

## **Quatrième partie**

# **Traitement d'images en Géomorphologie**



# *Analyse de la forme des particules sédimentaires*

## Sommaire

---

<b>8.1</b>	<b>Objectifs du projet</b>	<b>196</b>
8.1.1	Du côté des géographes	196
8.1.2	Du côté des informaticiens	197
<b>8.2</b>	<b>Forme des particules sédimentaires</b>	<b>198</b>
8.2.1	Taille, forme et émoussé : définitions et intérêt	198
8.2.2	Description de la forme des particules	199
<b>8.3</b>	<b>Définition et calcul de paramètres</b>	<b>202</b>
8.3.1	Paramètre de taille	202
8.3.2	Paramètres de forme	202
8.3.3	Paramètres d'émoussé	203
<b>8.4</b>	<b>Évaluation des paramètres de forme</b>	<b>204</b>
8.4.1	Évaluation sur le diagramme de Krumbein	204
8.4.2	Évaluation longitudinale	206
<b>8.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>212</b>

---

Les travaux décrits dans ce chapitre prennent leur source dans notre volonté d’appliquer nos recherches à des problèmes pratiques, rencontrés en Sciences Humaines et Sociales, notamment en Géographie. Ils ont été menés en collaboration avec Hervé Piégay, géographe, directeur de recherche au CNRS à l’UMR 5600 Environnement-Ville-Société, d’abord lors de mon stage de Master recherche, puis au cours de ma thèse dans le cadre du projet PEPS TAIGE (Traitement Automatique de l’Image pour la Géographie Environnementale). Un article issu de ce projet est paru dans la revue pluridisciplinaire *Computers & Geosciences* [Roussillon *et al.*, 2009a].

## 8.1 Objectifs du projet

Les objectifs sont multiples, puisque nos propres objectifs se superposent à ceux des géographes.

### 8.1.1 Du côté des géographes

L’objectif des géographes est d’établir la *carte d’identité* de galets déposés dans le lit d’un cours d’eau. Un *galet* est un caillou, plus ou moins poli et arrondi sous l’action de l’eau et qui se trouve le plus souvent sur le rivage des mers et des océans ou dans le lit des cours d’eau. Pour ne pas perdre en généralité, nous emploierons aussi l’expression générique “particules sédimentaires” qui recouvre l’ensemble des particules déposées, quelle que soit leur taille : sable, gravier, galets, etc. Cette carte d’identité est un ensemble de variables quantitatives caractérisant la taille et la forme d’un galet.

Les mesures sont encore souvent prises manuellement. Par exemple, pour déterminer la taille d’une particule, on essaie de lui faire traverser un tamis à mailles carrées de grosseur croissante. Pour évaluer l’émoussé d’une particule, c’est-à-dire le degré auquel elle a été arrondie, on la compare visuellement à des images de particules standards et on lui affecte la valeur du modèle le plus similaire.

Toutes ces opérations prennent énormément de temps, ce qui contraint les géographes à n’étudier que de petits tronçons de cours d’eau. Pour pouvoir mener des études à l’échelle d’un bassin-versant, les géographes souhaitent automatiser le calcul de ces mesures à partir de l’analyse d’images numériques acquises selon un protocole rapide.

Ce protocole est répété pour un certain nombre de lots d’une centaine de galets, prélevés le long du lit d’un cours d’eau et de ses affluents : pour chaque lot, les galets sont posés selon leur plan de projection maximale sur un support de couleur rouge et un opérateur prend en photo la planche de galets du dessus, à l’aide d’un appareil photo numérique (fig. 8.1).

Un effet de bord de l’automatisation est la minimisation de la variabilité intra- et inter-observateur concomitante aux mesures manuelles.



FIG. 8.1 – Photo à traiter pour l’analyse de la forme des galets

### 8.1.2 Du côté des informaticiens

Un projet complet tel que celui-là, fondé sur l’analyse d’images, est pour nous une source intarissable de problèmes géométriques et de données. Nous avons discuté avec les géographes des problèmes d’acquisition, de compression et de résolution. Mais nous n’avons pas travaillé ensemble assez tôt et nous avons souvent dû traiter le mieux possible des images existantes.

La géométrie intervient largement dans ce projet. Au cours de la tâche de segmentation, nous devons détecter, filtrer, dissocier des objets caractérisés aux moyens de propriétés géométriques. Au cours de la tâche de description, nous devons estimer des quantités géométriques, comme l’aire, le périmètre, la courbure, et calculer des mesures comme la convexité, la circularité, l’élongation, l’émoussé, pour établir la carte d’identité des objets d’intérêt, correspondant à la silhouette des galets.

Nous avons l’objectif de réaliser tous ces calculs au moyen d’algorithmes les plus efficaces possibles. Pour cela, la géométrie discrète est un cadre de travail formidable où l’utilisation exclusive de nombres entiers élimine les erreurs d’approximation et simplifie les calculs.

Nous avons aussi l’objectif d’étudier les limitations des mesures existantes, d’en proposer de nouvelles, cohérentes avec la nature discrète des données, et d’étudier la meilleure façon de les calculer.

## 8.2 Forme des particules sédimentaires

### 8.2.1 Taille, forme et émoussé : définitions et intérêt

Une particule est observée à partir de critères de taille, de forme, d'orientation (par rapport à l'axe du cours d'eau) et de lithologie [Diepenbroek *et al.*, 1992]. Par la suite, nous ne nous intéressons qu'aux caractéristiques géométriques que sont la taille et la forme.

La taille d'une particule correspond à la largeur de la plus petite maille carrée par laquelle la particule peut passer. Cette définition de la taille comme "taille du tamis" est héritée des analyses granulométriques. Elles étaient effectuées à l'aide de tamis à mailles carrées d'ouvertures croissantes, de sorte que les particules soient classées selon leur taille.

La forme (*shape* en anglais) est caractérisée par sa forme globale ou sphéricité (*form* ou *sphericity*), l'émoussé (*roundness*) et la texture de surface (*surface texture*) [Diepenbroek *et al.*, 1992; Drevin et Vincent, 2002] (fig. 8.2).

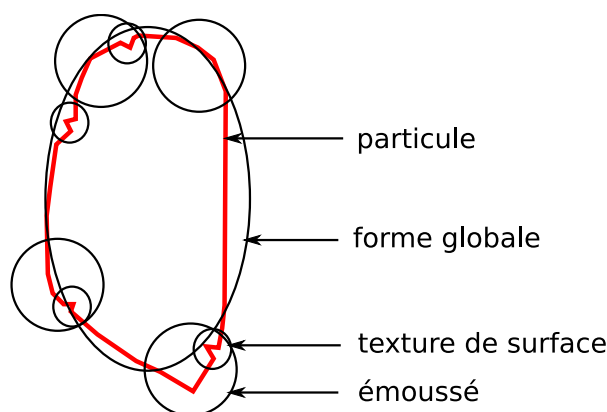


FIG. 8.2 – Sphéricité, émoussé et texture de surface.

La forme globale d'une particule est généralement évaluée en comparaison avec une forme standard. C'est la sphère qui est la plupart du temps cette forme standard, car elle est la forme pour laquelle, *mutatis mutandis*, la durée entre la mise en mouvement de la particule par le cours d'eau et son dépôt est minimale [Wadell, 1932].

Le terme *émoussé* désigne ce qui est devenu moins anguleux sous une action érosive. C'est une mesure du degré d'érosion des arêtes et des angles d'une particule. Dans l'expression "une particule émoussée", il est synonyme du terme *arrondi*. Mais ce terme est inadapté, car il contient le mot *rond* qui est souvent associé au cercle ou à la sphère. Bien qu'une sphère soit émoussée, une particule peut être émoussée sans être une sphère et inversement [Wadell, 1932].

Enfin, la texture de surface correspond à la rugosité de la surface d'une particule. Par la suite, nous ne nous intéressons pas à la texture de surface qui ne peut être perçue qu'avec des images à très haute résolution.

La forme d'une particule est un caractère très étudié parce qu'il est expliqué par la lithologie et un ensemble de conditions environnementales [Krumbein, 1941]. A mesure que

les forces de frottement liées à la rugosité du lit et à la charge deviennent plus importantes que la force de gravité, à mesure que la compétence du cours d'eau diminue, les particules sont triées vers l'aval selon leur taille et leur densité. Dès qu'une particule est mise en mouvement, elle commence à sédimenter, c'est-à-dire à se déposer sous l'action de la pesanteur. A taille et densité égales, une particule sphérique sédimente plus vite qu'une particule non sphérique [Wadell, 1932]. En effet, elle est plus facilement déplacée par le cours d'eau (par roulage ou par suspension) et par conséquent, elle est déplacée loin, mais peu longtemps et donc rapidement déposée. On comprend donc qu'un changement dans les conditions de transport (débit, charge, etc.), comme c'est le cas lors d'une crue par exemple, peut entraîner un changement en taille, densité et sphéricité des dépôts [Krumbein, 1941].

Étant augmentée principalement par l'abrasion et l'usure, la valeur d'émoissé est quant à elle un indicateur de la distance de transport d'une particule avant son dépôt [Krumbein, 1941]. L'étude de l'émoissé de particules prélevées dans le lit d'un cours d'eau permet donc de déterminer l'existence d'entrées sédimentaires d'origine naturelle (sapement d'une terrasse alluviale) ou anthropique (rejet de résidus miniers) ou de discontinuité dans les processus d'entrées et de transfert de la charge sédimentaire. Ce type d'information est très important pour les géographes censés guider les gestionnaires dans la mise en place d'une politique de gestion durable de la ressource sédimentaire. En effet, les conséquences possibles de telles entrées sédimentaires posent de nombreux problèmes : élargissement du lit, augmentation du risque d'inondation à l'aval, engravement des ouvrages, érosion des berges, etc. Hervé Piégay, géographe, directeur de recherche au CNRS à l'UMR 5600 Environnement-Ville-Société, avec qui nous travaillons, a déjà mené plusieurs recherches portant sur cette thématique. Elles ont été conduites sur les bassins versants de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion et plus récemment sur l'Ouvèze et le Progo en Indonésie. Elles ont été financées par l'Europe, l'Etat français, l'Office National des Forêts (ONF) et l'Agence de l'Eau.

### 8.2.2 Description de la forme des particules

A l'origine, tous les calculs de forme ne pouvaient être réalisés que manuellement. Aux indices complexes, voire impossibles à calculer, étaient donc souvent substitués des indices plus simples à mettre en œuvre.

La sphéricité d'une particule a été définie initialement par Wadell [1932], comme étant le rapport entre la surface de la particule et la surface de la sphère de même volume, puis par Krumbein [1941], comme étant le rapport du volume de la particule au volume de la sphère circonscrite. Dans cette dernière définition, pour simplifier le calcul du volume de la particule, celle-ci est supposée être une ellipsoïde et par conséquent est complètement caractérisée par le rapport entre l'axe intermédiaire et le grand axe, et le rapport entre le petit axe et l'axe intermédiaire. La longueur des axes est mesurée à partir d'un calibre à barre coulissante [Krumbein, 1941].

L'émoissé d'une particule a été défini initialement par [Wadell, 1932]. Cette mesure d'émoissé, pourtant reconnue comme la plus précise de toutes, a été rarement utilisée car elle nécessite un temps très long de calcul [Pissart *et al.*, 1998]. Pour chaque particule, il

s'agit de mesurer, dans les trois plans orthogonaux ou seulement dans le plan de projection maximale, le rayon de courbure de chaque angle. Un angle est une partie du contour dont le rayon de courbure est inférieur au rayon du plus grand cercle inscrit. Le rayon de courbure moyen des angles rapporté au rayon du plus grand cercle inscrit donne l'émoissé de la particule [Wadell, 1932] (fig. 8.3). Notons qu'aucune définition de la courbure n'est donné dans le texte original. Afin de raccourcir le temps nécessaire aux mesures, Krumbein [1941] créa le diagramme qui porte son nom (fig. 8.4). Ce diagramme associe des imagettes de galets à leur émoissé mesuré par la méthode de Wadell. Ainsi, pour déterminer l'émoissé d'un galet, il suffit de le comparer visuellement aux imagettes standard de galets d'émoissé connu.

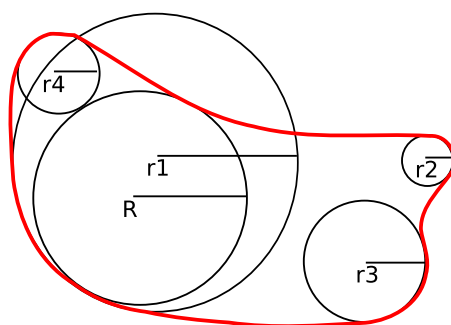


FIG. 8.3 – L'indice d'émoissé de Wadell [1932]. Les rayons  $r_2$ ,  $r_3$  et  $r_4$  étant inférieurs au rayon  $R$  du plus grand cercle inscrit, définissent et mesurent des angles. En revanche, le cercle de rayon  $r_1$ , étant plus grand que le plus grand cercle inscrit, ne définit et ne mesure aucun angle.

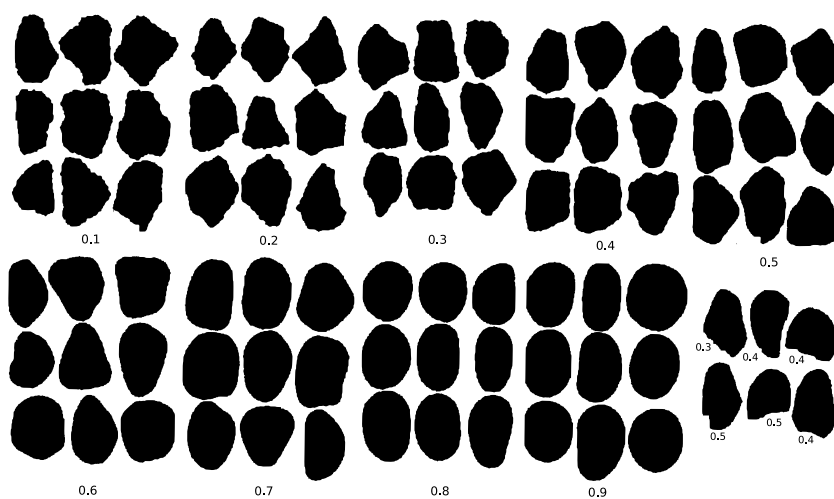


FIG. 8.4 – Diagramme de Krumbein [1941].

## 8.2. Forme des particules sédimentaires

---

D'autres mesures d'émoissé ont été proposées ensuite. Dans les pays francophones, l'indice d'émoissé de A. Cailleux s'est imposé : c'est le rapport entre le plus petit rayon de courbure et la distance maximale entre deux points du contour du galet, le tout multiplié par 2000 [Pissart *et al.*, 1998]. Les mesures d'émoissé de Cailleux sont au moins 5 fois plus longues à déterminer et sont plus dispersées que les mesures d'émoissé issues du diagramme de Krumbein. La mesure du plus petit rayon de courbure implique une plus grande variabilité inter-observateur que la comparaison visuelle que nécessite la méthode de Krumbein [Pissart *et al.*, 1998].

Aujourd'hui, avec le développement des techniques d'analyse d'image, nous pouvons nous affranchir de ces contraintes par l'automatisation du calcul de l'indice d'émoissé de A. Cailleux et de l'indice d'émoissé de Wadell (qui permettrait aussi de simuler la méthode de Krumbein). A notre connaissance et selon Hervé Piégay, spécialiste du domaine, personne n'a encore implémenté ces indices d'émoissé. En revanche, plusieurs méthodes produisent un indice d'émoissé linéairement corrélé aux valeurs du diagramme de Krumbein, utilisées comme une "vérité-terrain".

La majorité des méthodes de détermination de l'émoissé utilise la transformée de Fourier. La méthode de Diepenbroek *et al.* [1992] est la plus récente et la plus aboutie. Cette méthode considère un échantillon de 64 points du contour de la particule. La transformée de Fourier est appliquée à la distance au centre de gravité de ces 64 points. Aux 24 premiers coefficients de Fourier, divisés par le coefficient 0 pour éliminer l'information de taille, est retranché le spectre de l'ellipse du meilleur ajustement, obtenue à partir des coefficients 1 et 2, pour éliminer l'information de forme globale. Enfin, une somme des coefficients obtenus pondérée empiriquement donne la mesure d'émoissé. Cette mesure est linéairement corrélée aux valeurs du diagramme de Krumbein à 94%.

Deux méthodes alternatives, utilisant l'ouverture morphologique, ont été proposées par Drevin et Vincent [2002]. Dans la première méthode, orientée région, une ouverture morphologique est appliquée à une image binaire 2D. L'ouverture morphologique consiste en l'application successive des opérations d'érosion et de dilatation avec un même élément structurant, de sorte que les détails de la forme, comme les "caps" ou les "isthmes" sont supprimés sans rétrécissement général de la forme. Le rapport entre l'aire de la particule avant et après ouverture morphologique donne une première mesure d'émoissé. Avec un élément structurant circulaire dont le rayon représente 42% du rayon du plus grand cercle inscrit, cette mesure est linéairement corrélée aux valeurs du diagramme de Krumbein à 96%. La seconde méthode, orientée contour, considère un échantillon de 1024 points du contour de la particule. Une ouverture morphologique est appliquée à l'histogramme 1D qui associe à chacun des 1024 points du contour, sa distance au centre de gravité. Le rapport entre l'aire de l'histogramme après et avant ouverture morphologique donne une seconde mesure d'émoissé. Avec un élément structurant linéaire de 512 points de long, cette mesure est linéairement corrélée aux valeurs du diagramme de Krumbein à 93%.

Dans un article assez récent de Hayakawa et Oguchi [2005], plusieurs indices de sphéricité (dont ceux de [Wadell, 1932] et de [Krumbein, 1941]) ont été calculés à partir de modèles 3D de particules obtenus à l'aide d'un scanner laser (13500 dollars américains en Décembre 2004). Ce scanner a la forme d'une boîte dans laquelle on place la particule (dimen-

sions maximales : 254mm de diamètre et 406mm de hauteur). Des infrarouges (680nm de longueur d’onde) sont envoyés sur la particule et un capteur détecte la lumière renvoyée par l’objet, puis produit un signal converti en données numériques.

Pour les géographes, l’approche 3D est séduisante à condition que sa mise en œuvre soit raisonnablement simple et rapide. Dans l’exemple précédent, cette condition n’est pas remplie, puisque les graviers ont dû être préalablement emportés et lavés et que chaque gravier est ensuite scanné pendant environ 20 minutes [Hayakawa et Oguchi, 2005]. En outre, si la sphéricité est avant tout une définition 3D, il est possible et non sans intérêt d’appréhender la forme globale et l’émoussé d’une forme bidimensionnelle.

## 8.3 Définition et calcul de paramètres

La forme des particules est appréhendée à travers la forme de leur silhouette. La silhouette est l’étendue maximale du plan couverte par la projection de la particule. Sur cette silhouette sont calculés des paramètres de taille, de forme et d’émoussé, définis en étroite collaboration avec les géographes.

### 8.3.1 Paramètre de taille

En géomorphologie, les paramètres de taille les plus fréquemment utilisés sont les longueurs des trois axes principaux :  $a$  (le grand axe),  $b$  (l’axe intermédiaire),  $c$  (le petit axe). La méthode des “rotating calipers” (section 2.3.2) fournit une estimation de  $a$  et  $b$  à partir de la silhouette. Nous considérons que  $b$  est représentatif de la taille de la particule [Bunte et Abt, 2001] puisqu’il donne une bonne approximation de la “taille du tamis” (section 8.2.1).

### 8.3.2 Paramètres de forme

Pour les géographes, la **circularité** est le rapport entre le périmètre de la silhouette et le périmètre de la silhouette du disque de même aire, car c’est l’équivalent bidimensionnel de la sphéricité de Wadell [1932].

Si  $P_S$  et  $A_S$  représentent respectivement le périmètre et l’aire de la silhouette, la formule est :

$$\text{circularité} = \frac{P_S}{2\sqrt{A_S\pi}} \quad (8.1)$$

Ce paramètre est une variante du descripteur classique de compacité [Haralick, 1974] en analyse d’images. Bien qu’il possède de nombreux inconvénients, il offre une approximation rapide de la circularité, adaptée au contexte de notre application :

- la mesure n’est pas comprise dans l’intervalle  $]0; 1]$  et ne vaut pas 1 pour tous les cercles discrets, mais ce comportement est négligeable car aucune silhouette n’est

### 8.3. Définition et calcul de paramètres

---

parfaitement circulaire. De plus, le bruit de mesure disparaît dans la variabilité statistique des silhouettes.

- la mesure est dépendante de la résolution, mais celle-ci est contrôlée et stable dans l’application.
- la mesure n’est pas calculable sur une partie d’une silhouette, mais toute la silhouette est disponible.

Ce travail a été source de motivations pour définir une mesure de circularité qui convienne à la nature discrète des données et qui dépassent ces limitations (section 6.4.1).

La circularité confond l’information de taille, d’élongation, de convexité et d’émoussé. Nous proposons d’étudier ces caractères indépendamment grâce aux paramètres suivants :

L’**élongation** est égale au rapport entre  $b$ , l’axe intermédiaire, et  $a$ , le grand axe, calculés par la méthode des “rotating calipers” (section 2.3.2) :

$$\text{élongation} = \frac{b}{a} \quad (8.2)$$

La **convexité** est définie comme le rapport entre l’aire de la silhouette ( $A_S$ ) et l’aire de son enveloppe convexe ( $A_{CH}$ ) :

$$\text{convexité} = \frac{A_S}{A_{CH}} \quad (8.3)$$

Cette mesure vérifie un ensemble de propriétés fondamentales quand l’aire est quantifiée par dénombrement de points (section 3.3).

#### 8.3.3 Paramètres d’émoussé

Wadell [1932] a défini son indice d’émoussé comme suit :

$$rW = \frac{1}{k.R} \sum_{i=1}^k r_i \quad (8.4)$$

où  $r_i$  est le  $i$ ème rayon de courbure inférieur ou égal au rayon de courbure  $R$  du plus grand disque inscrit et  $k$  est le nombre de tels rayons (section 8.2.2).

Le calcul de  $rW$  suit trois étapes :

1. Le rayon de courbure est estimé en chaque point en utilisant l’algorithme de Nguyen et Debled-Rennesson [2007]. Pour être robuste, cette méthode repose sur le calcul de *segments flous*, ou selon la terminologie du chapitre 4, de parties  $\alpha$ -linéaires avec  $\alpha = 0.5$ ;
2. Le rayon du plus grand disque inscrit est déterminé à l’aide de la transformée en distance de la silhouette [Hirata, 1996] ;
3.  $rW$  est calculé en appliquant l’équation 8.4. Seuls les points dont le rayon de courbure est inférieur ou égal au rayon de courbure du plus grand cercle inscrit est pris en compte.

Pour comparaison, nous avons aussi calculé la mesure d'émoissé proposé par Drevin et Vincent [2002]. Cette mesure repose sur des opérations morphologiques :

$$rD = \frac{A_{S \oplus C(o, r_c) \ominus C(o, r_c)}}{A_S} \quad (8.5)$$

où  $A_{S \oplus C(o, r_c) \ominus C(o, r_c)}$  est l'aire de la silhouette après ouverture morphologique avec un élément structurant circulaire  $C$  de centre  $o$  et rayon  $r_c$ . Les opérateurs  $\oplus$  et  $\ominus$  représentent respectivement l'addition de Minkowski (dilatation) et la soustraction de Minkowski (érosion). Le rayon  $r_c$  est fixé à 75% du rayon  $R$  du plus grand disque inscrit, car c'est le pourcentage pour lequel  $rD$  a la meilleure corrélation avec le diagramme de Krumbein (section 8.4.1).

Enfin, nous avons aussi calculé, sur la demande des géographes, le rapport entre le périmètre de la silhouette ( $P_S$ ) et celui de l'ellipse de meilleure approximation ( $P_e$ ) :

$$rP = \frac{P_S}{P_e} \quad (8.6)$$

Puisque la circularité consiste à comparer la silhouette avec un cercle, ce qui mélange l'information d'élongation et d'émoissé, l'idée est de comparer la silhouette avec une ellipse, à la place d'un cercle, afin de supprimer l'impact de l'élongation et de ne conserver que l'émoissé [Cotted, 2006].

## 8.4 Évaluation des paramètres de forme

Les paramètres de forme définis dans la section précédente sont évalués sur les imagettes artificielles du diagramme de Krumbein qui sert de "vérité-terrain", puis sur des données réelles acquises sur le terrain.

### 8.4.1 Évaluation sur le diagramme de Krumbein

Nous avons calculé nos paramètres sur l'ensemble des imagettes du diagramme de Krumbein (fig. 8.4). Une image scannée du diagramme a été acquise par les géographes qui voulaient tester leur propre prototype de mesure automatique d'émoissé. L'image obtenue, de format jpeg, est de dimensions  $3528 \times 2148$  (soit plus de 7 millions et demi de pixels). Elle comporte 81 silhouettes de galets, réparties en 9 classes d'émoissé de valeur 0.1, 0.2, ..., 0.9.

Nous arrivons assez bien à classer les imagettes du diagramme de Krumbein en calculant automatiquement leur émoissé. Plusieurs paramètres permettent ce classement. Le tableau 8.1 montre que notre implémentation de l'indice d'émoissé de Wadell ( $rW$ ) est le paramètre le mieux corrélé aux valeurs du diagramme de Krumbein (à 92%). Ce résultat est rassurant car Krumbein a utilisé la méthode de Wadell pour classer ses imagettes de galets standards (section 8.2).

#### 8.4. Évaluation des paramètres de forme

---

paramètres	coefficient de corrélation	
	valeurs individuelles ( $n = 81$ )	valeurs moyennes ( $n = 9$ )
$b$	0.065	0.153
$b/a$	0.057	0.199
$rD$	0.847	0.967
$rW$	<b>0.919</b>	<b>0.992</b>
$rP$	0.899	0.979
circularité	-0.844	-0.984
convexité	0.895	0.972

TAB. 8.1 – Corrélation entre les valeurs données par le diagramme de Krumbein et celles que nous avons calculées ( $b$ : taille,  $b/a$ : élongation,  $rD$ : émoussé de Drevin,  $rW$ : émoussé de Wadell,  $rP$ : rapport entre les périmètres de la particule et de l'ellipse de meilleure approximation).

Les coefficients de corrélation que nous avons calculés sont inférieurs à ceux donnés dans la littérature (section 8.2). En particulier, notre implémentation de la méthode de Drevin *et al.* mène à une corrélation de 85% (contre 96% dans l'article de référence [Drevin et Vincent, 2002]). Pourtant, notre implémentation est fondée sur une distance euclidienne exacte. Outre ces différences d'implémentation, nous pensons que c'est davantage une différence dans la qualité des images utilisées qui explique la différence de résultat. Une comparaison n'est valable que pour des mesures calculées sur une même image. Par ailleurs, si la méthode de G. R. Drevin *et al.* donne de meilleurs résultats en étant appliquée sur une autre image du diagramme de Krumbein, alors nous pouvons raisonnablement croire en une augmentation du coefficient de corrélation obtenu à l'aide de notre implémentation de la méthode de Wadell. Cependant, nous ne pourrions jamais expliquer complètement les valeurs du diagramme de Krumbein, à cause de la perte d'information résultant de la discrétisation des valeurs. Pour les neuf imagettes de galets appartenant à une même classe, les valeurs d'émoussé obtenues par Krumbein à l'aide la méthode de Wadell sont sans doute distribuées autour de l'unique valeur donnée par le diagramme. Mais nous ne savons plus rien sur la distribution de ces valeurs.

En outre, les valeurs calculées à l'aide de notre implémentation de la méthode de Wadell sont différentes des valeurs données par le diagramme, pourtant *a priori* calculées par la même méthode, mais manuellement (fig. 8.5). Les valeurs provenant de notre implémentation de la méthode Wadell sont égales à 0,5, pour les imagettes de galets les moins émoussés et sont égales à 0,8, pour les imagettes de galets les plus émoussés. Si cela est surprenant, cela s'explique simplement. A notre connaissance et selon Hervé Piégay, personne n'a défini la courbure et personne n'a déterminé la taille à partir de laquelle une aspérité du galet doit être prise en compte dans le calcul. Ce vide méthodologique explique aussi la forte variabilité inter-observateur de l'indice d'émoussé de Cailleux mise en évidence dans [Pissart *et al.*, 1998] (section 8.2). D'ailleurs, il n'est pas sûr qu'un expert appliquant la méthode de Wadell aux imagettes du diagramme de Krumbein trouve les valeurs indiquées sur le

diagramme. Cette question, dont on comprend qu'elle soit importante dans le cas d'un calcul "à la main", reste posée dans le cas d'un calcul automatique effectué sur l'image numérique d'un galet. En effet, la subjectivité de l'observateur est remplacée par la résolution de l'appareil utilisé et la distance à laquelle est prise la photographie. Une aspérité du galet ne sera pas prise en compte dans le calcul de l'indice d'émoissé de Wadell, si elle est inférieure à un pixel de l'image. En revanche, une aspérité invisible à l'oeil nu, ou trop petite pour être prise en compte pour un calcul "à la main", peut correspondre à une zone de plusieurs pixels dans l'image et par conséquent être prise en compte dans le calcul automatique effectué sur l'image numérique du galet.

Pour prédire les valeurs du diagramme de Krumbein, on peut multiplier les valeurs de notre implémentation de l'indice d'émoissé de Wadell par le coefficient directeur de la droite de régression (2,4462) (fig. 8.5.a) et leur ajouter son ordonnée à l'origine (-1,0798). Comme les hypothèses structurelles et stochastiques du modèle linéaire général (dont la normalité des résidus) sont vérifiées, nous pouvons mesurer la confiance à accorder à cette prédiction. Pour une valeur de  $rW$ , nous pouvons prédire la valeur du diagramme de Krumbein à plus ou moins 0,1933 avec une certitude de 95% (fig. 8.5.a). Pour 100 valeurs de  $rW$ , nous pouvons prédire la valeur du diagramme de Krumbein à plus ou moins 0,0193 avec une certitude de 95%, ce qui devient intéressant.

Nous avons aussi étudié la corrélation des concepts théoriquement indépendants de taille, d'élongation et d'émoissé. Quel que soit le paramètre utilisé pour estimer l'émoissé, ces études montrent une absence de corrélation entre chacun de ses paramètres, la taille et l'élongation.

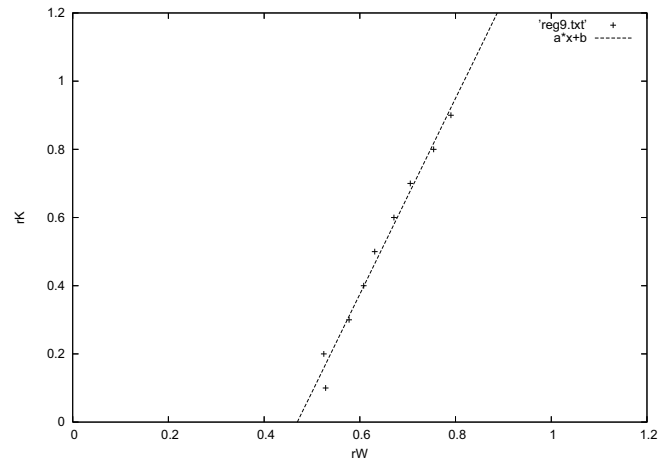
### 8.4.2 Évaluation longitudinale

Nos mesures ont été appliquées à l'analyse de la forme de galets prélevés dans le lit du Progo, un fleuve indonésien localisé sur l'île de Java, près de Yogyakarta (fig. 8.6). Le cours d'eau est long de 135 kilomètres, a un bassin-versant de 2400 kilomètres carrés et draine plusieurs volcans. À l'est se trouve le Merapi (2900 mètres d'altitude), tandis qu'à l'ouest se trouve le Sumbing et le Sundoro (3200 et 3100 mètres d'altitude respectivement). La source du fleuve se trouve sur le côté nord du Sundoro à 2500 mètres d'altitude. Environ 2500 galets d'andésite ont été aléatoirement échantillonnés le long du cours d'eau. L'intérêt du Progo est qu'il transporte des galets de même lithologie : l'andésite. L'étude de l'émoissé des galets, qui doit être menée pour des galets de même nature pour être interprétée est donc possible. Entre 2 et 5 photos ont été prises sur 25 stations distantes en moyenne de 5 kilomètres. Ces images sont stockées dans des fichiers de format jpeg (compressé) de dimensions  $1600 \times 1200$  (soit presque 2 millions de pixels). Chaque image comprend la silhouette d'une cinquantaine de galets de sorte que 105 galets en moyenne par station sont analysés (min = 73; max = 154).

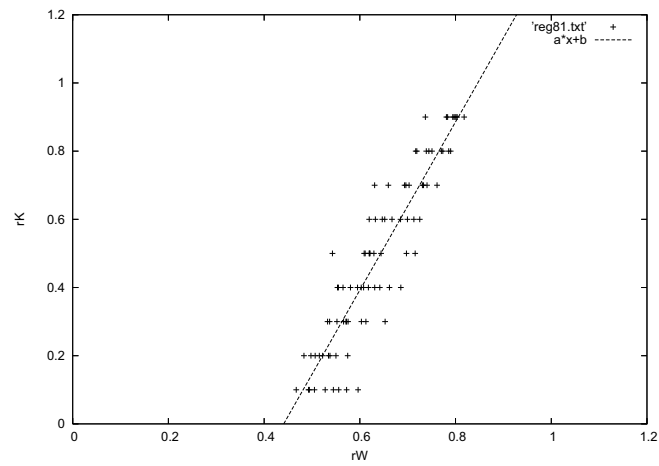
Pour obtenir le contour des galets, une étape préalable qui sert à dissocier les silhouettes de galets de tout le reste est nécessaire. Cette tâche est rendue possible grâce au caractère contrôlé des images acquises. Les galets sont en effet tous photographiés sur un support de couleur rouge. Néanmoins un seuillage dans le canal rouge ne permet pas de binariser

## 8.4. Évaluation des paramètres de forme

---



(a)



(b)

FIG. 8.5 – Corrélation entre  $rW$  et les valeurs du diagramme de Krumbein  $rK$  calculée sur les valeurs individuelles en (a) et sur les moyennes par classes en (b).

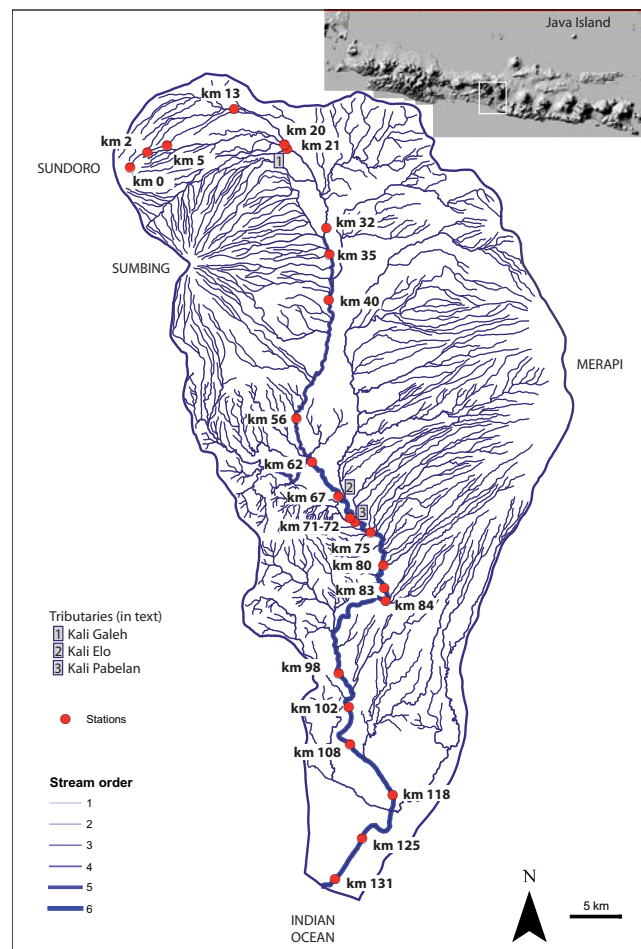


FIG. 8.6 – Bassin-versant du fleuve Progo, Ile de Java, Indonésie. La structure du réseau hydrographique est fortement contrôlée par les volcans. Les 25 stations se trouvent le long du cours d'eau principal du volcan Sundoro (en haut) à l'Océan Indien (en bas). Leur distance à la source (en km) est indiquée.

## 8.4. Évaluation des paramètres de forme

---

correctement les images, car les conditions d'éclairage varient. Par exemple, des zones d'ombre peuvent apparaître sur le bord des galets. Pour que la binarisation soit insensible à ces variations, elle est effectuée par apprentissage non supervisé (k-moyennes). A partir de ces images binaires, les contours sont extraits par suivi après un étiquetage en composantes connexes. Le résultat de la binarisation est suffisamment correct (fig. 8.7) pour que nous n'ayons pas eu le besoin d'implémenter de méthode plus sophistiquée. Cependant, certains problèmes demeurent : impuretés (fig. 8.8.a), galets collés (fig. 8.8.b), galets mouillés (fig. 8.8.c). Ces contours dégradés sont éliminés manuellement ou automatiquement.



FIG. 8.7 – Zooms sur deux photographies.

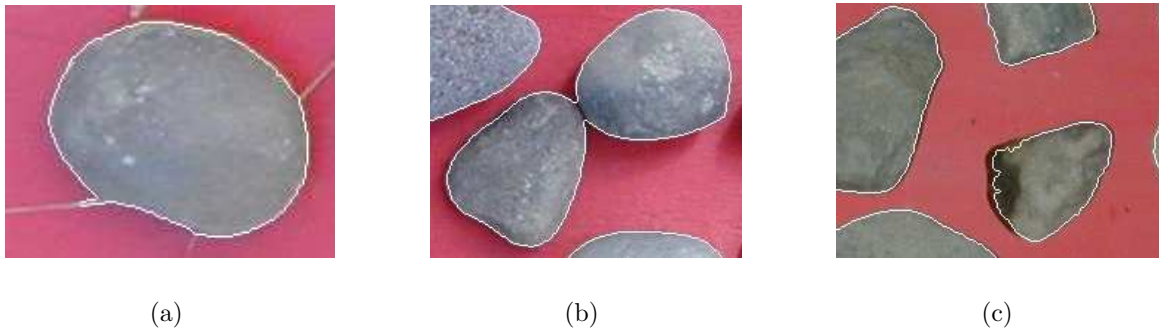


FIG. 8.8 – Silhouettes de galets dégradées.

Ces images nous ont posé de nombreux problèmes géométriques et fourni de nombreux contours sur lesquels tester nos solutions. Par exemple, nous avons utilisé notre algorithme de décomposition robuste en parties convexes et concaves (section 3.3.3) pour dissocier les contours de deux galets collés (fig. 8.8.b), ou pour éliminer des excroissances anormales (fig. 8.8.a). Ces opérations aboutissent à découper un contour en parties. Pour minimiser le nombre de contours rejetés, nous avons cherché à définir des mesures applicables aux parties de contour obtenues. La mesure de circularité classique [Haralick, 1974] que nous avons commencé par utiliser dans cette application ne le permet pas, tandis que la mesure

que nous avons défini au paragraphe 6.4 le permet. Ces applications sont décrites dans deux de nos articles [Roussillon *et al.*, 2008a, 2010].

Pour comparer les stations le long du cours d'eau, il est nécessaire que les galets soient de taille similaire [Bunte et Abt, 2001]. Les premier et dernier déciles sont respectivement 51 et 87 millimètres de largeur (axe intermédiaire  $b$ ). Les valeurs moyennes de largeur ne sont statistiquement pas différentes d'une station à l'autre. Les données étudiées peuvent donc être interprétées, car elles concernent des galets de même taille (et de même lithologie).

Pour chaque échantillon de galets, caractérisé par sa distance à la source, nous avons calculé la valeur moyenne de chaque paramètre, ainsi que son intervalle de confiance à 95%, puisque les galets sont supposés être tirés aléatoirement. La fig. 8.9 décrit le motif longitudinal de chaque paramètre le long du cours d'eau.

L'évolution des valeurs des différents paramètres ne suit pas de tendance linéaire claire, ce qui indique que l'origine des particules du cours d'eau principal est multiple. La tendance longitudinale la plus évidente est celle obtenue par la convexité (le coefficient de détermination  $r^2$  vaut 0.035). Chaque paramètre possède un motif unique. Cependant,  $rP$  et la circularité sont hautement corrélés ( $r^2 = 0.928$ ). De même, la convexité et la circularité sont aussi fortement corrélés ( $r^2 = 0.899$ ). L'indice d'émoissé de Wadell  $rW$  est le paramètre qui est le moins corrélé avec les autres. La meilleure corrélation est observée avec  $rD$  ( $r^2 = 0.76$ ) et le coefficient de détermination est inférieur à 0.63 avec les autres paramètres. Un motif général similaire peut être observé pour la plupart des paramètres :

- Les particules les plus anguleuses se trouvent surtout à l'amont, notamment dans la station située à la source du fleuve. Dans les stations suivantes, une tendance nette à l'arrondi se dessine jusqu'au kilomètre 20 pour  $rP$ ,  $rD$ , la convexité et la circularité et jusqu'au kilomètre 50 pour  $rW$ .
- Pour tous les paramètres, une diminution significative de l'arrondi est observée entre les kilomètres 60 et 80.
- A l'aval, tous les paramètres indiquent une augmentation significative de l'arrondi entre les kilomètres 80 et 100. Ensuite, les valeurs sont plutôt stables jusqu'au kilomètre 130. A l'exception de  $rW$ , les valeurs obtenues sont égales ou supérieures ( $rP$ , convexité) à celles observées entre les kilomètres 25 et 50. Les particules les plus rondes sont celles de la station aval, ou proches de celle-ci ( $rP$ , circularité, convexité).

D'un point de vue thématique, l'accroissement de l'émoissé observé dans la partie amont du bassin-versant est net, car aucune entrée de particules plus anguleuses ne provoque de discontinuité dans le processus d'abrasion. Seul le Kali Galeh amène de nouvelles particules au kilomètre 21. Ce phénomène est détecté par certains paramètres, mais ne brise pas la tendance. Ajuster les valeurs de  $rW$  ou  $rP$  permet de prévoir l'évolution de l'émoissé dans un environnement d'andésite :  $rW = 0.002km + 0.69$  avec  $r^2 = 0.87$  et  $\text{Log}(rP) = 0.009\text{Log}(km) + 0.69$  avec  $r^2 = 0.90$ . Ces résultats soulignent que deux de nos paramètres mettent en relief un accroissement d'émoissé sur une assez longue distance (de 20 à 50 kilomètres). Les travaux précédents montraient que l'accroissement d'émoissé n'était visible que sur les particules relevées près de la source (de 0 à 20 kilomètres) [Pissart *et al.*, 1998]. Nos paramètres sont aussi assez robustes pour mettre en évidence, dans la partie intermédiaire du tracé, une entrée sédimentaire majeure, due au Merapi, volcan

## 8.4. Évaluation des paramètres de forme

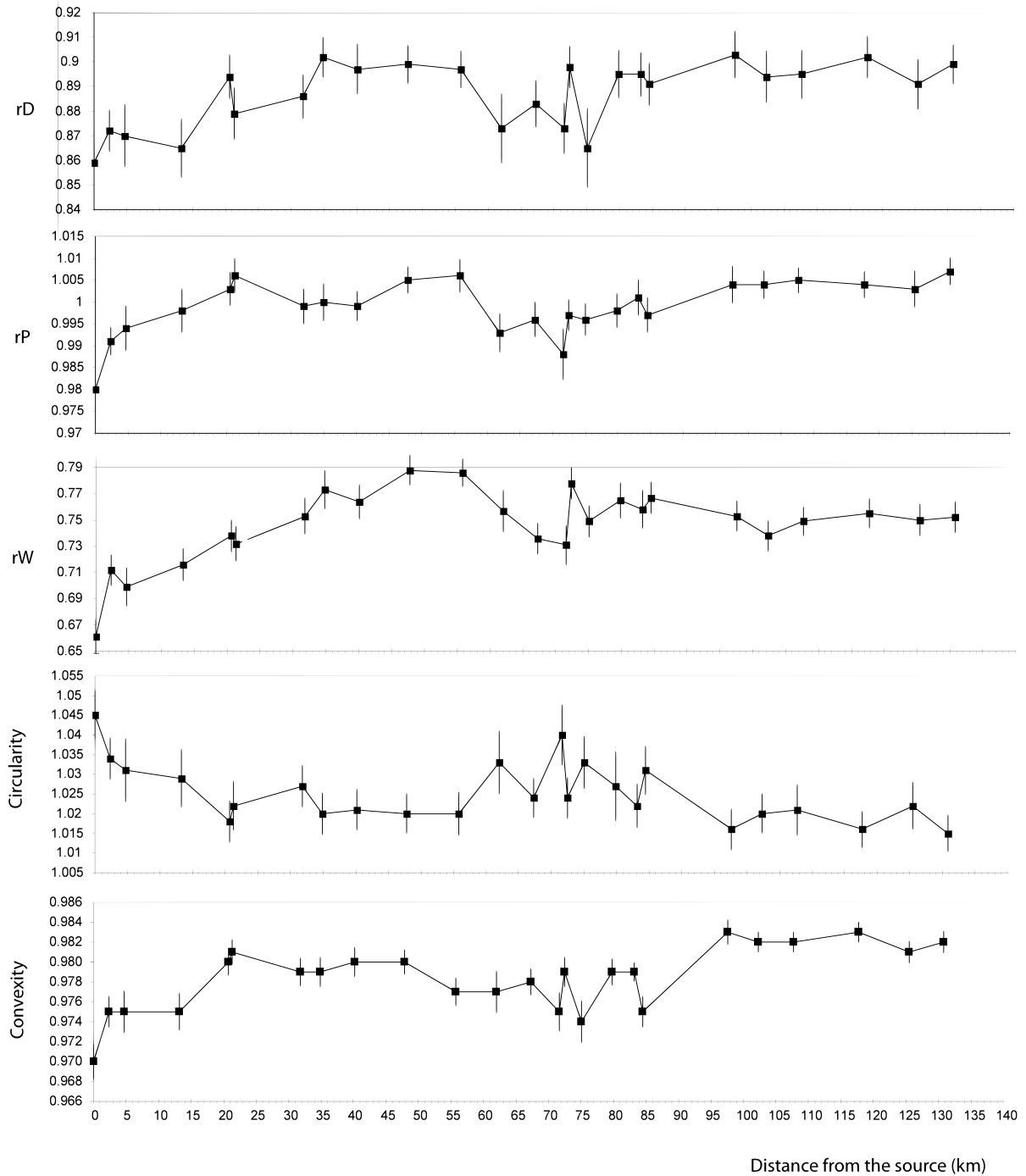


FIG. 8.9 – Motif longitudinal de notre implémentation de la méthode de Wadell  $rW$ , de la méthode de Drevin  $rD$ , du rapport des périmètres  $rP$ , de la circularité et de la convexité, de la source du fleuve Progo (kilomètre 0) à l’Océan Indien (kilomètre 130).

actif situé sur le côté est du fleuve. Ce volcan est une source de particules anguleuses qui perturbent la tendance longitudinale. La distance qui sépare le sommet du Merapi du cours d'eau principal est environ de 25-30 kilomètres seulement. Les valeurs atteintes par les paramètres d'éroulé  $rW$  et  $rD$  entre les kilomètres 60 et 80 sont similaires à celles observées entre les kilomètres 25 et 30 du cours d'eau principal. Ainsi, le processus d'abrasion sur les pentes du Merapi est similaire à celui observé sur le Sandoro. La diminution de l'arrondi apparaît dès les stations des kilomètres 62 et 67, c'est-à-dire avant la confluence avec le Kali Elo et le Kali Pabelan qui drainent le Merapi. Ceci indique que les entrées sédimentaires ne sont pas seulement liées au réseau hydrographique. Elles proviennent aussi du matériel fourni par le Merapi, stocké dans des nappes alluviales et déversé par sapement.

Les tendances observées à l'aval, au-delà du kilomètre 85, sont difficiles à interpréter car les différents indicateurs ont des motifs contrastés. Une combinaison des paramètres dans une analyse multivariée pourrait caractériser le processus d'abrasion sur une plus longue distance et mettre en évidence un éventuel changement d'échelle dans l'évolution de la forme des particules. Nous pouvons supposer que les zones anguleuses des particules s'arrondissent dans un premier temps ( $rW$  est alors le paramètre le plus adapté pour saisir ces changements), et que la forme générale des particules évolue dans un second temps ( $rP$ , la convexité et la circularité sont alors les paramètres les plus adaptés pour étudier ces modifications).

## 8.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le principal projet auquel nous avons participé et qui a été à la fois source de motivations et source de données sur lesquelles nous avons pu tester certains algorithmes développés durant cette thèse. Ce travail a été mené en collaboration avec des géographes qui souhaitaient établir la carte d'identité des galets déposés dans le lit d'un cours d'eau. Ces informations peuvent guider les décideurs dans la mise en place d'une politique de gestion durable de la ressource sédimentaire afin de prévenir les risques d'inondations, d'élargissement du lit, d'engrèvement des ouvrages, d'érosion des berges, etc. L'automatisation des mesures par analyse d'images minimise la variabilité intra- et inter-observateur et minimise le temps passé sur le terrain, ce qui rend possible des études à l'échelle de tout un bassin-versant.

Nous avons défini un certain nombre de paramètres décrivant la forme des galets. A la différence des travaux précédents, dans lesquels des techniques d'analyse d'images classiques étaient utilisées (transformée de Fourier ou morphologie mathématique), nous avons choisi de travailler dans le cadre de la géométrie discrète. Cela nous a permis d'implémenter certaines méthodes non automatiques, réputées être précises, mais difficiles à mettre en œuvre manuellement. En outre, de nouveaux problèmes fondamentaux ont été soulevés, comme la définition et le calcul de mesures vérifiant des propriétés en adéquation avec la nature discrète des données.

Nos paramètres ont été évalués sur des données artificielles ainsi que sur des données issues de photos numériques de planches de galets prélevés dans le lit du Progo, fleuve d'In-

## 8.5. Conclusion

---

donésie. Les résultats obtenus confirment et complètent les travaux précédents et ouvrent des perspectives nouvelles pour les géographes, grâce à l'automatisation des calculs.