

Institut Fourier — Université de Grenoble I

*Actes du séminaire de*  
**Théorie spectrale  
et géométrie**

Vincent BORRELLI

**Courbure discrète ponctuelle**

Volume 25 (2006-2007), p. 25-39.

[http://tsg.cedram.org/item?id=TSG\\_2006-2007\\_\\_25\\_\\_25\\_0](http://tsg.cedram.org/item?id=TSG_2006-2007__25__25_0)

© Institut Fourier, 2006-2007, tous droits réservés.

L'accès aux articles du Séminaire de théorie spectrale et géométrie (<http://tsg.cedram.org/>), implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://tsg.cedram.org/legal/>).

**cedram**

*Article mis en ligne dans le cadre du*  
*Centre de diffusion des revues académiques de mathématiques*  
<http://www.cedram.org/>

## COURBURE DISCRÈTE PONCTUELLE

Vincent Borrelli

RÉSUMÉ. — Soient  $S$  une surface de l'espace euclidien  $\mathbb{E}^3$  et  $M$  un ensemble de triangles euclidiens formant une approximation linéaire par morceaux de  $S$  autour d'un point  $P \in S$ , la *courbure discrète ponctuelle*  $K_d(P)$  au sommet  $P$  de  $M$  est, par définition, le quotient du défaut angulaire par la somme des aires des triangles ayant  $P$  comme sommet. Un problème naturel est d'estimer la différence entre cette courbure discrète  $K_d(S)$  et la courbure lisse  $K(P)$  de  $S$  en  $P$ . Nous présentons dans cet article des résultats obtenus dans [4], [5], [15] et qui donnent des majorations de la différence  $|K(P) - K_d(P)|$ .

ABSTRACT. — Let  $S$  be a surface of the Euclidean 3-space  $\mathbb{E}^3$  and  $M$  be a set of triangles forming a piecewise linear approximation of  $S$  around a point  $P \in S$ , the *pointwise discrete curvature*  $K_d(P)$  of  $M$  at the vertex  $P$  is defined to be the quotient of the angular defect by the sum of areas of triangles with  $P$  as vertex. A natural question is to ask for an estimate of the difference between this discrete curvature  $K_d(P)$  and the smooth curvature  $K(P)$  of  $S$  at  $P$ . We present here results from [4], [5], [15] which give majorations of the discrepancy  $|K(P) - K_d(P)|$ .

### 1. Introduction

En cherchant à définir un analogue de la courbure sur les variétés PL-plates, J. Cheeger, W. Müller et R. Schrader constatent que le problème est singulièrement différent selon que l'on désire obtenir des propriétés de convergence *ponctuelle* ou *en mesure* ([6], cf. [11] également). Ils montrent que les courbures discrètes “naturelles” d'une variété PL-plate  $M$  sont proches en mesure <sup>(1)</sup> des courbures usuelles d'une variété lisse  $X$  pourvu que  $M$  soit “proche” de  $X$ . Le comportement ponctuel des courbures discrètes est lui plus inattendu, leur limite dépend en effet de la suite  $(M_k)_{k \in \mathbb{N}}$

---

*Mots-clés* : mailles, courbures, approximations.

*Classification math.* : 65D18, 53A05.

<sup>(1)</sup> La convergence en mesure signifie que si  $(M_k)_{k \in \mathbb{N}}$  est une suite de variétés PL-plates qui “tend” vers  $\mathcal{U} \subset X$ , alors la moyenne des courbures discrètes en tous les sommets de  $M_k$  tend vers l'intégrale de la courbure correspondante sur  $\mathcal{U}$ .

et n'est pas en général égale à la courbure lisse de  $X$  au point correspondant. Mais, miraculeusement, les erreurs se compensent quand on fait une moyenne...

L'article de J. Cheeger, W. Müller et R. Schrader date de 1983 et on a aujourd'hui une compréhension quasi complète de la convergence en mesure des courbures discrètes vers leurs analogues lisses (*cf.* [10], [8] ou le livre [13] pour une vision exhaustive du sujet). En revanche une théorie aussi complète est loin d'être disponible pour la convergence ponctuelle, le problème principal étant le suivant :

*Problème de la cohérence*<sup>(2)</sup>. — Définir une courbure discrète  $K_d$  sur les sommets des polyèdres (=sous-variétés PL-plates d'un espace euclidien  $\mathbb{E}^m$ ) et déterminer des classes, les plus larges possibles, de suites de polyèdres  $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$  telles que, si une telle suite "approxime" une sous-variété  $S \subset \mathbb{E}^m$  et si  $P_n \in \mathcal{P}_n$  une est suite de sommets alors :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_n = P \in S \implies \lim_{n \rightarrow \infty} K_d(P_n) = K(P)$$

où  $K(P)$  est une courbure lisse de  $S$  au point  $P$ .

Le problème est énoncé en toute dimension mais la plupart des travaux se limitent au cas déjà très riche de la dimension trois, autrement dit aux suites de polyèdres "approximant" une surface<sup>(3)</sup> de  $\mathbb{E}^3$  (*cf.* l'introduction de [16] pour un aperçu des différentes approches).

Outre leur intérêt propre, les courbures discrètes interviennent dans une multitude de domaines où elles trouvent des applications directes : en géologie, en imagerie ou en reconstruction de surfaces par exemple. Le problème se pose alors sous une forme un peu différente, car l'utilisateur ne dispose *jamais* d'une suite de polyèdres. En général, ses données se résument en un unique polyèdre qui représente l'ensemble de ses mesures "physiques". Il n'y a pas non plus de surface lisse avec laquelle comparer la courbure discrète, ou plus exactement, la surface lisse fait nécessairement partie des inconnues du problème. En effet, dans le cas contraire, l'utilisateur aurait accès directement à la courbure lisse et n'aurait par conséquent nul besoin de l'estimer au moyen d'une courbure discrète. La question n'est donc plus de savoir si, à la limite, la courbure discrète converge vers la courbure lisse d'une surface mais plutôt :

(2) Cette dénomination n'a rien d'"officielle", je l'appelle ainsi pour fixer les idées.

(3) Dans cet article le mot *surface* signifie une sous-variété lisse, complète, connexe de dimension de 2 de  $\mathbb{E}^3$ . Idem, *mutatis mutandis*, pour le mot *courbe*.

*Problème de l'effectivité*<sup>(4)</sup>. — Quel sens donner à la courbure discrète  $K_d(P)$  en un point  $P$  d'un polyèdre sachant que l'on ne connaît pas la surface lisse qu'il approxime ?

Une façon de répondre à cette question est de faire des hypothèses *a priori* sur la surface qui est approximée, c'est-à-dire en fait, de restreindre l'ensemble des surfaces que l'on s'autorise à considérer. Par exemple, on peut exiger que la surface soit "proche" du polyèdre et que ses courbures principales, ainsi que leurs dérivées, soient bornées par un nombre donné à l'avance. Un fois choisi un tel ensemble  $\mathcal{G}$  de surfaces, répondre au problème de l'effectivité revient à établir une majoration

$$|K_d(P) - K(P)| \leq e(\mathcal{G})$$

de la différence entre la courbure discrète  $K_d(P)$  et la courbure lisse  $K(P)$  de n'importe quelle surface  $S \in \mathcal{G}$ . Une telle majoration garantit à l'utilisateur qu'il commet une erreur d'au plus  $e(\mathcal{G})$  quand il estime la courbure lisse au moyen de la courbure discrète.

On présente dans cet article les résultats obtenus récemment dans [15], [4], [5] et qui concernent essentiellement le problème de l'effectivité. On commence néanmoins par un paragraphe se rapportant à la question de la cohérence et qui met en place le matériel nécessaire au second paragraphe<sup>(5)</sup>, qui lui, traite de la question de l'effectivité.

## 2. Le problème de la cohérence

### 2.1. Triangulations géodésiques

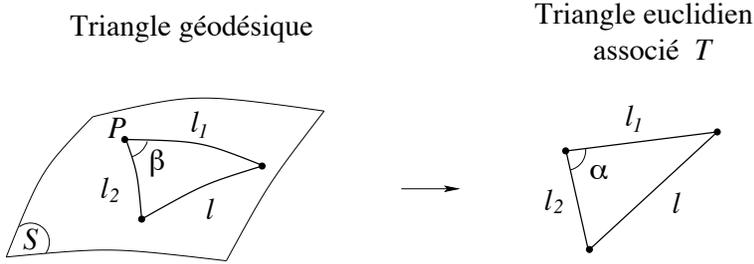
Étant donné une surface lisse  $S$  de l'espace euclidien  $\mathbb{E}^3$ , un point  $P \in S$  et un triangle géodésique  $\mathcal{T} \subset S$  (pour la métrique induite) dont un des sommets est  $P$ , on associe à  $\mathcal{T}$  un triangle euclidien  $T$  dont les arêtes ont les mêmes longueurs que celles de  $\mathcal{T}$ .

Le défaut angulaire entre l'angle  $\beta$  en  $P$  de  $\mathcal{T}$  et l'angle  $\alpha$  de  $T$  au sommet correspondant donne une estimation de la courbure de Gauss  $K(P)$  au point  $P$ , c'est la *formule de Legendre* :

$$\beta - \alpha = \frac{\text{Aire}(T)}{3} K(P) + O(l_{\max}^3)$$

(4) Là encore, cette dénomination m'est personnelle.

(5) En particulier, le premier paragraphe n'est pas un panorama du vaste champ des travaux consacrés à la courbure discrète ponctuelle.



où  $l_{\max}$  est le maximum des longueurs des arêtes de  $T$ . Si on se donne, non plus un seul triangle géodésique de  $S$ , mais une  $n$ -triangulation géodésique  $M$  centrée en  $P$  c'est-à-dire une triangulation d'un ouvert de  $S$  constituée de  $n$ -triangles géodésiques  $(\mathcal{T}_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$  de même sommet  $P$ , on peut par un usage répété de la formule de Legendre, faire disparaître les angles  $\beta_i$  dans le membre de gauche et obtenir la formule :

$$2\pi - \sum_{i=1}^n \alpha_i = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Aire}(T_i)}{3} K(P) + O(l_{\max}^3).$$

Ici bien sûr les  $\alpha_i$  sont les angles correspondants sur les triangles euclidiens  $T_i$  associés aux  $\mathcal{T}_i$  et  $l_{\max}$  est le maximum des longueurs sur tous les  $T_i$ .

**DÉFINITION 2.1.** — Soit  $M$  une triangulation, on appelle épaisseur de  $M$  le réel :

$$\Theta(M) = \inf_{T \in \{\text{triangles de } M\}} \inf_{\gamma \in \{\text{angles de } T\}} |\sin \gamma|.$$

Etant donnée une triangulation  $M$ , on note aussi  $l(M)$  la longueur de  $M$  c'est-à-dire le maximum de la longueur de toutes les arêtes de  $M$ . Le résultat suivant fait partie du "folklore" de la théorie.

**THÉORÈME 2.2.** — Soit  $(\mathcal{M}_j)_{j \in \mathbb{N}}$  une suite de  $n$ -triangulations géodésiques de  $S$  centrées en  $P$  et  $(M_j)_{j \in \mathbb{N}}$  la suite euclidienne associée, si

$$(1) \text{ il existe } \Theta_0 > 0 \text{ tel que } \forall j \in \mathbb{N}, \quad \Theta(M_j) \geq \Theta_0,$$

$$(2) \lim_{j \rightarrow \infty} l(M_j) = 0,$$

alors

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \frac{2\pi - \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\text{Aire}(M_j)} = \frac{1}{3} K(P).$$

### 2.2. Triangulations par corde

DÉFINITION 2.3. — Un  $n$ -maillage  $M$  est la donnée d'un  $(n + 1)$ -uplet  $(P, P_1, \dots, P_n)$  de points distincts de  $\mathbb{E}^3$ , sa réalisation géométrique  $\overline{M}$  est la réunion des  $n$  triangles euclidiens  $T_i = (P_i P P_{i+1})$ .

DÉFINITION 2.4. — Soit  $M$  un  $n$ -maillage, si

- (1)  $P \in S$  et  $\forall i \in \{1, \dots, n\}, P_i \in S$ ,
- (2) la restriction  $\pi|_{\overline{M}}$  de la projection orthogonale  $\pi : \mathbb{E}^3 \rightarrow T_P S$  est un PL-isomorphisme sur son image,

on dit que  $M$  est une approximation PL de  $S$  ou encore que  $M$  est une  $n$ -triangulation de  $S$  par corde

Si  $M$  est un  $n$ -maillage, on note  $\gamma_i$  l'angle au sommet  $P$  de  $T_i$  et  $Aire(M)$  la somme des aires des triangles  $T_i$ . Le résultat précédent semble suggérer que le nombre

$$K_d(P, M) = 3 \frac{2\pi - \sum_{i=1}^n \gamma_i}{Aire(M)}$$

pourrait être un analogue discret convenable de la courbure de Gauss au point  $P$ . Il s'avère néanmoins que cette quantité a un mauvais comportement quand on passe à la limite, si  $(M_j)_{j \in \mathbb{N}}$  est une suite de  $n$ -triangulations par corde de  $S$  centrés en  $P$  dont l'épaisseur est minorée uniformément et dont la longueur tend vers zéro, alors en général, la suite des courbure discrètes  $(K_d(P, M_j))_{j \in \mathbb{N}}$  ne converge pas vers la courbure de Gauss  $K(P)$  de la surface au point  $P$ .

Un exemple de mauvais comportement. — La surface  $S$  est la sphère de rayon  $R$ , le point  $P$  est le pôle nord, la famille de  $n$ -triangulations ( $n \geq 3$ ) par corde  $(M_\theta)_{\theta \in ]0, \frac{\pi}{2}[}$  est engendrée par le point  $P$  et les points

$$P_i^\theta = (R \sin \theta \cos \frac{2i\pi}{n}, R \sin \theta \sin \frac{2i\pi}{n}, R \cos \theta), \quad i \in \{1, \dots, n\}.$$

On a

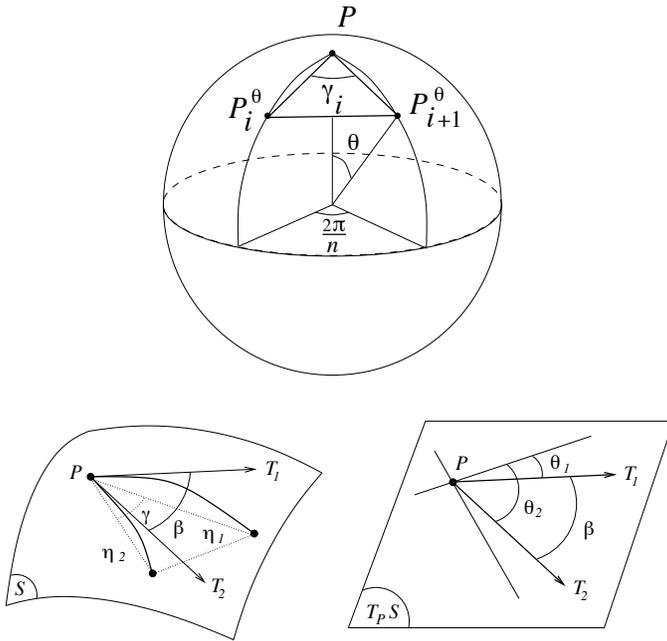
$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \Theta(M_\theta) = \sin \frac{2\pi}{n} \quad \text{et} \quad \lim_{\theta \rightarrow 0} l(M_\theta) = 0$$

et un calcul direct montre que

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} K_d(P, M_\theta) = \frac{3}{4 \cos^2 \frac{\pi}{n}} \frac{1}{R^2}.$$

Ainsi  $\lim_{\theta \rightarrow 0} K_d(P, M_\theta) \neq K(P)$  sauf si  $n = 6$ .

Le lecteur intéressé trouvera des exemples de comportements inattendus de  $K_d$  dans [14] (cf. aussi [12] et le premier appendice de [6]).



*La formule des cordes.* — La raison du mauvais comportement de  $K_d$  provient du fait que l’analogue de la formule de Legendre pour une triangulation par corde fait intervenir des courbures extrinsèques.

Trois points  $P, P_1, P_2$  étant donnés sur la surface, on note  $\gamma$  l’angle au sommet  $P$  du triangle euclidien  $P_1PP_2$ ,  $N$  une normale à la surface en  $P$ ,  $\beta$  l’angle entre les plans  $\Pi_1 = Vect(PP_1, N)$  et  $\Pi_2 = Vect(PP_2, N)$ ,  $T_i$  un vecteur non nul de  $T_P S \cap \Pi_i$  et  $\eta_i$  la longueur euclidienne  $PP_i$ . Enfin on note  $k_i$  la courbure de  $S$  dans la direction  $T_i$ . On a (cf. [1] pour une démonstration) :

$$\beta - \gamma = \frac{1}{4 \sin \gamma} k_1 k_2 \eta_1 \eta_2 - \frac{1}{8} \cot \gamma (k_1^2 \eta_1^2 + k_2^2 \eta_2^2) + O(\eta_{\max}^3)$$

où  $\eta_{\max} = \max\{\eta_1, \eta_2\}$ . La formule d’Euler permet d’exprimer  $k_1$  et  $k_2$  en fonction des courbures principales  $k_M$  et  $k_m$  au point  $P$  :

$$k_i = k_M \cos^2 \theta_i + k_m \sin^2 \theta_i$$

où  $\theta_i$  est l’angle entre la direction portée par  $T_i$  et la direction principale correspondant à  $k_M$  (on passe sous silence le cas très simplifié où  $P$  est un point ombilical de  $S$ ). Au bilan on a donc :

$$\beta - \gamma = aK + bk_M^2 + ck_m^2 + O(\eta_{\max}^3)$$

où les nombres  $a, b$  et  $c$  dépendent de la donnée du triangle  $P_1PP_2$  mais aussi, *via* les angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , de la position de ce triangle relativement à la surface. Précisément, les quantités  $a, b$  et  $c$  sont des polynômes trigonométriques en les  $\theta_1, \theta_2$  par exemple et pour fixer les idées :

$$a = \frac{1}{4 \sin \gamma} \left( (c_1^2 s_1^2 + c_2^2 s_1^2) \eta_1 \eta_2 - \cos \gamma c_1^2 s_1^2 \eta_1^2 - \cos \gamma c_2^2 s_2^2 \eta_2^2 \right)$$

où on a noté  $c_i = \cos \theta_i, s_i = \sin \theta_i, i \in \{1, 2\}$ . Dans le cas d'une  $n$ -triangulation  $M$ , en itérant la formule des cordes, on obtient donc :

$$(2.1) \quad 2\pi - \sum_{i=1}^n \gamma_i = AK + Bk_M^2 + Ck_m^2 + O(\eta_{\max}^3)$$

avec (notations évidentes)  $A = \sum_{i=1}^n a_i, B = \sum_{i=1}^n b_i$  et  $C = \sum_{i=1}^n c_i$ . Bien entendu les quantités  $A, B$  et  $C$  dépendent de  $M$  mais aussi des angles  $\theta_1, \dots, \theta_n$ , ce qui ruine tout espoir de définir en général des invariants discrets à partir de la relation (2.1). Néanmoins, il existe des classes de  $n$ -triangulations assez larges pour lesquelles un effet de moyenne joue : les sommes  $\sum_{i=1}^n a_i, \sum_{i=1}^n b_i$  et  $C = \sum_{i=1}^n c_i$  sont indépendantes, à l'ordre qui nous intéresse, des angles  $\theta_1, \dots, \theta_n$ .

### 2.3. Les $n$ -maillages réguliers

DÉFINITION 2.5. — Un  $n$ -maillage  $M \subset \mathbb{E}^3$  est dit régulier si :

- (1) les longueurs  $PP_i$  sont toutes égales entre elles.
- (2) les angles  $\gamma_i = \angle(P_iPP_{i+1})$  sont tous égaux entre eux.

Il est montré dans [3] le résultat suivant :

THÉORÈME 2.6. — Soient  $M$  un  $n$ -maillage régulier ( $n \geq 3, n \neq 4$ ) et  $S$  une surface lisse de  $\mathbb{E}^3$ . Si  $M$  est une approximation PL de  $S$  en  $P$  alors

$$\frac{2\pi - \sum_{i=1}^n \gamma_i}{\text{Aire}(M)} = \frac{1}{8 \sin^2 \frac{2\pi}{n}} \left( P_1\left(\frac{2\pi}{n}\right)K(P) + P_2\left(\frac{2\pi}{n}\right)(k_m^2(P) + k_M^2(P)) \right) + O(\eta)$$

où  $\eta$  est la longueur commune des  $PP_i$  et où

$$P_1(\alpha) = -2 \cos^2 \alpha - \cos \alpha + 3, \quad P_2(\alpha) = \cos^2 \alpha - \frac{3}{2} \cos \alpha + \frac{1}{2}.$$

En d'autres termes, pour les  $n$ -maillages réguliers,  $n \neq 4$ , les quantités  $A$ ,  $B$  et  $C$  ne dépendent que du  $n$ -maillage et non de sa position par rapport à la surface. Si  $n = 4$ , ce n'est plus vrai, les quantités dépendent de l'angle que fait le 4-maillage avec une direction principale. Plus précisément, si le 4-maillage est une approximation PL de la surface et si l'on note  $\varphi$  l'angle formé par la droite  $\pi(PP_1)$  et la direction principale associée à la courbure  $k_M(P)$ , on a alors le résultat suivant :

**THÉORÈME 2.7.** — *Soit  $M$  un 4-maillage régulier qui est une approximation PL de  $S \subset \mathbb{E}^3$  alors*

$$\frac{2\pi - \sum_{i=1}^n \gamma_i}{\text{Aire}(M)} = 2(K(P) + \tau_g^2(\varphi)) + O(\eta)$$

où

$$\tau_g(\varphi) = (k_M(P) - k_m(P)) \sin \varphi \cos \varphi$$

est la torsion géodésique en  $P$  dans la direction donnée par  $\varphi$ .

La raison de ce comportement particulier pour cette valeur de  $n$  est due à la coïncidence entre le degré (=4) des polynômes trigonométriques  $a_i$ ,  $b_i$  et  $c_i$  et le nombre de triangles d'un 4-maillage. Cette particularité permet d'obtenir une information (partielle) sur les directions principales. De façon plus étrange la valeur de  $n = 6$  joue elle aussi un rôle particulier, c'est en effet la seule valeur de  $n$  pour laquelle la quantité

$$\frac{3}{\text{Aire}(M)}(AK + Bk_M + Ck_m) + O(\eta)$$

se réduit à la formule de Legendre :

**COROLLAIRE 2.8** ([3]). — *Soit  $M$  un 6-maillage régulier qui est une approximation PL de  $S$  en  $P$  alors*

$$\frac{2\pi - \sum_{i=1}^6 \gamma_i}{\text{Aire}(M)} = \frac{1}{3}K(P) + O(\eta).$$

Notons enfin que si  $M_1$ ,  $M_2$  sont deux maillages réguliers centrés en  $P \in S$  et tels que :

- (1)  $n_1 \neq n_2$ ,  $n_1, n_2 \geq 3$  et  $n_1, n_2 \neq 4$ ,
- (2)  $M_1$  et  $M_2$  sont des approximations PL de  $S$ ,

alors les courbures discrètes  $K_d(P, M_1)$  et  $K_d(P, M_2)$  permettent, au moyen de la formule du théorème, d'estimer les courbures  $k_M(P)$  et  $k_m(P)$ .

**2.4. Les  $n$ -maillages paramétrés**

DÉFINITION 2.9. — On dit que  $(M, f)$  est un  $n$ -maillage paramétré de  $S$  s'il existe un plongement lisse

$$f : \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^2 \longrightarrow S \subset \mathbb{R}^3$$

d'un ouvert  $\mathcal{U}$  dans  $S$  qui envoie un polygone régulier à  $n$  sommets  $\mathcal{P} = \{p_1, \dots, p_n\}$  et de centre  $p \in \mathcal{U}$  sur le  $n$ -maillage  $M = (P, P_1, \dots, P_n)$  i. e.  $f(p) = P$  et  $f(p_i) = P_i$  pour tout  $i \in \{1, \dots, n\}$ . On dit que le  $n$ -maillage paramétré est régulier si de plus  $f$  est conforme en  $p$ .

Remarque 2.10. — Etant donné un  $n$ -maillage  $M \subset S$  il est facile de construire un plongement lisse  $f : \mathcal{U} \longrightarrow S$  qui envoie un polygone régulier à  $n$  sommets sur  $M$ .

L'intérêt des  $n$ -maillages est qu'il y a une façon naturelle de les "rétrécir". Soit  $h_{p,\rho}$  l'homothétie de centre  $p$  et de rapport  $\rho$ , on pose

$$\rho_{\max} = \sup \{ \rho \in ]0, 1] \mid h_{p,\rho}(\mathcal{P}) \subset \mathcal{U} \}$$

qui est bien défini car  $\mathcal{U}$  est ouvert (en particulier,  $\rho_{\max} = 1$  si  $\mathcal{U}$  est convexe). On associe alors à tout  $n$ -maillage paramétré  $(M, f)$  la famille de  $n$ -maillages  $(M_\rho)_{\rho \in ]0, \rho_{\max}[}$  définie par

$$M_\rho = f \circ h_{p,\rho}(\mathcal{P}),$$

c'est-à-dire  $M_\rho = (P, P_1^\rho, \dots, P_n^\rho)$  avec  $P_i^\rho = f(p + \rho pp_i)$ , pour tout  $i \in \{1, \dots, n\}$ .

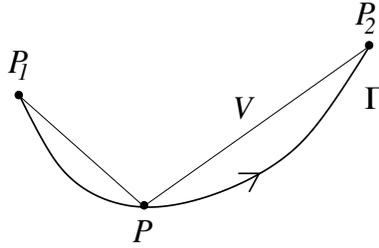
THÉORÈME 2.11 ([5]). — Soit  $(M, f)$  un  $n$ -maillage paramétré régulier ( $n \neq 4, n > 2$ ) qui est une approximation PL de  $S$  en  $P$  et  $(M_\rho)_{\rho \in ]0, \rho_{\max}[}$  la famille de  $n$ -maillages associés alors :

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{2\pi - \sum_{i=1}^n \gamma_i(\rho)}{\text{Aire}(M_\rho)} = \frac{1}{8 \sin^2(\frac{2\pi}{n})} \left( P_1\left(\frac{2\pi}{n}\right)K(P) + P_2\left(\frac{2\pi}{n}\right)(k_m^2(P) + k_M^2(P)) \right)$$

où  $\gamma_i(\rho) = \angle(P_i^\rho P P_{i+1}^\rho)$ . En particulier si  $n = 6$ , on a :

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{2\pi - \sum_{i=1}^6 \gamma_i(\rho)}{\text{Aire}(M_\rho)} = \frac{1}{3}K(P).$$

Remarque 2.12. — En fait, dans le cas  $n = 6$  les hypothèses de ce théorème peuvent être affaiblies, cf. [2], [16].



### 3. Problème de l'effectivité

#### 3.1. Les courbes

Il n'y a pas pour les courbes de problème de cohérence. Si  $\Gamma$  est une courbe de  $\mathbb{E}^2$  et  $P_1, P, P_2 \in \Gamma$  trois sommets consécutifs d'une ligne polygonale  $L$ , la courbure discrète en  $P$  de  $L$  est le nombre

$$k_d(P, L) = \frac{\pi - \gamma}{\bar{\eta}}$$

où  $\gamma$  est l'angle  $\angle(P_1 P P_2)$  et où  $\bar{\eta} = \bar{\eta}(P, L)$  est la moyenne  $(\eta_1 + \eta_2)/2$  des distances euclidiennes de  $P$  à  $P_1$  et de  $P$  à  $P_2$ . Il est bien connu (cf. [9]) que si  $(L_k)_{k \in \mathbb{N}}$  est une suite de lignes polygonales qui approximent  $\Gamma$ , telle que pour tout  $k \in \mathbb{N}$ ,  $P \in L_k$  et  $\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{\eta}(P, L_k) = 0$  alors :

$$\lim_{k \rightarrow \infty} k_d(P, L_k) = k(P),$$

où  $k(P)$  est la courbure principale de  $\Gamma$  en  $P$ . Le résultat principal de [4] (qui est une partie de la thèse [15]) est une majoration de l'erreur  $|k(P) - k_d(P, L)|$  en fonction d'invariants géométriques de  $L$  et de  $\Gamma$ .

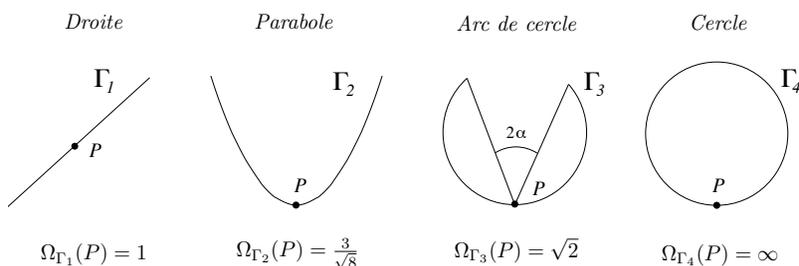
**DÉFINITION 3.1.** — On appelle *ligne en V* tout triplet  $V = (P, P_1, P_2)$  de  $(\mathbb{E}^2)^3$ . La *réalisation géométrique*  $\mathcal{V}$  de  $V$  est la ligne polygonale formée des segments  $PP_1$  et  $PP_2$ . On dit que  $\Gamma \subset \mathbb{E}^2$  s'appuie sur  $V$  si  $\Gamma$  est une courbe compacte orientée telle que  $\partial\Gamma = -\{P_1\} \cup \{P_2\}$  et  $P \in \Gamma \setminus \partial\Gamma$ .

**THÉORÈME 3.2.** — Soient  $V = (P, P_1, P_2)$  une ligne en  $V$  et  $\Gamma$  une courbe s'appuyant sur  $V$ , on a :

$$|k(P) - k_d(P, V)| \leq 2\Omega_\Gamma(P)^3 \left( \frac{k_{\max}^3}{8} \eta_{\max} + \frac{k'_{\max}}{3} \Omega_\Gamma(P) \right) \eta_{\max}.$$

On a noté

$$\eta_{\max} = \max\{\eta_1, \eta_2\}, k_{\max} = \sup_{Q \in \Gamma} |k(Q)|, k'_{\max} = \sup_{Q \in \Gamma} \left| \frac{d}{ds} k(Q) \right|,$$



où  $s$  est la longueur d'arc. Le coefficient  $\Omega_\Gamma(P)$  est un invariant géométrique de  $\Gamma$  que nous allons décrire maintenant.

**DÉFINITION 3.3.** — Soit  $P, Q$  deux points distincts de  $\Gamma$ , on note  $\alpha_P(Q) \in [0, \frac{\pi}{2}]$  l'angle entre la droite  $(PQ)$  et la tangente  $T_Q\Gamma$ . On appelle *facteur de retour* de  $\Gamma$  en  $P$  le nombre

$$\Omega_\Gamma(P) = \sup_{Q \in \Gamma} \frac{1}{\cos \alpha_P(Q)} \in [1, +\infty].$$

Les illustrations ci-dessous donnent le facteur de retour  $\Omega_\Gamma(P)$  de quelques courbes.

L'exemple de l'arc de cercle montre que  $\Omega_\Gamma(P)$  peut être fini même si  $\Gamma$  n'est pas un graphe au dessus de sa tangente en  $P$ . Notons aussi que pour toute courbe  $\Gamma$ , et pour tout  $P \in \Gamma$ , il existe un voisinage  $\mathcal{U}$  de  $P$  dans  $\mathbb{E}^2$  tel que  $\Omega_{\Gamma \cap \mathcal{U}}(P)$  soit fini. En particulier le théorème ci-dessus est aussi un théorème de convergence : si  $(V_k)_{k \in \mathbb{N}}$  est une suite de lignes en  $V$  avec, pour tout  $k \in \mathbb{N}$ ,  $P \in V_k$  alors le terme d'erreur

$$e(\Gamma, V_k) = 2\Omega_\Gamma(P)^3 \left( \frac{k_{\max}^3}{8} \eta_{\max}(P, V_k) + \frac{k'_{\max}}{3} \Omega_\Gamma(P) \right) \eta_{\max}(P, V_k)$$

tend vers zéro si  $\lim_{k \rightarrow \infty} \eta_{\max}(P, V_k) = 0$ .

Le terme d'erreur  $e(\Gamma, V)$  dépend de trois invariants géométriques de la courbe : les quantités  $k_{\max}$  et  $k'_{\max}$ , dont la présence est attendue, mais aussi du nombre  $\Omega_\Gamma(P)$  dont on peut se demander si il ne serait pas redondant. L'exemple ci-dessous montre que la seule donnée de  $k_{\max}$  et de  $k'_{\max}$  est insuffisante pour majorer de façon non triviale la différence  $|k(P) - k_d(P, V)|$ .

La courbe choisie est une spirale dont le rayon de courbure en tout point est grand comparée à  $\eta_{\max}$ , ce rayon varie lentement de façon à ce que  $k'_{\max}$  soit petit relativement à  $1/\eta_{\max}$ . Le facteur de retour  $\Omega_\Gamma(P)$  au point  $P$  de la figure est infini. La ligne polygonale quant à elle a une courbure discrète

$k_d(P)$  en  $P$  qui est de l'ordre de grandeur de  $1/\eta_{\max}$ . Par conséquent l'erreur  $|k(P) - k_d(P)|$  est approximativement  $|k_d(P)|$ , c'est-à-dire en  $1/\eta_{\max}$ .

Le *Length Theorem* de [7] donne une majoration de la différence des longueurs de deux courbes en fonction de leur distance de Fréchet et de leur courbure totale. Le théorème d'effectivité ci-dessus peut être vu comme une sorte d'analogie du *Length Theorem* mais pour la courbure (le facteur de retour permet avec  $k_{\max}$  et  $\eta_{\max}$  de contrôler la distance de Hausdorff entre la ligne en  $V$  et de  $\Gamma$ , cf. [4] pour les détails).

Soient  $K, K'$  et  $\Omega$  trois réels positifs, on note

$$\mathcal{G}_{K,K',\Omega}(V) = \{\Gamma \subset \mathbb{R}^2 \mid \Gamma \text{ s'appuie sur } V, k_{\max}(\Gamma) \leq K, \\ k'_{\max}(\Gamma) \leq K', \Omega_{\Gamma}(P) \leq \Omega\}$$

et

$$e(\mathcal{G}_{K,K',\Omega}(V)) = 2\Omega^3 \left( \frac{K^3}{8} \eta_{\max}(P, V) + \frac{K'}{3} \Omega \right) \eta_{\max}(P, V).$$

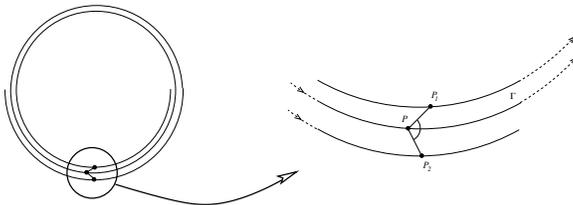
Si l'on revient au point de vue de l'introduction, à savoir que seule la ligne polygonale est connue précisément alors que l'on ne s'autorise que des estimées *a priori* sur la courbe, le théorème peut se reformuler en disant que quel que soit la courbe  $\Gamma \in \mathcal{G}_{K,K',\Omega}(V)$  l'erreur commise en remplaçant la courbure lisse en  $P$  par la courbure discrète est majorée par  $e(\mathcal{G}_{K,K',\Omega}(V))$ .

### 3.2. Les surfaces

On présente dans ce paragraphe les résultats de [5] (qui est une autre partie de la thèse [15]).

**DÉFINITION 3.4.** — Soit  $S$  une surface de  $\mathbb{E}^3$  et  $P$  un point de  $S$ . Si pour tout plan  $\Pi$  passant par  $P$  et contenant une normale de  $S$  en  $P$  l'intersection  $\Gamma = \Pi \cap S$  est une courbe, on définit le facteur de retour de  $S$  au point  $P$  par

$$\Omega_S(P) = \sup_{\Pi} \Omega_{S \cap \Pi}(P).$$



Si  $M$  est un  $n$ -maillage qui est une approximation PL de  $S$ , alors la surface  $S' = \exp_P \circ \pi(\overline{M}) \subset S$  vérifie la condition de la définition et bien sûr,  $M$  reste une approximation PL pour  $S'$ . Par conséquent, quitte à restreindre  $S$  à  $S'$ , on peut toujours supposer que le facteur de retour est bien défini.

Si  $P \in S \subset \mathbb{E}^3$  et  $n > 2$ , on pose, afin d'alléger un peu les formules :

$$K(n, P) = \frac{3}{8 \sin^2 \frac{2\pi}{n}} \left( P_1\left(\frac{2\pi}{n}\right)K(P) + P_2\left(\frac{2\pi}{n}\right)(k_m^2(P) + k_M^2(P)) \right)$$

où  $P_1$  et  $P_2$  sont les polynômes trigonométriques introduits au §2.3. Il s'avère qu'un petit nombre de quantités permet de majorer l'erreur entre la courbure discrète  $K_d(P)$  au point  $P$  de  $M$  et la courbure  $K(n, P)$  de la surface. Dans cette majoration les trois nombres suivants :

$$\Delta = \frac{\max_{i \in \{1, \dots, n\}} |PP_{i+1} + PP_{i-1} - 2 \cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)PP_i|}{\eta_{\max}^2},$$

$$\Lambda = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\eta_{\max}^2},$$

et

$$\sigma = \frac{\eta_{\max}}{\eta_{\min}},$$

qui ne dépendent que du  $n$ -maillage, jouent un rôle fondamental. On a bien sûr noté  $\eta_{\min}$  (resp.  $\eta_{\max}$ ) le minimum (resp. le maximum) des distances euclidiennes  $PP_i$  où  $i \in \{1, \dots, n\}$ .

**THÉORÈME 3.5.** — *Soit  $M$  un  $n$ -maillage ( $n \neq 4, n > 2$ ) qui est une approximation PL d'une surface  $S \subset \mathbb{E}^3$ . Si  $k_{\max} \eta_{\max} \Omega_{\Sigma}(P) < \pi$  alors*

$$|K(n, P) - K_d(P)| \leq N(M, S) \eta_{\max}$$

où  $N(M, S)$  ne dépend que du 1-jet de la courbure de  $S$ , du facteur de retour  $\Omega_{\Sigma}(P)$  et des données  $\Theta, \Delta, \Lambda, \eta_{\max}, n$  et  $\sigma$  du  $n$ -maillage.

La formule explicite pour  $N(M, S)$  est trop longue pour pouvoir figurer dans ces pages, elle est décrite complètement dans [5] et dans [15]. Un résultat analogue vaut pour  $n = 4$  et dans le cas  $n = 6$  le théorème donne une majoration de l'erreur entre la courbure de Gauss et la courbure discrète.

Il est tentant de vouloir transformer ce théorème en un résultat de convergence. On note

$$e(M, S) = N(M, S) \eta_{\max}$$

la majoration de l'erreur et  $(M_k)_{k \in \mathbb{N}}$  une suite de  $n$ -maillages centrés en  $P$ . On suppose en outre que les  $M_k$  vérifient les hypothèses du théorème et que de plus  $\lim_{k \rightarrow +\infty} \eta_{\max}(M_k) = 0$ . Dans ces conditions, une majoration

uniforme des  $N_k = N(M_k, S)$  permet donc d'obtenir une erreur asymptotiquement nulle. La formulation explicite des  $N_k$  montre qu'il suffit pour cela de minorer uniformément les épaisseurs :

$$\forall k \in \mathbb{N}, \quad \Theta(M_k) \geq \Theta_0 > 0$$

et de majorer uniformément les nombres  $\Delta(M_k)$ ,  $\Lambda(M_k)$  et  $\sigma(M_k)$ .

**COROLLAIRE 3.6.** — *Soit  $(M_k)_{k \in \mathbb{N}}$  une suite de  $n$ -maillages ( $n \neq 4$ ,  $n > 2$ ) centrés en  $P$  et telle que :*

- i)  $\lim_{k \rightarrow +\infty} \eta_{\max}(M_k) = 0$ ,
- ii) *chaque  $M_k$  est une approximation PL d'une surface  $S \subset \mathbb{E}^3$ .*

*Si il existe des réels  $\Theta_0$ ,  $\sigma_0$ ,  $\Delta_0$ , et  $\Lambda_0$  tels que :*

$$\forall k \in \mathbb{N}, \quad \Theta(M_k) \geq \Theta_0 > 0, \quad \sigma(M_k) \leq \sigma_0, \quad \Delta(M_k) \leq \Delta_0, \quad \Lambda(M_k) \leq \Lambda_0,$$

alors

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} K_d(P, M_k) = K(n, P)$$

où  $K_d(P, M_k)$  est la courbure discrète de  $M_k$  au sommet  $P$ .

La condition sur l'épaisseur signifie que les angles des triangles ne doivent pas dégénérer, la condition sur  $\sigma$  demande simplement que  $\eta_{\max} = O(\eta_{\min})$ , les conditions sur  $\Delta$  et  $\Lambda$  sont plus exigeantes. En effet, à supposer que  $\eta_{\max} = O(\eta_{\min})$ , les nombres  $\Delta$  et  $\Lambda$  sont *a priori* des  $O(\eta_{\max}^{-1})$ . Si  $\eta_{\max}$  tend vers zéro, ils ne sont donc pas, en général, bornées. Pour pouvoir majorer uniformément les  $\Delta$  et les  $\Lambda$ , il faut donc que la suite de  $n$ -maillages soit telle que les numérateurs de ces quantités soient des  $O(\eta_{\max}^2)$ . C'est précisément ce qui se passe avec les  $n$ -maillages paramétrés.

**THÉORÈME 3.7.** — *Soit  $M$  un  $n$ -maillage qui est une approximation PL d'une surface  $S \subset \mathbb{E}^3$  et  $f : \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow S$  une paramétrisation telle que  $(M, f)$  soit un  $n$ -maillage paramétré. La famille  $M_\rho = f \circ h_{\rho, \rho}(\mathcal{P})$ ,  $0 < \rho < \rho_{\max}$ , de  $n$ -maillages paramétrés vérifie alors*

$$\begin{aligned} \sigma(M_\rho) &\leq \|df\| \|d(f^{-1})\| \\ \Delta(M_\rho) &\leq 2 \|d(f^{-1})\|^2 \|d^2 f\|. \end{aligned}$$

*Si de plus  $(M, f)$  est un  $n$ -maillage paramétré régulier alors*

$$\Lambda(M_\rho) \leq \|d^2 f\| \|d(f^{-1})\|^2$$

où

$$\|df\| = \sup_{u \in \mathcal{U}} \|df_u\|, \quad \|d(f^{-1})\| = \sup_{m \in f(\mathcal{U})} \|d(f^{-1})_m\|$$

et

$$\|d^2 f\| = \sup_{u \in \mathcal{U}} \|d^2 f_u\|.$$

Un corollaire de ces majorations est le théorème de convergence énoncé au §2.4.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. BOIX, *Approximation linéaire des surfaces de  $\mathbb{R}^3$  et applications*, Thèse de l'Ecole Polytechnique, 1995.
- [2] V. BORRELLI, *Courbures Discrètes*, Mémoire de DEA de l'université Lyon I, 1992/1993.
- [3] V. BORRELLI, F. CAZALS, J.-M. MORVAN, *On the angular defect of triangulations and the pointwise approximation of curvatures*, Comp. Aided Geom. Design 20 (2003), 319-341.
- [4] V. BORRELLI, F. ORGERET, *Error term in pointwise approximation of the curvature of a curve*, Preprint.
- [5] V. BORRELLI, F. ORGERET, *Curvatures of meshes and surfaces*, Preprint.
- [6] J. CHEEGER, W. MÜLLER, R. SCHRADER, *On the Curvature of Piecewise Flat Space*, Communication in Math. Phys., 92 (1983), 405-454.
- [7] D. COHEN-STEINER, H. EDELSBRUNNER, *Inequalities for the Curvature of Curves and Surfaces*, Proc. 20st Ann. Sympos. on Comput. Geom. 2005, 272-277.
- [8] D. COHEN-STEINER, J.-M. MORVAN, *Second fundamental measure of geometric sets and local approximation of curvatures*, J. Differential Geom. 74 (2006), 363-394.
- [9] I. FÁRY, *Sur la courbure totale d'une courbe gauche faisant un noeud*, Bull. Soc. Math. France 77 (1949), 128-138.
- [10] J. FU, *Convergence of curvatures in secant approximations*, Journ. of Diff. Geom. 37 (1993), 177-190.
- [11] J. LAFONTAINE, *Mesures de courbure des variétés lisses et des polyèdres*, Séminaire Bourbaki, 28 (1985-1986), Exposé No. 664, Astérisque No. 145-146 (1987), 241-256.
- [12] D. MEEK, D. WALTON, *On surface normal and Gaussian curvature approximations given data sampled from smooth surface*, Comp. Aided Geom. Design 17, 521-543.
- [13] J. -M. MORVAN, *Generalized Curvatures*, A paraître chez Springer Verlag.
- [14] J. -M. MORVAN, B. THIBERT, *Unfolding of surfaces*, Discrete Comput. Geom. 36 (2006), 393-418.
- [15] F. ORGERET, *Sur l'approximation discrète des courbures des courbes planes et des surfaces lisses de l'espace euclidien de dimension 3*, Thèse de l'université de Lyon, 2007.
- [16] G. XU, *Convergence analysis of a discretization scheme for Gaussian curvature over triangular surfaces*, Comp. Aided Geom. Design 23 (2006), 193-207.

Vincent BORRELLI  
 Université de Lyon  
 Institut Camille Jordan  
 43, boulevard du 11 Novembre 1918  
 69622 Villeurbanne cedex (France)  
 borrelli@math.univ-lyon1.fr