres termes, il faut, pour que les mesures soient significatives, qu'une crue supérieure à celle qui a permis l'édification, se soit présentée dans l'intervalle qui sépare le moment de l'édification de celui de la mesure. Il est cependant tout à fait possible d'avoir une érosion pour un débit inférieur à celui qui a permis l'accumulation. C'est notamment le cas à la suite de modifications morphologiques telles que le recul du système seuil (la zone initiale d'accumulation devenant une zone d'érosion) ou de modifications de l'organisation du courant et donc des forces tractrices ponctuelles (changement de point d'impact,...). Ce dernier point paraît toutefois plus aléatoire alors que le recul en bloc du système seuil s'inscrit dans une tendance générale.

Ainsi, la crête du seuil - site initialement d'accumulation - a eu l'occasion de subir bien des crues qui ont permis le décapage sélectif de sa surface ; de plus, dans cette zone, les forces tractrices tendent à augmenter pour un même débit, vu le recul du seuil. De tels sites offrent donc le plus de garanties de présenter une réelle surface de résistance à l'érosion et c'est donc à cet endroit que nous avons prélevé l'essentiel des échantillons. Toutefois, des prélèvements ont également été effectués dans le piège à sédiments après qu'une crue importante se soit produite, le matériel piégé donnant, comme on le verra ci-dessous, une évaluation indirecte des conditions de transport, probablement à la suite d'un charriage généralisé, tel que décrit par exemple dans "Sedimentary rapport Seminar" (1965).

4. - RESULTATS

Tout d'abord, trois lots de cailloux ont été prélevés sur un même seuil ; des contrôles topographiques successifs ont été effectués et mis en relation avec les séquences des débits de façon à cerner l'évolution précise des sites. Celle-ci est présentée brièvement pour chacun des lieux de prélèvement.

Ech. 1 : dallage de la partie stabilisée du seuil ; matériel résistant à des crues voisines du débit à pleins bords ;

Ech. 2 : matériel sous-jacent à celui du dallage, actuellement protégé par ce dernier, mais dont les éléments représentent une ancienne surface de résistance ;

Ech. 3 : dallage situé légèrement en amont de la crête du seuil, dans la zone d'accumulation encore active ; le dépôt s'est constitué pour des débits voisins du débit à pleins bords et a été soumis ultérieurement à des crues plus importantes.

Les valeurs des diamètres moyens par type de cailloux sont présentés au tableau II.

TABLEAU II : Diamètre moyen par classe de cailloux dans trois sites d'un seuil (en mm)

	D_p	D_s	$D_s/D_p = \theta_p/\theta_s$
Ech. 1	16.5 (19)	20.1 (20)	1,22
Ech. 2	8.1 (12)	10.7 (24)	1.32
Ech. 3	9.2 (18)	11.9 (15)	1,29

N.B. : Les valeurs entre parenthèses représentent le nombre de mesures.

Les éléments arrondis présentent systématiquement un diamètre supérieur à celui des éléments plats (rapport de l'ordre de 1,3) ou, en d'autres termes, ceux-ci résistent mieux à la mise en mouvement, confirmant nos observations faites en flume, les rapports étant par ailleurs très proches les uns des autres.

D'autre part, plusieurs séries de prélèvements ont été effectuées lorsque le piège à sédiments a été vidé. Le fait de prélever des cailloux — spécialement de forme différente — situé exactement aux mêmes endroits dans le piège, permet d'obtenir des équivalences analogues à celles mises en évidence sur les seuils sauf que dans ce cas, on considère, non pas la résistance à l'érosion, mais, vu l'arrêt forcé des éléments, des conditions de transport identique.

Les valeurs des diamètres ont été regroupées en fonction du type de cailloux, le facteur discriminant étant l'aplatissement (indice de CAILLEUX inférieur à 2 d'une part, supérieur à 4 d'autre part) (tableau III) :

TABLEAU III : Diamètre moyen par classe de cailloux dans différents endroits du piège à sédiments (en mm)

	D_p	D_s	D_s/D_p
Ech. 1	34.5 (5)	19.0 (5)	0,55
Ech. 2	32.0 (6)	18.6 (5)	0,58
Ech. 3	40.7 (10)	22.1 (3)	0,54
Ech. 4	36.3 (5)	20.0 (5)	0,55

N.B. : Les valeurs entre parenthèses représentent le nombre de mesures.

Le rapport est ici totalement inversé, avec une valeur moyenne de l'ordre de 0,55, signifiant que les éléments plats transportés sous certaines conditions de force tractrice peuvent être presque deux fois plus gros que les éléments sphériques.

Cette analyse a été faite après une crue importante ($5m^3s^{-1}$) où les forces tractrices ont atteint des valeurs très élevées, conditions nécessaires pour mobiliser les éléments aplatis que l'on retrouve dans le piège. Ces conditions tendent donc à se rapprocher de celles décrites dans le compte-rendu de "Sedimentary Petrology Seminar" (1965) et tout comme observé par ces auteurs, les éléments les plus grossiers sont ceux qui présentent un fort aplatissement.

Ces observations impliquent deux points dans la dynamique de la rivière. Tout d'abord les forces tractrices doivent, dans les sites où les éléments aplatis sont érodés, être près de 2,5 fois plus importante ($1.30/0.55$) que dans les sites où ces éléments sont arrêtés. Par ailleurs, la remise en mouvement de ces cailloux dans les sites où ils s'étaient arrêtés, nécessite des forces tractrices 2,5 fois supérieures à celles qui ont permis l'édification du dépôt, ceci intervenant dans l'érosion sélective observée sur les seuils.

A cet égard, nous poursuivons les relevés de terrain afin de proposer un modèle qui envisage les variations des forces tractrices dans les différents sites en fonction des débits ainsi que les variations latérales de ces dernières ; ces observations étant couplées avec des expériences faites avec des cailloux marqués.

III. CONCLUSIONS

Les expériences menées en flume avec des cailloux marqués de forme différente, montrent que les éléments aplatis ($C/B < 0,2$ dans la classification de Zingg) résistent beaucoup mieux à l'érosion que les éléments arrondis ($C/B = > 0,6$) avec un rapport moyen des critères de Shields respectifs voisin de 1,3 ; ce rapport atteignant 1,5 lorsqu'on utilise comme référence des cailloux proches de la sphère ($B/A > 0,7$, $C/B > 0,8$). De tels rapports sont proches de ceux déduits de l'équation présentée par MILLER & BYRNE (1966), mais sont, par contre, plus faibles que ceux déduits de l'équation proposée par LI & KOMAR (1986).

L'analyse en rivière naturelle des éléments aplatis et arrondis qui forment conjointement le dallage des seuils et qui se présentent comme une surface de résistance à l'érosion, confirme les rapports des critères de Shields mis en évidence en flume.

Par contre, des indications concernant des conditions de transport identiques ont été obtenues grâce à l'analyse de cailloux de forme différente prélevés aux mêmes places d'un piège à sédiments, après une crue importante. En accord avec JOHANSSON (1976), les cailloux aplatis restent en mouvement pour des forces tractrices plus faibles (le rapport étant de l'ordre de 0,55) ou, en d'autres termes, une force tractrice identique peut assurer le transport d'éléments plats deux fois plus gros que les éléments arrondis.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les Professeurs J. ALEXANDRE et A. PISSART (Université de Liège) ainsi que le Ir M. MEUNIER (CEMAGREF - Grenoble) d'avoir bien voulu relire cet article et me faire part de leurs remarques. Tous mes remerciements s'adressent également au Professeur A. SUNDBORG et au Professeur J. NORRMAN (Université d'Uppsala, Suède) pour leur accueil dans leur Laboratoire. Mes différents séjours en Suède ont été rendus possibles grâce à l'appui du "Fonds National de la Recherche Scientifique" de la "Communauté française de Belgique" et du "Swedish Institute", Organismes que je remercie vivement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDREWS, E.A., 1983. Entrainment of gravel from naturally sorted riverbed material. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 1225-1231.
- BAKER, V.R. & RITTER, D.F., 1975. Competence of rivers to transport coarse bedload material. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, 975-978.
- CARLING, P.A., 1983. Threshold of coarse sediment transport in broad and narrow natural streams. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 8, 1-18.
- FENTON, J.D. & ABBOT, J.E., 1977. Initial movement of grains on a stream bed : the effect of relative protrusion. *Proc. R. Soc. London, A* 352, 523-537.
- GESSLER, J., 1971. Beginning and ceasing of sediment motion. in *River mechanisms*, SHEN Ed. Fort Collins Colorado, Ch 7 - 22 p.
- GRAF, W.H., 1971. *Hydraulics of sediment transport*, Mc Graw Hill, 513 p.
- HAMMOND F.D.C., HEATHERSHAW AD. and LANGHORNE DN., 1984. A comparison between Shields' threshold criterion and the movement of loosely packed gravel in a tidal channel. *Sedimentol.*, 31, 51-62.
- JOHANSSON, C.E., 1963. Orientation of pebbles in running water - A laboratory study. *Geog. Ann.*, 45, 85-112.
- JOHANSSON, E., 1976. Structural studies of frictional sediments. *Geog. Ann.*, 58A, 201-302.
- KOMAR, P.D. & LI, Z., 1986. Pivoting analyses of the selective entrainment of sediments by shape and size with application to gravel threshold. *Sedimentol.*, 33, 425-436.
- LAMALLE, C., 1987. Les transports en suspension et en solution dans la Burdinale. Mémoire de Licence en Sc. Géog., conservé à l'Univ. de Liège, 193 p.
- LANE, E.W. & CARLSON, E., 1954. Some observations on the effect of particle shape on the movement of coarse sediments. *Trans. Amer. Geophysical Union*, 35, 453-462.
- LI, Z. & KOMAR P.D., 1986. Laboratory measurements of pivoting angles for applications to selective entrainment of gravel in a current. *Sedimentol.*, 33, 413-423.
- MILLER, R.L. & BYRNE R.J., 1966. The angle of repose for a single grain on a fixed rough bed. *Sedimentol.*, 6, 303-314.
- MILLER, M.C., Mc CAVE, I.N. and KOMAR, P.D., 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentol.*, 24, 507-527.
- PETIT, F., 1984. Les processus contrôlant l'évolution du tracé d'une rivière ardennaise. *Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd* 49,95-109.
- PETIT, F., 1987. The relationships between shear stress and the shaping of the bed of a pebble loaded river, *CATENA*, 14-5, 453-468.
- PETIT, F., 1989a. The evaluation of grain shear stress from experiments in a pebble-bedded flume. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 14, 499-508.
- PETIT, F., 1989b. Critical shear stress from experiments conducted in a pebble-bedded flume. *Geog. Ann.* (Soumis pour publication).
- POESEN, J., 1987. Transport of rock fragments by rill flow : A field study. *CATENA Suppl.* 8, Rill erosion, BRYAN Ed., 35-54.
- REID, I. & FROSTICK, L.E., 1984. Particle interaction and its effect on the thresholds of initial and final bedload motion in coarse alluvial channels. in *Sedimentology of gravels and conglomerates - Canadian Society of Petroleum Geologists*, KOSTER & STEEL Eds. Memoir 10, 61-68.
- Sedimentary Petrology Seminar (1965) : Gravel fabric in Wolf Run, *Sedimentol.*, 4, 273-283.
- TRICART, J. 1965 Observations sur le charriage des matériaux grossiers par les cours d'eau. *Revue de Géom. Dyn.*, XII, 3-15.