

# 6. Connexions métriques plates a singularités isolées

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **27 (1981)**

Heft 1-2: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **09.08.2024**

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## 6. CONNEXIONS MÉTRIQUES PLATES A SINGULARITÉS ISOLÉES

D'une connexion  $\nabla$ , on dit qu'elle est « plate » ou « sans courbure » si sa 2-forme de courbure (partout définie, au signe près si  $V$  n'est pas orientée) est nulle. Le théorème 3 implique en particulier que si  $\chi_V \neq 0$ , il n'existe pas sur  $V$  de métrique  $g$  avec connexion métrique sans courbure et sans singularité. Par contre il existera toujours sur  $V$  des connexions métriques plates à singularités isolées: on appelle ainsi la donnée d'un nombre fini de points  $(x_1, \dots, x_r)$  sur  $V$ , d'une métrique riemannienne  $g$  et d'une connexion métrique plate sur l'ouvert  $U = V - \{x_1, \dots, x_r\}$  de  $V$ . Les points  $x_\lambda$  sont appelés les singularités de  $\nabla$ .

*Exemple 1.* Tout difféomorphisme du tronc de cône (ouvert) ou du tronc de cylindre (ouvert) sur la sphère  $S^2$  privée de ses 2 pôles nord  $N$  et sud  $S$  permet de définir, par transport de structure, une métrique localement euclidienne sur  $S^2 - \{S, N\}$ , puisque cône et cylindre sont des surfaces développables: la courbure de la connexion de Levi-Civita correspondante est donc nulle.

*Exemple 2.* Soit  $X$  un champ de vecteurs sur  $V$ , n'ayant que des singularités isolées  $x_1, \dots, x_r$ . Soit  $g = \langle , \rangle$  une métrique riemannienne arbitraire sur  $U = V - \{x_1, \dots, x_r\}$  et  $A$  le champ de vecteurs  $X/\|X\|$  sur  $U$ . Il existe alors une unique connexion métrique  $\nabla$  sur  $U$  telle que  $\nabla A = 0$ : si  $B$  est un champ de vecteurs unitaires orthogonal à  $A$  sur un ouvert parallélisable  $W$  de  $U$ , cette connexion  $\nabla$  est définie par  $\omega_{(A,B)} = 0$ . Cette connexion sur  $U$  est en particulier plate ( $d\omega_{(A,B)} = 0$ ).

*Remarque.* On peut en particulier supposer la métrique  $g$  définie sur tout  $V$ . Admettant alors l'existence de champ de vecteurs  $X$  à singularités isolées sur toute surface compacte  $V$  (ou l'existence de fonctions de Morse), cet exemple 2 prouve que pour toute métrique  $g$  sur  $V$ , il existe une connexion plate avec un nombre fini de singularités, respectant  $g$ .

*Exemple 3.* Soient  $(x_1, \dots, x_r)$  des points de  $V$  tels que l'ouvert  $U = V - \{x_1, \dots, x_r\}$  soit parallélisable. Soit  $(A, B)$  un champ de repères sur  $U$ , et  $\omega$  une 1-forme fermée sur  $U$ . On définit sur  $U$  une métrique  $g$  et une orientation en décrétant le champ de repères  $(A, B)$  orthonormé et direct. On définit une connexion métrique  $\nabla$  sur  $U$  en posant  $\omega_{(A,B)} = \omega$

$$(\nabla B = \omega A, \nabla A = -\omega B).$$

Puisque la 1-forme  $\omega$  est fermée, la connexion  $\nabla$  est *plate*.

Soient  $(x_1, \dots, x_r)$  les singularités (isolées) d'une connexion *plate*  $\nabla$  sur  $V - \{x_1, \dots, x_r\}$  respectant une métrique  $g$ . Soit  $P_\lambda$  un pavé de  $V$ , inclus dans un ouvert parallélisable  $U_\lambda$  ne contenant aucune singularité sur son bord  $\partial P_\lambda$ , et en contenant exactement une,  $x_\lambda$ , en son intérieur. Soient  $(A_\lambda, B_\lambda)$  un champ de repères orthonormés sur  $U_\lambda - \{x_\lambda\}$ , et  $\omega_\lambda = \omega_{(A_\lambda, B_\lambda)}$  la 1-forme fermée sur  $U_\lambda - \{x_\lambda\}$  telle que

$$\begin{aligned}\nabla B_\lambda &= \omega_\lambda \cdot A_\lambda, \\ \nabla A_\lambda &= -\omega_\lambda \cdot B_\lambda.\end{aligned}$$

THÉORÈME 4.

$$\text{Rés}_{P_\lambda}(\nabla, g) = \frac{1}{2\pi} \int_{\partial P_\lambda} \omega_\lambda + I(A_\lambda, x_\lambda)$$

( $I(A_\lambda, x_\lambda)$  indiquant l'indice du champ de vecteurs  $A_\lambda$  en  $x_\lambda$ ).

COROLLAIRE. La définition du résidu ne dépend pas du choix du pavé  $P_\lambda$  satisfaisant aux conditions requises. (On notera encore  $\text{Rés}(\nabla, x_\lambda)$  ce résidu.)

*Démonstration du corollaire.* Si  $P'_\lambda$  est un autre pavé vérifiant les conditions, les courbes fermées  $\partial P_\lambda$  et  $\partial P'_\lambda$  sont toutes deux de même indice 1 par rapport à  $x_\lambda$  (une fois choisie une orientation de  $U_\lambda$ ). La forme  $\omega_\lambda$  étant fermée, la formule de Stokes permet de conclure:

$$\int_{\partial P_\lambda} \omega_\lambda = \int_{\partial P'_\lambda} \omega_\lambda.$$

Quant à la définition de l'indice  $I(A_\lambda, x_\lambda)$ , on la suppose ici connue (et donc indépendante de  $P_\lambda$ ). [Une définition et étude de cet indice, en bonne et due forme, pourrait éventuellement être faite ici dans un cours, si elle ne l'a pas été avant.]

*Démonstration du théorème.* Soit  $\tilde{A}$  un champ de vecteurs sans singularités défini sur tout l'ouvert  $U_\lambda$  (y compris en  $x_\lambda$ ). Posons  $A' = \tilde{A}/\|\tilde{A}\|$  sur  $U_\lambda - \{x_\lambda\}$ , et soit  $B'_\lambda$  le champ de vecteur sur  $U_\lambda - \{x_\lambda\}$  déduit de  $A'_\lambda$  par rotation de  $+\pi/2$  (pour l'orientation de  $U_\lambda - \{x_\lambda\}$  définie par  $(A_\lambda, B_\lambda)$ ). Soient enfin  $\theta_\lambda: U_\lambda - \{x_\lambda\} \rightarrow \mathbf{R}/2\pi\mathbf{Z}$  l'angle de rotation per-

mettant de passer de  $(A'_\lambda, B'_\lambda)$  à  $(A_\lambda, B_\lambda)$ , et  $\omega' = \omega_{(A'_\lambda, B'_\lambda)}$ . De la formule (v) du § 2, on déduit:  $\omega'_\lambda = \omega_\lambda + d\theta_\lambda$ . Du théorème 1, on déduit

$$\text{Rés}_{P_\lambda}(\nabla, g) = \frac{1}{2\pi} \int_{\partial P_\lambda} \omega'_\lambda.$$

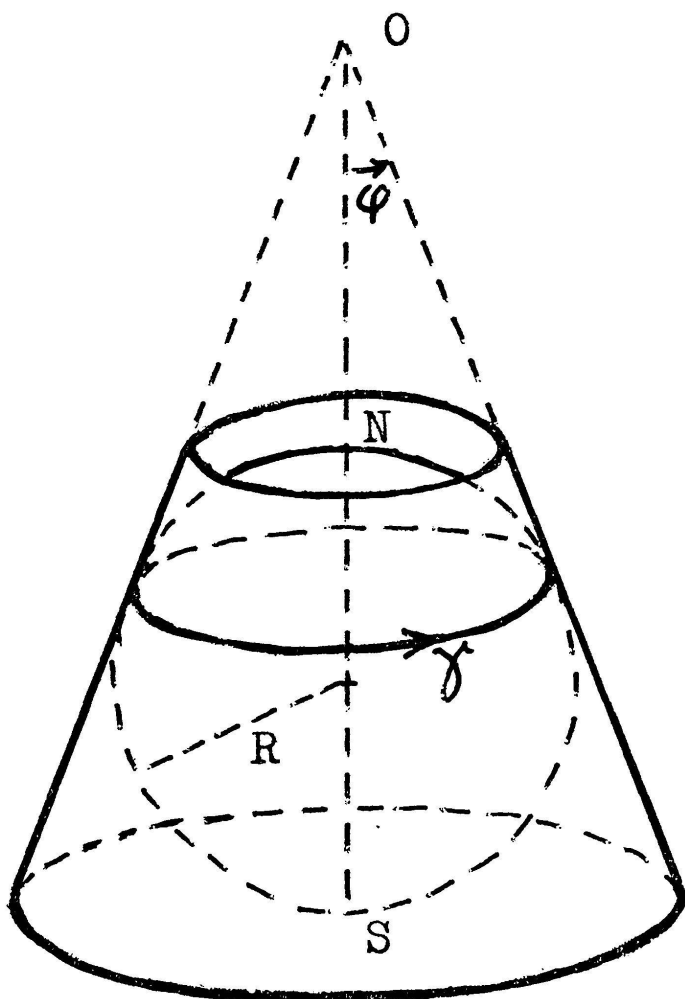
Puisque  $I(A_\lambda, x_\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{\partial P_\lambda} d\theta_\lambda$ , le théorème 4 en résulte.

*Remarque.* Notons  $h_\lambda \in \mathbf{R}/2\pi\mathbf{Z}$  ( $= SO(2)$ ) l'holonomie de la connexion métrique plate  $\nabla$  le long du lacet  $\partial P_\lambda$  entourant  $x_\lambda$ . [Puisque  $\partial P_\lambda$  n'est pas simplement connexe dans le domaine  $U_\lambda$  de  $\nabla$ , cette holonomie n'a aucune raison d'être triviale.] On vérifie aisément:

$$h_\lambda = 2\pi \text{ Rés}(\nabla, x_\lambda) \pmod{2\pi\mathbf{Z}}.$$

La notion de résidu est donc plus *précise* que celle d'holonomie.

Appliquons le théorème des résidus à chacun des exemples 1, 2 et 3 ci-dessus.



*Exemple 1.* Notons  $\gamma$  la courbe de contact du tronc de cône avec la sphère,  $\varphi$  ( $0 < \varphi < \pi/2$ ) l'angle au sommet du cône et  $R$  le rayon de la sphère. Par développement du tronc de cône dans le plan,  $\gamma$  se développe suivant un arc de cercle d'angle

$$\theta = \frac{2\pi R \cos \varphi}{R \cotg \varphi} = 2\pi \sin \varphi.$$

Donc

$$\int_{\lambda} \rho_g ds = 2\pi \sin \varphi.$$

$\gamma$  entourant à la fois les pôles  $N$  et  $S$ , mais devant être muni d'orientations différentes, on en déduit, avec des notations évidentes:

$$\begin{cases} \text{Rés}(\nabla, N) = 1 + \sin \varphi \\ \text{Rés}(\nabla, S) = 1 - \sin \varphi \end{cases}$$

$$\text{Rés}(\nabla, N) + \text{Rés}(\nabla, S) = 2 = \chi_{S^2}.$$

*Remarque.* Pour le cylindre, un calcul analogue donne

$$\text{Rés}(\nabla, N) = \text{Rés}(\nabla, S) = 1,$$

car  $\gamma$  se développe alors sur le plan suivant un segment de droite de sorte que  $\int_{\lambda} \rho_g ds = 0$ .

*Exemple 2.* Soit  $X$  un champ de vecteurs à singularités isolées  $(x_1, \dots, x_r)$ , et  $g$  une métrique riemannienne sur la surface compacte  $V$ .

THÉORÈME 5 (*Hopf*).

$$\sum_{\lambda=1}^r I(X, x_{\lambda}) = \chi_V.$$

Posons en effet  $A = X/\|X\|$  sur  $U = V - \{x_1, \dots, x_r\}$ . Soit  $U_{\lambda}$  un voisinage de  $x_{\lambda}$  dans  $V$ , et  $B_{\lambda}$  un champ de vecteurs sur  $U_{\lambda} - \{x_{\lambda}\}$  tel que  $(A, B_{\lambda})$  définisse un champ de repères orthonormés sur  $U_{\lambda} - \{x_{\lambda}\}$ : par définition de la connexion métrique plate de l'exemple 2,  $\nabla A = 0$ , soit  $\omega_{(A, B_{\lambda})} = 0$ . On déduit du théorème 4 que

$$\text{Rés}(\nabla, x_{\lambda}) = I(A, x_{\lambda}) = I(X, x_{\lambda})$$

d'où le théorème 5, par application du théorème des résidus.

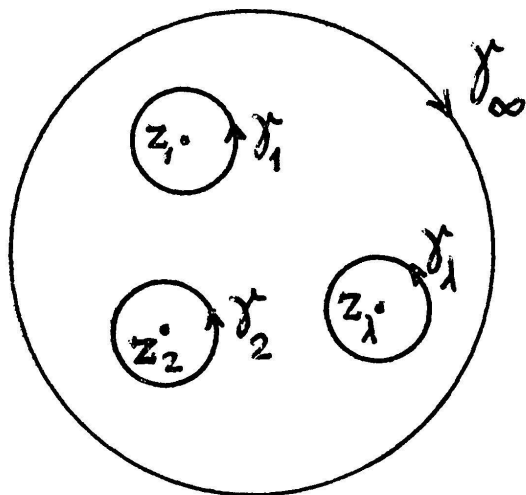
*Exemple 3.* Nous allons voir un cas particulier de la situation décrite à l'exemple 3, explicitant le lien entre les résidus des connexions métriques plates à singularités isolées, et les résidus des fonctions méromorphes.

Soit  $f: \mathbf{C} - \{z_1, \dots, z_r\} \rightarrow \mathbf{C}$  une fonction holomorphe. Par compactification à l'aide d'un point à l'infini,  $U = \mathbf{C} - \{z_1, \dots, z_r\}$  peut encore être considéré comme  $S^2 - \{\infty, z_1, \dots, z_r\}$ .

Posons:  $f(z) dz = \omega_1 + i \omega_2$  avec

$$\begin{cases} \omega_1 = P dx - Q dy \\ \omega_2 = Q dx + P dy \end{cases}$$

où  $P$  (resp.  $Q$ ) désignent comme d'habitude les parties réelle et imaginaire de  $f$ , et  $z = x + iy$ .



Soit  $A = \frac{\partial}{\partial x}$  et  $B = \frac{\partial}{\partial y}$  et  $\nabla_1, \nabla_2$  les deux connexions métriques associées définies sur  $U$  respectivement par  $\omega_1$  et  $\omega_2$ . Dire que  $f$  est holomorphe signifie que les formes  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont fermées, et que par conséquent les connexions  $\nabla_1$  et  $\nabla_2$  sont plates. Le résidu, au sens habituel des fonctions méromorphes, est donné par

$$R(f, z_\lambda) = \frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma_\lambda} f(z) dz$$

$$R(f, \infty) = \frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma_\infty} f(z) dz$$

THÉORÈME 6.

$$\text{Rés}(\nabla_1, z_\lambda) + i \text{Rés}(\nabla_2, z_\lambda) = i R(f, z_\lambda),$$

$$\text{Rés}(\nabla, \infty) + i \text{Rés}(A_2, \infty) = 2(1+i) + i R(f, \infty).$$

Appliquons en effet le théorème 4 avec  $A = \frac{\partial}{\partial x}$ ,  $B = \frac{\partial}{\partial y}$

1) Puisque le champ de repères  $(A, B)$  est prolongeable en tout point  $z$  situé à distance finie, le théorème 4 (ou 1) s'écrit:

$$\text{Rés}(\nabla_1, z_\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_\lambda} \omega_1,$$

$$\text{Rés}(\nabla_2, z_\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_\lambda} \omega_2,$$

et

$$\text{Rés}(\nabla_1, z_\lambda) + i \text{Rés}(\nabla_2, z_\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_\lambda} f(z) dz = i R(f, z_\lambda)$$

2) Puisque  $I\left(\frac{\partial}{\partial x}, \infty\right) = I\left(\frac{\partial}{\partial y}, \infty\right) = 2$ , le théorème 4 s'écrit

maintenant:

$$\text{Rés}(\nabla_1, \infty) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_\infty} \omega_1 + 2 ,$$

$$\text{Rés}(\nabla_2, \infty) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_\infty} \omega_2 + 2 .$$

Donc

$$\begin{aligned} \text{Rés}(\nabla_1, \infty) + i \text{Rés}(\nabla_2, \infty) &= \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_\infty} f(z) dz + 2(1+i) \\ &= i R(f, \infty) + 2(1+i) \end{aligned}$$

C.Q.F.D.

### RÉFÉRENCES

- [1] BERGER, M. et B. GOSTIAUX. *Géométrie différentielle*. Ed. Colin, 1971.
- [2] DE RHAM, G. *Variétés différentielles*. Ed. Hermann, 1955.
- [3] HICKS, N. J. *Notes on differential Geometry*. Ed. Van Nostrand, 1956.
- [4] LEHMANN, D. *Résidus des connexions à singularités* (à paraître aux *Annales de L'institut Fourier*).
- [5] ——— *Cours de Géométrie et Topologie en maîtrise* (polycopiés de l'U.E.R. de Mathématiques de l'Université de Lille 1), 1979-80, chap. V.
- [6] LELONG-FERRAND, J. *Géométrie différentielle*. Ed. Masson, 1963.
- [7] THORPE, J. A. *Elementary topics in differential Geometry*. Ed. Springer, 1979.

(Reçu le 18 juillet 1980)

Daniel Lehmann

U.E.R. de Mathématiques pures et appliquées  
 Université des Sciences et Techniques de Lille  
 F-59650 Villeneuve d'Ascq