



**HAL**  
open science

# Quelques remarques sur les variétés, fonctions de Green et formule de Stokes.

Samy Skander Bahoura

► **To cite this version:**

Samy Skander Bahoura. Quelques remarques sur les variétés, fonctions de Green et formule de Stokes.. 2017. hal-01635538v6

**HAL Id: hal-01635538**

**<https://hal.science/hal-01635538v6>**

Submitted on 19 Oct 2018 (v6), last revised 25 Apr 2024 (v23)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# QUELQUES REMARQUES SUR LES VARIÉTÉS, FONCTIONS DE GREEN ET FORMULE DE STOKES.

SAMY SKANDER BAHOURA

RÉSUMÉ. On donne quelques remarques sur les surfaces K3, projectifs complexe, réels, le Tore, la topologie des surfaces réelles de dimension 2, la fonction distance au bord, l'orientabilité des boules geodesiques, traces de Sobolev et fonctions de Green et un Théorème de Dualité.

## 1. QUELQUES REMARQUES :

1) Sur les mesures de Hausssdorf et la formule d'integration par parties ( Pourquoi la version Fusco est equivalente a celle de Necas ?) :  $H^{n-1}(\partial\Omega) < +\infty$  alors la mesure  $H_{|\partial\Omega}^{n-1}$  est une mesure de Radon, donc reguliere.

Soit  $A \subset \partial\Omega$ ,  $H_{|\partial\Omega}^{n-1}$  mesurable, comme la mesure est une mesure de Radon, elle est reguliere :

$$\forall \epsilon > 0 \exists K_\epsilon, O_\epsilon, K_\epsilon \subset A \subset O_\epsilon, H_{|\partial\Omega}^{n-1}(O_\epsilon - K_\epsilon) \leq \epsilon.$$

On a,  $O_\epsilon = V_\epsilon \cap \partial\Omega$ , avec  $V_\epsilon$  ouvert de  $\mathbb{R}^n$ .

Dapres le Theoreme d'Urysohn ;

$$\exists f_\epsilon \in C^0(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^+), 0 \leq f_\epsilon \leq 1, f_\epsilon \equiv 1, \text{ sur } K_\epsilon, \text{ supp } f_\epsilon \subset V_\epsilon,$$

Soient  $\nu_1, \nu_2$  les normales (interieures) dans la formulation de Fusco et Necas :

$\Omega$  est un ouvert Lipschitzien, on ecrit la formule d'integration par parties, dans les deux formulation, la mesure sur le bord est la mesure de Hausssdorf  $H_{|\partial\Omega}^{n-1}$ , ceci est du a la formule de l'aire appliquee localement dans des cartes. De plus par Fusco le bord reduit est egal au bord usuel et  $|D\chi_\Omega| = H_{|\partial\Omega}^{n-1}$  :

$$\int_\Omega \text{div} \varphi = - \int_{\partial\Omega} \varphi \nu_1 dH^{n-1} = - \int_{\partial\Omega} \varphi \nu_2 dH^{n-1}, \forall \varphi \in C_c^1(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n),$$

Avec  $\nu_1, \nu_2 \in L^\infty(\partial\Omega)$ .

Donc,

$$\int_{\partial\Omega} \varphi(\nu_1 - \nu_2) dH^{n-1} = 0, \forall \varphi \in C_c^1,$$

Comme  $C_c^1$  est dense dans  $C_c^0$ , la formule precedente est vraie pour  $\varphi \in C_c^0$

On applique cette formule a  $f_\epsilon$ , on obtient pour tout mesurable  $A$  :

$$\int_A (\nu_1 - \nu_2) dH^{n-1} = O(\epsilon) \rightarrow 0,$$

Donc,

$$\nu_1 = \nu_2, H_{|\partial\Omega}^{n-1}, p.p$$

Ce qu'on a montré cest que la normale explicite de la formulation Necas est egale a la normale theorique de la formulation de Fusco.

Dans la formulation de Fusco, la normale est obtenue comme "blow-up" autour d'un point du bord, cela revient à prendre la normale à la tangente au bord, par des cartes Lipschitziennes, on voit par ce procédé "blow-up", que la normale exterieure est la normale exterieure usuelle. (Car, l'espace tangent "à la mesure" ("blow-up") est l'espace tangent usuel).

La formule d'integration par parties est bien connues. Pour sa preuve, voir les livres de Fusco (bords avec singularités par recouvrement et suite de compacts  $K_n \rightarrow \partial\Omega - \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$  dans le cas où il n'y a qu'un nombre fini de points singuliers), Necas et Azé.

La formule d'integration par parties sur un domaine singulier en un nombre fini de points en dimension 2 (par exemple) :

La formule est locale, on considere  $B(x_j, 1/n)$  avec  $x_j$  un point singulier du bord. La formule est locale, par un recouvrement et une partition de l'unité on écrit que (voir le Azé, dans chaque partie du recouvrement) :

$$\int_{\Omega} \operatorname{div}((1 - \alpha_n)u) dx = \int_{\partial\Omega} (1 - \alpha_n)u d\sigma,$$

avec  $\alpha_n$  une fonction reguliere et à support compact dans  $B(x_j, 1/n)$ ,  $\alpha_n \equiv 1$  dans  $B(x_j, 1/2n)$ . Avec le fait,  $|\nabla\alpha_n| \leq Cn$  et  $\mu_L(B(x_j, 1/n)) \leq C/n^2$  et  $H_1(\{x_j\}) = 0$ , la mesure de Hausdorff 1-dimensionnelle (ici, on l'a fait pour le point  $x_j$ ). Puis on fait tendre  $n \rightarrow +\infty$ . On obtient la formule de Stokes ou Green-Riemann pour un domaine contenant un nombre fini de singularités au bord.

2) Pourquoi quand on a  $u \in W^{1,p} \cap C^0(\bar{\Omega})$ ,  $tr(u) = u$ ? on utilise Necas et Brezis :

On a :

$\Omega$  est un ouvert Lipschitzien  $\Rightarrow$  cartes Lipschitziennes  $\Rightarrow$  un operateur de Prolongement  $Pu \in C_c^0(\mathbb{R}^n) \cap W^{1,p}(\mathbb{R}^n)$ , d'après la construction de l'operateur de Prolongement dans des cartes,  $Pu|_{\bar{\Omega}} = u$  et,  $\chi_n(\rho_n * Pu) \rightarrow Pu$  dans  $C_K^0(\mathbb{R}^n)$  et dans  $W^{1,p}$  où  $K$  est un compact de  $\mathbb{R}^n$ , donc :

$$\|Tr(\chi_n(\rho_n * Pu)) - Tr(u)\|_{L^p(\partial\Omega)} \rightarrow 0,$$

Et,

$$\|Tr(\chi_n(\rho_n * Pu)) - u\|_{C^0(\partial\Omega)} \rightarrow 0,$$

Doù,

$$Tr(u) = u, \quad H_{|\partial\Omega}^{n-1} p.p,$$

Remarque : Par la formulation de Fusco,

$$Tr(u) = u_{\Omega} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{\int_{B_{\rho}(x)} u(y) dy}{|B_{\rho}(x)|}$$

on voit que si  $u \in C^0(\bar{\Omega})$ ,  $Tr(u) = u$ .

3) Pourquoi  $W_0^{1,1} = \{u \in W^{1,1}, tr(u) = 0\}$  avec  $\Omega$  ouvert Lipschitzien. Voir le livre de Necas. On raisonne par rapport aux suites  $(\exists u_i \in C^{\infty}(\mathbb{R}^n), u_i \rightarrow u \in W^{1,p}(\Omega)$  pour les traces et la restrictions a des sous ensembles d'ouverts Lipschitzien).

a) On considere  $\tilde{u} = u \times 1_{\Omega} \in W^{1,1}(\mathbb{R}^n)$  par integration par parties et formule de Stokes.

b) Par des cartes et on multipliant par une fonction test a support compact, localement  $\tilde{u} \in W^{1,1}(Q)$  avec  $Q$  un n-cube "au dela" du bord et nulle avant d'atteindre les cotes du bord qui sont interieurs.

On considere alors  $\tilde{u}_{\lambda}$ , "la translatée" de  $\tilde{u}$  suivant la direction normale au bord. le support de  $\tilde{u}_{\lambda}$  est compact et strictement à l'interieur du domaine.

On a : (on applique ces idées à un cube infini dans la direction normale au bord image (locale) de  $\partial\Omega$ , puis on se restreint au n-cube de depart. Sur les bords, la restriction de l'homeomorphisme Lipschitzien envoie les traces sur les traces par la formule de l'aire ou coaire. (par convergence de suites sur des ouverts Lipschitziens).)

$\tilde{u}_{\lambda} \in W^{1,1}(Q_{-\lambda})$  avec,

$$\nabla(\tilde{u}_{\lambda}) = (\nabla\tilde{u})_{\lambda}.$$

puis en utilisant des fonctions tests dans  $Q$  on obtient :

$\tilde{u}_{\lambda} \in W^{1,1}(Q)$  pour  $\lambda$  assez petit.

Le support de  $\tilde{u}_{\lambda}$  est strictement dans  $Q$ , on obtient alors,  $\tilde{u}_{\lambda} \in W_0^{1,1}(Q)$ .

Par un theoreme de la moyenne (voir Necas,  $\tilde{u}$  s'annule en dehors de  $Q$ ), on obtient  $\tilde{u}_{\lambda} \rightarrow \tilde{u}$  dans  $W^{1,1}$ . Donc,  $\tilde{u} \in W_0^{1,1}$  et  $u \in W_0^{1,1}$ .

4) Soit  $(M, g)$  une variete riemannienne et soit  $B_r(x)$  une boule geodesique tres petite, telle que l'exponentielle realise un diffeomorphisme sur la boule de  $\mathbb{R}^n$  : pourquoi, la normale exterieure  $\nu = \partial_r$  ?

On a : l'image de la base canonique par l'exponentielle est la base canonique :

$d(\exp_x)(\partial_i) = \tilde{\partial}_i$ , on identifie les 1-formes  $dx_i$  et  $d\tilde{x}_i$ .

Soit  $B^0$  la base canonique de  $\mathbb{R}^n$  et  $\tilde{B}^0$  la base  $\{\tilde{\partial}_1, \dots, \tilde{\partial}_n\}$  la base canonique de la boule geodesique  $B_r(x)$ , alors  $d(\exp_x)(B^0) = \tilde{B}^0$ .

La base  $B_{0,r} = \{\partial_{0,r}, \partial_{\theta_1}, \dots, \partial_{\theta_{n-1}}\}$  est directe, donc  $\det_{B^0}(B_{0,r}) > 0$ .

Soit  $\tilde{B}_r = \{d(\exp_x)(\partial_{0,r}), \tilde{\partial}_{\theta_1} = d(\exp_x)(\partial_{\theta_1}), \dots, \tilde{\partial}_{\theta_{n-1}} = d(\exp_x)(\partial_{\theta_{n-1}})\}$ , alors :

$\det_{\tilde{B}^0}(\tilde{B}_r) = [\det : B_r \rightarrow B_{0,r}] \circ [\det : B_{0,r} \rightarrow B_r, \text{ qui est directe}] \circ [\det : B_r \rightarrow \tilde{B}_{0,r}] > 0$

La premiere est  $d(\exp_x)^{-1}$  et la derniere  $d(\exp_x)$  le determinant selimine, il reste celui de  $B_{0,r}$  vers  $B^0$  qui est direct.

Donc la base  $\tilde{B}_r$  est directe par rapport a la base  $\tilde{B}^0$ .

$n_{ext}$  est definit precisement comme cela tel que  $(n_{ext}, \tilde{\partial}_{\theta_1}, \dots, \tilde{\partial}_{\theta_{n-1}})$  est directe par rapport a  $\tilde{B}^0$ .

On peut utiliser la formulation de S. Lang :

Soient  $\omega_\theta$  et  $\Omega$  les formes volumes sur la sphere  $S_r(x)$  et la boule  $B_r(x)$   $n_{ext}$  est tel que son dual  $n_{ext}^*$  verifie :

$$n_{ext}^* \wedge \omega_\theta = \Omega,$$

C'est-a-dire que à des constantes multiplicatives pres (determinant des metriques)) :

$$n_{ext}^* \wedge d\tilde{\theta}_1 \wedge \dots \wedge d\tilde{\theta}_{n-1} = d\tilde{x}_1 \wedge \dots \wedge d\tilde{x}_n$$

cela veut dire que :

$$\Omega(n_{ext}, \tilde{\partial}_{\theta_1}, \dots, \tilde{\partial}_{\theta_{n-1}}) > 0$$

c'est a dire que la base  $\{n_{ext}, \tilde{\partial}_{\theta_1}, \dots, \tilde{\partial}_{\theta_{n-1}}\}$  est directe par rapport a la base  $\{\tilde{\partial}_1, \dots, \tilde{\partial}_n\}$  et donc  $n_{ext} = \partial_r$ .

Voir aussi le livre de Gallot-Hulin-Lafontaine où la normale exterieure est definie par le produit interieur. (Par rapport à la base du bord et l'element de volume du bord) On a le meme resultat.

Par sa construction, la boule geodesique est orientable et orientée. En chaque point, l'exponentielle conserve l'orientation et induit une orientation par rapport à la carte  $(\Omega, \varphi)$  à partir de laquelle elle construite. Par un argument de recouvrement, si on raisonne sur un compact  $K$  en utilisant l'exponentielle et cette propriété d'orientabilité des boules geodesiques via l'exponentielle, il faudra supposé la variété orientable.

5) Dans la construction de la fonction de Green pour un operateur coercif  $\Delta + a$  voir le livre d'Aubin et le monograph de Frederic Robert, on utilise le produit de convolution et le fait que les traces des fonctions sont nulles jusqu'à l'etape :

$$-\Delta V_x + aV_x = 0, \text{ dans } M, V_x = -G_x, \text{ sur } \partial M,$$

Alors la fonction  $G_x \in C^{1,\theta} \cap W^{2,p}(M - \{x\})$ , car la parmetrix  $H_x$  verifie au sens  $C_0^2$  (Agmon),

$$-\Delta_{dist} H_x = \delta_x - \Delta_y H_x \in L^\infty(M - \{x\})$$

Les  $\Gamma_i$  verifient cette proprité, elles sont nulles au bord car leur support est dans  $B(m, \delta_m/2)$  et le rayon dinjectivité  $= \delta_m \leq d(m, \partial\Omega)$ . Puis on utilise des cartes pour se ramener au demi-espace et utiliser les estimations de Agmon-Douglis-Nirenberg.

On peut aussi, utiliser  $G_x$  dans lequation et utiliser les Theoremes de Gilbarg-Trudinger :

$$\Delta(V_x - \eta G_x) + a(V_x - \eta G_x) = -\Delta(\eta G_x) + a(\eta G_x) \in L^p, \text{ et } (V_x - \eta G_x) = 0, \text{ sur } \partial M,$$

Avec  $\eta$  une fonction cutoff egale a 1 dans un voisinage de  $\partial M$  et 0 au voisinage de  $x$  ( nulle au voisinage de la singularité).

On obtient  $V_x - \eta G_x \in W^{2,p}(M)$  et comme  $\eta G_x \in W^{2,p}(M)$ , alors :  $V_x \in W^{2,p}(M)$ .

Remarques :

1) Dans la formulation variationelle on pour une solution  $u \in W_0^{1,2}$  de :

$$-\Delta u + au = f, \text{ et } u = 0 \text{ sur } \partial M,$$

Dans le monograph de Brezis-Marcus-Ponce (ils supposent les solutions  $W_0^{1,1}$ ), ils prouvent que ces solutions sont au sens  $C_0^2$  (Agmon), d'où on peut prouver qu'elles sont  $W^{2,p}$  et qu'on a les estimations a priori dans  $W^{2,p}$  d'Agmon (méthode des quotients différentiels) ou en sachant qu'elles sont  $W^{2,p}$  qu'on a les estimations a priori par Calderon-Zygmund écrits dans le Gilbarg-Trudinger.

Dans le cas du Laplacien, la constante dans l'inégalité de Calderon-Zygmund, ne depend pas de  $\Omega$  ce qui fait qu'on peut par continuité obtenir l'estimation  $W^{2,p}$  d'un operateur general à partir du Laplacien. On approche l'operateur par un operateur constant.

2) Les estimations d'Agmon-Douglis-Nirenberg, dans ce cas sont basées (sur de l'intergation par parties, par rapport a la variable  $t > 0$ ) et sur les integrales singulieres de Calderon-Zygmund.

C'est une autre preuve par le potentiel du demi-espace.

Par exemple :

En effet, on considere le probleme suivant :

$$-Lu = 0, \quad u = \varphi \text{ sur } \partial\Omega$$

On peut supposer  $L$  le Laplacien euclidien, le cas general se ramene au cas constant (voir Gilbarg-Trudinger, par continuité on approche l'operateur general par un operateur constant).

De meme pour Agmon-Douglis-Nirenebrg, ils considerent des operateurs a coefficients constants, et dans le cas du Laplacien, la constante dans linegalité obtenue ne depend pas de  $\Omega$  ce qui fait qu'on peut par continuité obtenir l'estimation  $W^{2,p}$  d'un operateur general à partir du Laplacien. On approche l'operateur par un operateur constant.

Par exemple on écrit à l'ordre 1 :

$$\text{Il suffit, par des cartes, de consider le demi-espace et on utilise le noyau de Poisson } P(x, t) = \frac{t}{(t^2 + |x|^2)^{(n+1)/2}}.$$

On suppose que  $\varphi \in C^2 \cap W^{2,p}$ . On écrit :

$$\partial_s(P(x - y, t + s)\varphi(y, s)) = \partial_s P \varphi + P \partial_s \varphi,$$

On integre en  $y$  et  $s$  et on obtient (on utilise la representation integrale de  $u$  en fonction du noyau de Poisson) :

$$u(x, t) = \int_{\mathbb{R}^n} P(x - y, t)\varphi(y, 0)dy = \int P(x - y, t + T)\varphi(y, T) + \int \int \partial_t P \varphi + \int \int P \partial_t \varphi,$$

On a  $\partial_t P \equiv \frac{1}{|Q|^{n+1}}$ ,  $Q$  un point quelconque, et  $\dim(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}) = n + 1$ , on utilise l'integrale singuliere de Calderon-Zygmund.

Pour  $\partial_t u, \partial_x u$ , on derive sous le signe  $\int$  et puis on integre par parties sur  $\mathbb{R}^n$ . On obtient des integrales du type,

$$\int \int \partial_t P \partial_t \varphi, \quad \int \int \partial_t P \partial_x \varphi, \quad \text{et} \quad \int \int \partial_x P \partial_t \varphi$$

On elimine  $\int P(x - y, t + T)\varphi(y, T)$  par son estimation en  $c(T) \rightarrow 0$  quand  $T \rightarrow +\infty$ .

On obtient des estimations du type :

$$\|\partial u\|_{L^p} \leq C \|\varphi\|_{W^{1,p}},$$

On refait la meme chose en derivant une deuxieme fois.

Comme dans le Gilbarg-Trudinger, on écrit les solutions en fonction du potentiel du demi-espace (voir chapitre 4 de Gilbarg-Trudinger). Dans le cas d'Agmon-Douglis-Nirenberg, ils considerent le demi-espace.

6) Sur le degré topologique et l'article de De Figueiredo-Lions-Nussbaum : ils utilisent la definition du degré topologique de Leray-Schauder :

$\exists T_0 \in \mathbb{R}^+$ ,  $\deg[x - F(x, T_0)B_{R_2}, 0] = 0$  cela veut dire qu'il n'y a pas de solution a cette equation.

$x - F(x, t) \neq 0$ ,  $t \in \mathbb{R}^+$ ,  $x \in \partial B_{R_2}$ , cela veut dire qu'on peut utiliser l'homotopie :  
 $\deg[x - F(x, t), B_{R_2}, 0] = \deg[x - F(x, 0), B_{R_2}, 0] = \deg[x - F(x, T_0), B_{R_2}, 0] = 0$ ,  
 $t = 0$ ,  $F(x, 0) = \Phi(x)$  et par Nussbaum et la propriété d'excision et d'additivité, on peut décomposer le degre en 2, la condition est que  $\Phi(x) \neq x$  sur  $\partial B_{R_1}$  et  $\Phi(x) = F(x, 0) \neq 0$  sur  $\partial B_{R_2}$ , alors :

$$0 = \deg[x - \Phi(x), B_{R_2}, 0] = \deg[x - \Phi(x), B_{R_1}, 0] + \deg[x - \Phi(x), \{R_1 < \|x\| < R_2\}, 0],$$

La dernière condition est celle de l'homotopie avec l'identité et le degre de l'identité est 1.

$$\deg[x - \beta\Phi(x), B_{R_1}, 0] = \deg[x - \Phi(x), B_{R_1}, 0] = \deg[x, B_{R_1}, 0] = 1,$$

Donc,

$$\deg[x - \Phi(x), \{R_1 < \|x\| < R_2\}, 0] = -1,$$

Dans leur exemple, De Figueiredo-Lions-Nussbaum, utilisent l'estimation integrale  $\int_{\Omega} f(u(x) + t)dx \leq C$ ,  $C$  independante de  $t$  et les estimations a priori pour verifier que les conditions d'applications du degre topologique sont verifiées, dans ce cas les  $t$  et les solutions sont uniformément bornés.

Cernant l'article de Crandall-Rabinowitz, il traite du cas où en particulier on a un terme nonlineaire du type exponentiel. Grace à la condition de stabilité (ils prennent des fonctions tests particulieres), ils prouvent que la masse et le volume ou energie, sont bornées (jusqu'a la dimension 10).

7) Sur les surfaces  $K3$ . Soit  $E$  un fiber bundle (fibré vectoriel) et  $M$  une variété Complexe de metrique  $h$ .

Remarquons d'abord que cette variété est orientable car les changements de cartes sont holomorphes donc le Jacobien réel est le carré du Jacobien complexe, cest du a l'holomorphic, comme en dimension 2 (equation de Cauchy-Riemann).

Pour ce fibre bundle  $E$ , il existe une unique connexion compatible avec l'holomorphic et la metrique, c'est l'analogue complexe de la connexion de Levi-Cevita :

$$\pi^{0,1}\nabla = \bar{\partial}$$

et,

$$\nabla h = 0$$

C'est la connexion hermitienne ou connexion de Chern, semblable a la connexion de Levi-Cevita dans le cas Riemannien.

Des qu'on a une connexion, une derivate covariante, on a la courbure, on derive 2 fois, comme dans le cas Riemannien, on a la courbure et donc la courbure de Ricci et la classe de Chern, cest la classe de Ricci.

Connexion de Chern  $\Rightarrow$  symboles de Christoffels  $\Rightarrow$  Connexion form,  $\omega$ ,  $\Rightarrow$  Curvature form,

Dans le cas  $E = \wedge^2 T^*(M)$  les 2-formes alternees :

$\omega = \omega_i dx^i \otimes (dx^j \wedge dx^k)$ , car ici, ce qui joue le role de champs de vecteurs (pour la connexion de Levi-Cevita), c'est les sections sur  $E$  (les vecteurs de base sont les 2-formes alternees), les champs de 2-formes alternees,

$d\omega = \Omega_{ij} dx^i \wedge dx^j \otimes dx^l \wedge dx^m$ , des qu'on derive encore deuxieme fois on obtient la courbure.

Dans le cas des surfaces  $K3$ ,  $E = \wedge^2 T^*(M) = 0$ , 2 formes alternees :

Si  $E = 0$ , la connexion nulle convient pour la derivation sur  $E$  or la connexion de Chern est unique dou  $\nabla \equiv 0$ . Donc, il ny a pas de courbure do la classe de Chern est nulle,  $c_1 = 0$ .

Les groupes de cohomologies sont connues :

faire attention :

1) ici, c'est les coherent sheaves sur les varietes complexe, il faut prendre la dimension complexe 2 et non reelle pour les groupes de Cohomologie du Sheaf et pour la dualite de Serre, cela va de 0 à 2, par contre pour les nombres de Betti et la theorie de Hodge, on prend la dimension reelle 4, avec la convention  $H^r = \sum_{\{p+q=r, 0 \leq p, q \leq 2\}} H^{p,q}$ ,  $p, q$  varient selon la dimension complexe, quand on inverse  $p$  et  $q$  on a par la conjugaison complexe, la meme dimension.

2) Par la cohomologie et dualité de Dolbeault,  $H^{0,1}$  est isomorphe à la cohomologie de Čech  $H^1(S = K3, \Omega^0) = H^1(S = K3, O_S)$  car les 0-formes sont les fonctions et on prend la cohomologie dans le faisceau de fonctions  $O_S$  et par définition  $H^1(S, O_S) = 0$  d'où  $h^{0,1} = \dim H^{0,1} = \dim H^1(S, O_S) = 0$ . On voit que les groupes de cohomologie de sheaf (faisceau) sont des données et par la dualité de Serre (dimension complexe), on les connaît tous, il n'y a que le premier et le dernier, donc la caractéristique de Sheaf égale à 2.

De même pour la cohomologie de Hodge (dimension réelle 4) on les connaît tous ainsi que les nombres de Betti.

Le théorème de Max Noether donne  $X = S = K3$  :

$\chi(X, O_X) = \chi(S, O_S) = 2 = \frac{\int c_1 \wedge c_1 + \int c_2}{12}$ , avec  $c_1$  la première classe de Chern et  $c_2$  la deuxième classe de Chern, définies dans le développement de la courbure  $\Omega$

$$\det(\Omega - tI) = 1 + \text{tr}(\Omega) + \Omega \wedge \dots = 1 + c_1 + c_2,$$

L'intégrale  $\int c_2$  est le 2ème nombre de Chern dans le cas d'une surface il est égale à la caractéristique d'Euler-Poincaré, dans le cas d'une surface  $K3$ , c'est donc  $\chi(K3) = \int c_2 = 24$ .

Ici, quand on contracte on élimine des termes du type  $dx^j \wedge dx^k$  et  $c_2$  est une quatre forme ("forme volume") car on a contracté une 8-forme.

Plus généralement, on définit les nombres de Chern comme :  $\int c_k$  avec  $c_k$  la  $k$ -ième classe de Chern.

Comme la surface  $K3$  est de dimension 4 et de classe de Chern nul, il existe une métrique d'Einstein-Kähler de constante 0, voir le livre d'Aubin. Donc, cette variété possède une métrique d'Einstein de constante nulle, donc la courbure de Ricci est nulle et donc la courbure scalaire aussi.

(Remarquons d'abord qu'avec  $(K3, h, \nabla)$  on a une structure hermitienne et par Siu,  $K3$  est Kähler, c'est à dire que la structure Riemannienne  $(K3, g = \text{Re}(h), \nabla_g)$  est compatible avec la structure complexe, les connexions de Chern et Levi-Cevita coïncident.

On sait que la classe de Chern est nulle et donc, il existe une métrique d'Einstein-Kähler de constante 0).

On utilise la formule donnant la caractéristique d'Euler-Poincaré en fonction du tenseur de Weyl et de la courbure de Ricci et Scalaire, pour enfin dire que le tenseur de Weyl est non nul.

$$0 \neq \chi(K3) \equiv \int |Weyl|^2 + (\text{Ricci}_g, S_g) = \int |Weyl|^2$$

Donc, une surface  $K3$  possède une métrique non-localement conformement plate.

a) Le Projectif complexe de dimension complexe  $n \geq 2$  est une variété Kählerienne, c'est à dire qu'elle possède (3 structures) dont la Riemannienne et complexe, qui sont compatibles, les connexions de Levi-Cevita et de Chern sont les mêmes, pour la métrique de Fubini-Study. Il est d'Einstein et de courbure sectionnelle non constante, donc non localement conformement plat. Il est orientable.

Pourquoi la courbure sectionnelle du projectif complexe de dimension  $n \geq 2$  est non-constante : C'est écrit dans le Gallot-Hulin-Lafontaine.

a) Ils utilisent l'équation des champs de Jacobi, pour déterminer le tenseur de Riemann.

b) Ils utilisent la multiplication par le nombre complexe,  $i$ , la structure complexe,  $J$ . Et le fait que  $H_x$  sont les vecteurs orthogonaux à  $z$  et  $iz$ ,  $z \in \mathbb{S}^{2n+1}$ .

Ils utilisent les variations  $H(t, s)$  et les champs de Jacobi.

La courbure sectionnelle pour  $u, v$  est calculée à partir du champ de Jacobi,  $Y(s) = \cos s u + \sin s Jv$  :

$$K(u, v) = 1 + 3 \sin^2 s.$$

qui n'est pas constante.

b) Le Projectif complexe de dimension complexe 1, est isométrique à la sphère de dimension 2 réelle et donc de courbure sectionnelle constante. C'est une surface de Riemann réelle (donc localement plate).

Pourquoi, le Projectif complexe de dimension 2 est isométrique à la sphère de dimension 2. Voir le Gallot-Hulin-Lafontaine :

1-On utilise le quotient par un groupe de Lie. Comme le groupe de Lie agit proprement et transitivement et..., cela veut dire qu'il existe une structure de variété sur le quotient  $\mathbb{S}^3/\mathbb{S}^1$  telle que l'application de passage au quotient soit une submersion.

2-Le fait qu'on ait une submersion, on utilise la définition, localement, on a des sous-variétés, on construit, par des cartes, une base du noyau et après un procédé d'orthogonalisation de Gram-Schmidt, on construit un supplémentaire orthogonal. l'application de passage au quotient est bijective sur ce supplémentaire. ce qui permet de construire localement un "lift".

3-On définit la métrique sur le quotient de telle manière que l'application de passage au quotient soit une isométrie, on la construit à partir du lift et par projection sur  $H_x$ .

(Remarque : soit  $p(x) = [x]$  l'application de passage au quotient et  $\gamma$  une isométrie,  $x = \gamma^{-1}o\gamma(x) \Rightarrow [x] = [\gamma(x)] \Leftrightarrow p(x) = p\circ\gamma(x)$ , ceci est important dans la construction de l'isométrie en prouvant que cela ne dépend pas de point de la fibre).

On voit que pour le cas de  $\mathbb{S}^3$  et  $\mathbb{P}^1(\mathbb{C}) \cong \mathbb{S}^3/\mathbb{S}^1$ , que la métrique du projectif est celle de la 3-sphere pour des vecteurs particuliers  $v, w$ , par exemple orthogonaux à  $z$  et  $iz$  avec  $z \in \mathbb{S}^3$ . ( le produit scalaire sur  $H_x$  est égal à celui pour l'espace tangent au quotient).

Par exemple si on prend  $z = (1, 0) = [(1, 0), (0, 0)]$  en notation complexe, les  $v, w$  sont de la forme  $v = (0, v_1), w = (0, w_1)$ . Puis en utilisant l'application  $H$  du Gallot-Hulin-Lafontaine  $H(u, v) = (2u\bar{v}, |u|^2 - |v|^2)$  et les chemins  $u(t) = \cos t z + \sin t v, w(t) = \cos t z + \sin t w$ , (on se ramène à ce cas par une rotation car la variété est invariante par  $U(n+1)$ , les rotations complexes, (elle est construite à partir de  $S^{2n+1}$ ), on a :

$$\langle H(u(t))', H(v(t))' \rangle_{\mathbb{S}^2_{t=0}} = \langle v, w \rangle_{\mathbb{S}^3} = \langle v, w \rangle_{\mathbb{P}^1(\mathbb{C})}.$$

Cela veut dire que,

$$H^*(g_{\mathbb{S}^2}) = g_{\mathbb{P}^1(\mathbb{C})}.$$

Remarque : Les revêtements riemanniens, sont similaires, au lieu d'avoir une submersion, on a un difféomorphisme local. Voir, le Gallot-Hulin-Lafontaine, pour la construction du Tore et des projectifs réels (leur métriques).

Dans le cas des revêtements, puisqu'il y a un difféomorphisme local, la courbure sectionnelle se conserve (voir le Hebey). On voit alors, dans la construction du projectif réel et le Tore, que la courbure sectionnelle est constante, donc, elles sont conformement plates.

On a la même chose avec les groupes de Lie et les espaces homogènes. On a une fibration qui est une submersion et on construit une métrique  $G$ - invariante par le même procédé que les submersions et les revêtements. De plus, si par exemple, on considère  $P_n(\mathbb{C})$ , les groupes unitaires (les rotations complexes)  $U(n+1)$  et  $SU(n+1)$  agissent transitivement et proprement sur  $P_n(\mathbb{C})$  par l'intermédiaire de la sphere  $\mathbb{S}^{2n+1}$ .

1-  $P_n(\mathbb{C})$  est à la fois identifiable à  $U(n+1)/U(1) \times U(n)$  et  $SU(n+1)/S(U(1) \times U(n))$ . De plus, comme on la vu dans le cas des submersions, pour connaître la métrique de  $P_n(\mathbb{C})$ , il suffit de se placer sur la sphere  $S^{2n+1}$ , car on prend  $H_x$  l'orthogonal de  $z$  et  $iz$ , avec  $z \in S^{2n+1}$ . Pour ce qui concerne les groupes de Lie, la formule donnant la métrique  $G$ - invariante est égale à ( $C$  désigne le produit scalaire dans  $\mathbb{C}$ ) :

$$\langle x|y \rangle_{[e], P_n(\mathbb{C})} = \int_{H_1} \langle Ad_{h_1}.x | Ad_{h_1}.y \rangle_C dv_{H_1}$$

Or, dans l'espace des matrices, la dérivée de l'adjoint est connue et est égale, (on raisonne par rapport aux chemins et en particulier de l'exponentielle) :

$$Ad_{h_1}.x = Ad_{G/H}h_1.x = h_1^{-1}.x.h_1, \quad Ad_{h_1}.y = h_1^{-1}.y.h_1,$$

avec l'identification,  $x = [x] = u, [x] \in SU(n+1)/S(U(1) \times U(n))$  et  $x = u \in H_x \subset \mathbb{C} \cong P_n(\mathbb{C})$ .

Car ici,  $G/H = P_n(\mathbb{C})$  et on prend le plan tangent et dans ce cas il faut prendre des vecteurs de  $H_x$  donc de  $S^{2n+1}$ , (raisonner par rapport à l'exponentielle et les chemins). ( $t \rightarrow \exp(tx)$  est un bon chemin et en plus quand on dérive on a l'adjoint). (on se ramène au produit scalaire de  $S^{2n+1}$ ).

$$G = SU(n+1), H = G_m = S(U(1) \times U(n)).$$

**Remarque :** La metrique sur  $G/H$  est definie de telle maniere que la correspondance :  $F : [x] \in G/H \rightarrow u \in P_n(C)$  soit une isometrie. (voir le livre de Gallot-Hulin-Lafontaine, sur la correspondance via  $S^{2n+1}$  entre  $SU(n+1)/S(U(1) \times U(n))$  en tant que groupe de Lie et  $P_n(C)$  via  $S^{2n+1}$ . Donc, on retrouve le fait que les metriques sont proportionnelles. (Eux, ils notent  $U(n+1)/U(1) \times U(n)$ ).

Gallot-Hulin-Lafontaine disent qu'on peut prendre "any scalar product on  $T_e(G/H)$ ". Comme  $G/H$  s'identifie par  $F$  à  $P_n(C)$ , on choisit le produit scalaire tel que  $F$  soit une isometrie vers le projectif complexe. Ce qui revient à obtenir le produit scalaire du projectif complexe.

Finalement, on écrit, puisque  $\bar{h}_1^t h_1 = 1$  et  $(\bar{h}_1^{-1})^t h_1^{-1} = 1$  :

$$\begin{aligned} \langle x|y \rangle_{[e], P_n(C)} &= \int_{H_1} \langle (h_1^{-1} \cdot y \cdot h_1)^t | h_1^{-1} \cdot x \cdot h_1 \rangle_C dv_{H_1} = \\ &= \int_{H_1} \langle (h_1^{-1})^t \cdot y^t \cdot (h_1^{-1})^t | h_1^{-1} \cdot x \cdot h_1 \rangle_C dv_{H_1} = \\ &= \int_{H_1} \langle y^t | x \rangle_C dv_{H_1} = \mu \langle x|y \rangle_C, \end{aligned}$$

avec,  $\mu > 0$  et  $x, y \in H_x$ , on reconnait le produit de deux vecteurs de  $S^{2n+1}$  qui donne le produit scalaire dans  $P_n(C)$ .

Ce qui a été prouvé est que la metrique  $G$ -invariante est égale à la metrique usuelle du projectif complexe.

Si, on considère la courbure de Ricci, alors :

Comme les seuls sous-espaces invariants sont  $[e]$  et  $G/H$ , la diagonalisation donne un facteur commun entre la courbure de Ricci et la metrique. (Ici, les variétés sont de dimensions finies, on peut parler de diagonalisation).

Donc, le projectif complexe est une variété d'Einstein.

Pour voir si le coefficient est  $s$ ,  $s > 0$  on utilise le Theoreme du Livre de Besse qui dit que si  $s = 0$  elle plate, c pas possible car la courbure sectionnelle serait constante. Si  $s < 0$  le projectif ne serait pas compact.

Donc, le projectif complexe est d'Einstein de constante  $s > 0$ .

(On a une isometrie  $F$  entre la variété homogène  $SU(n+1)/S(U(1) \times U(n))$  et  $P_n(C)$ . La courbure de Ricci du projectif complexe est  $(Ricci) \circ F$ , elle reste constante. voir le Hebey).

**Remarque :** Tout ce travail sur les groupes de Lie, sert en fait pour les ensembles de matrices. Cette Théorie est construite pour les groupes matriciels,  $SU(n+1), SO(n)$ ... (pour ces cas particuliers, les variétés sont de dimensions finies).

Donc :

1-Les revetements, dans la construction des metriques de courbures sectionnelles constantes, comme les projectifs réels, le Tore, les variétés Hyperboliques.

2-les submersions riemanniennes, dans la construction des projectifs complexes.

3-les fibrations, et groupes de Lie, dans la constructions, des variétés homogènes, puis par exemples, on compare, les metriques, comme pour le projectif complexe, qui est d'Einstein de constante  $s > 0$ . (La fibration est construite de telle maniere qu'on a une strucutre de variété lisse pour la variété quotient. La fibration sert dans la construction de la métrique, les sections.).

(Par exemple, pour les revetements, il aisé d'avoir une structure de variété lisse sur le quotient. Un peu moins pour les submersions et les fibrations. De plus, dans la construction des metriques du quotient on s'assure que ca ne depend pas du point de la fibre).

4-On a les variétés de courbures sectionnelles constantes, qui sont localement conformement plates. Le produit d'un cercle et d'une variété de courbure sectionnelle constante, est plate.

5-Les sommes connexes, de variétés conformement plates, peuvent etre plates.

6-Les sommes connexes, par le theoreme de D. Joyce, peuvent avoir une partie plate et une partie non plate et de courbure scalaire  $-1$ .

7-Pour construire une variété nonlocalement conformemtn plate, on construit des produit. On a l'a fait à partir des surfaces réelles de dimension 2. Et en considrant des produit dont un n'est pas plat.

8-Les surfaces  $K3$ . La variété de W. Goldman en dimension 3 sur la quelle on peut mettre n'importe qu'elle metrique, elle sera non plate.

8) La formule d'intégration par parties est valable quand la variété est compacte sans bord et non orientable, voir le livre d'Hebey. Cela veut dire que dans les problèmes variationnels de degré 2, il est possible de résoudre par la formulation variationnelle un problème elliptique comme dans le cas du Projectif en dimension 2, c'est fait dans le livre d'Aubin et ceci sur une variété non orientable.

Par contre quand il s'agit de fonction de Green, sur une variété compacte, il est impératif de supposer la variété orientable car, par exemple, pour la Parametrix, on a besoin d'utiliser l'intégration par parties en dehors de petites boules, on se ramène à une variété à bord, d'où, il faut utiliser la formule de Stokes et donc une orientation.

9) Pour les variétés de dimension 3. On considère un Torus bundle  $M_\varphi$  d'application  $\varphi$  (voir le Hatcher pour la définition,  $\varphi$  est la monodromy map), il est orientable si et seulement si  $\varphi \in SL_2(\mathbb{Z})$ . William Goldman prouve qu'il existe un Torus bundle orientable ne possédant pas de structure conformément plate,  $\varphi$  non périodique, (de valeur propres réelles) (par exemple,  $\varphi = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ ) il n'y a pas de métrique localement conformément plate, comme une variété lisse possède toujours une métrique Riemannienne  $g$ , elle est dans ce cas non localement conformément plate,  $Weyl_g \neq 0$ . Ce théorème dit qu'il n'existe pas de métrique localement conformément plate sur cette variété.

1- Une structure est conformément plate s'il existe une métrique conforme à la métrique euclidienne. Cette définition est équivalente à celle qui dit qu'une structure conformément plate s'il existe un atlas dont les changements de cartes sont des applications de Möbius (composée de translation, rotation et inversion). Cette équivalence est démontrée dans l'article de Kuiper (1949).

2- Cela veut dire que si on veut savoir si une variété a une structure conformément plate, il suffit d'étudier les transformations conformes, donc le groupe conforme. C'est l'idée de William Goldman, il caractérise le groupe fondamental et le groupe de transformations conformes des variétés conformément plate (il y a une relation entre le groupe fondamental et le groupe des transformations conformes). Si cette condition n'est pas satisfaite alors, la variété n'a pas de structure conformément plate. (le groupe fondamentale doit être polycyclique...).

10) Voir aussi, dans le livre d'Aubin ou la caractérisation de Kuiper de la structure conforme par une isométrie, sert à prouver le Théorème de la masse positive dans le cas conformément plat.

Pour le Théorème de la masse positive de Schoen-Yau en dimension 3, ils prouvent qu'il existe une surface minimale complète ayant une propriété (intégrale de la courbure de Gauss positive) alors que par les calculs cette intégrale est négative ou nulle. Pour cela ils utilisent le théorème d'existence de surfaces minimales et leurs propriétés (Formule de Gauss-Bonnet et Travail de Huber, inégalités isopérimétriques classiques et de Huber, la métrique est voisine de la métrique euclidienne ce qui fait qu'on peut approcher ces deux notions (inégalités isopérimétrique classique)). En particulier, ils prouvent qu'elle est complète dans la première étape. (les fermés bornés sont compacts).

La positivité de la courbure scalaire implique que la surface minimale construite a son intégrale de Gauss Positive. Et puisque la métrique est "presque" euclidienne, il y a conservation de l'inégalité isopérimétrique et par la formule de Gauss-Bonnet, elle serait négative ou nulle. Ce qui n'est pas possible.

Il s'agit de construire une métrique conforme avec une propriété de la courbure scalaire.

Il s'agit de construire une surface minimale ayant une propriété qui découle de la courbure scalaire.

Cette surface minimale complète n'existe pas, car cette propriété n'est pas vraie, par le fait que la métrique est "presque" plate et que l'inégalité isopérimétrique euclidienne se conserve et la formule de Gauss-Bonnet.

#### Remarques :

1-La masse  $< 0$  intervient dans la construction de la surface minimale complète. (raisonnement par l'absurde). (Ils prouvent qu'elle est complète dans cette étape, car, en dehors des bouts, elle est dans un compact, et dans les bouts elle est entre deux plans et la métrique est équivalente à la métrique euclidienne. (les fermés bornés sont compacts)).

2-Une surface est dite de type fini, si  $\int |K| < +\infty$  : c'est le cas ds la demonstration de la masse positive de Schoen Yau.

3-Quand on a une surface de type fini, si  $\chi(S') > 0$  (la caracteristique d'Euler-Poincaré  $> 0$ , ce qui est le cas ici par Cohn-Vossen), alors  $S'$  est diffeomeorphe au plan. C'est ecrit dans Hulin-Troyanov(1992), premier theoreme, qui dit que,  $S'$  est diffeomorphe à une variété compacte  $S$  sans bord, sans un nombre fini de points. De plus il y a une formule de Gauss Bonnet, on a alors  $S'$  est la sphere moins un au plus un point d'apres cette formule de Gauss-Bonnet. Donc, c'est le plan. Il s'agit d'un diffeomorphisme entre  $S'$  et le plan.

On a d'abord une isometrie  $i$ , puis une application conforme,  $F_1$ . la courbure de Gauss "se conserve". D'abord  $K_{i(S')} = K_{oi}$ , puis par l'application conforme on a un facteur  $|F_1'|^2$ , qui s'elimine dans le changement de variable.  $\int K = \int K_{F_1oi} = \int K_{oi} |F_1'|^2$ , cette derniere inetgrale est la courbure de Gauss de  $F_1oi(S')$ . Puis on applique le result d'Huber. (On considere  $i(S')$  au lieu de  $S'$ , car on a une isometrie et la courbure de Gauss "se conserve",  $\int_{S'} K = \int_{i(S')} K_{oi}$  et  $(F_1^{-1})^*(g_{i(S')}) = |F_1^{-1}|^2 g_C$ , car  $F_1$  est conforme, la metrique se transporte suivant un facteur de la metrique de  $\mathbb{C}$ , on a des coordonnees isothermes globales, on peut appliquer ce que fait Huber (1957)).

(Pour obtenir l'application conforme, on raisonne par rapport au revetement universel et la caracteristique d'Euler-Poincaré).

4-Dans un article de Huber, il prouve que sur une surface ouverte, la formule de "Gauss-Bonnet", pour une suite de domaines :

$$\int K = 2\pi - \lim_{\sigma \rightarrow +\infty} L_\sigma^2 / 2A_\sigma.$$

5-La consturction de la surface est en fait une construction d'un courant (surface avec singlarité, par une minimisation d'une fonctionnelle relativement à une metrique), puis, voir le livre de Federer, la surface est reguliere en dehors du bord.  $\partial(N \cap S) = (\partial N \cap S) \cup (\partial S \cap N)$ , par la formule de Stokes,  $S$  est loin du bord, car la courbure moyenne est positive (c'est une hypothese).

(Voir aussi , le livre de Sa Earp-Tubiana, sur le theoreme de Poincaré-Koebe et la calssification par le revetement universel).

Un theoreme d'uniformisation de Poincaré-Koebe, dit que une surface non compacte simplement connexe est conforme au disque unité ou au plan. (voir l'article de Hulin-Troyanov(1992)).

11) Conernant les sommes connexes,  $M \sharp N$  de deux variétés  $M, N$ , elles sont definies a partir d'une relation d'equivalence qui donne une variété quotient Topologique, c'est à dire  $C^0$ , à l'ordre 0 il n'y a pas de probleme, car par continuité le recollement se fait naturellement, mais des qu'on cherche une structure differentiable ou  $C^k, k \geq 1$ , c'es plus compliqué, dans ce cas on utilise le Disc Theorem de Palais, qui dit qu'on peut trouver une isotopie, c'est à dire une homotopie lisse entre les bords et donc le recollement se fait de maniere lisse.

Remarquons que endehors de la sphere ou se fait le recollement, la variété est egale à  $M$  ou  $N$ .

Lorsque on met une metrique sur  $M$  et  $N$  alors par des fonctions cutoff on peut mettre une metrique, par recollement, sur  $M \sharp N$  et elle coincide avec celles de  $M$  et  $N$  en dehors des boules de recollement. voir par exemple les articles de Dominic Joyce (2001) et Mazzeo (1995).

Dans le cas Riemannien, en utilisant les cartes exponentielles en  $p \in B(p, 2\epsilon) \subset M$  et  $q \in B'(q, 2\epsilon) \subset N$ , on a deux injections naturelles  $i_1, i_2$  et on doit faire le recollement entre  $Id_{B(p, 2\epsilon)}$  et  $i_2oi_1^{-1}$ . On definit une relation dequivalence en partant de couronnes  $B(p, 2\epsilon) - B(p, \epsilon)$ ,  $B(q, 2\epsilon) - B(q, \epsilon)$  vers les varietes  $M$  et  $N$ . On choisit une carte pour  $N$  renversant l'orientation et puis on compose par une inversion et on obtient  $i_2$ .

alors on recolle les deux applications de cartes et le changement de cartes,  $i_2oi_1^{-1}$  est lisse, ce qui permet le passage de l'atlas de  $M$  a celui de  $N$  de maniere lisse. (Les changements de cartes sont lisses de  $M, N$  et  $M - B(p, \epsilon) \cup N - B'(q, \epsilon)$ , par  $i_2oi_1^{-1}$ .)

Comme cette carte permet le passage au deux atlas de  $M$  et  $N$ , alors  $M \sharp N$  est orientable.

On a :  $X = M \setminus B(p, \epsilon) \cup N \setminus B'(q, \epsilon)$  est compact, le graphe de la relation  $Gr = \{(x, x), x\} \cup \{(x, i_2oi_1^{-1}(x)), x\}$  est fermé, donc,  $X \setminus \sim$  est séparé. Soit  $O = B(p, 2\epsilon) \setminus B(p, \epsilon) \cup B'(q, 2\epsilon) \setminus B'(q, \epsilon)$ , et  $\pi$  l'application de passage au quotient. Alors  $\pi(O)$  est un ouvert de  $X \setminus \sim$  car  $\pi^{-1}[\pi(O)] = O$ .

Soit  $\Phi$  l'application de recollement de cartes, défini précédemment sur  $\pi(O)$ , alors  $\Phi$  est bien défini et est un homeomorphisme sur son image qui est un ouvert de  $\mathbb{R}^n$ , par le théorème d'invariance du domaine de Brower (car  $i_2$  et  $i_1$  se recollent au bord qui est une sphere, par définition). C'est une carte, compatible avec l'orientation car, les changements de cartes à droite et à gauche sont l'identité.

$$\Phi([x]) = i_1(x), \quad x \in B(p, 2\epsilon) \setminus B(p, \epsilon), \quad \Phi([x]) = \frac{i_2(x)}{|i_2(x)|^2}, \quad x \in B'(q, 2\epsilon) \setminus B'(q, \epsilon),$$

avec  $[x] = \pi(x)$ , l'application de passage au quotient.  $i_2$  inverse l'orientation de  $N$ . Comme on compose avec une inversion, au final, on a des jacobiens de déterminant positifs, de plus, sur la sphere, les orientations sont inversées, ce qui permet un recollement correct (car sur le premier bout on a  $i_1$  avec la bonne orientation et sur le deuxième bout on a  $i_2$  qui inverse l'orientation, et sur la sphere  $|i_2| = 1$ ).

On voit que  $\Phi \circ \pi$  est continue par définition et donc  $\Phi$  est continue.

On a bien,  $(\Phi, \pi(O))$  une carte de recollement.

Elle permet le passage au deux atlas. Comme  $M$  et  $N$  sont orientables,  $M \sharp N$  est orientable.

Avec  $(\Phi, \pi(O))$  on a une carte de recollement, et,

$$\Phi \circ [i_1]^{-1} = \Phi \circ [i_1^{-1}] = Id_{B(p, 2\epsilon) \setminus \bar{B}(p, \epsilon)},$$

$$\Phi \circ [i_2/|i_2|^2]^{-1} = \Phi \circ [(i_2/|i_2|^2)^{-1}] = Id_{B'(q, 2\epsilon) \setminus \bar{B}'(q, \epsilon)},$$

On voit que les changements de cartes sont lisses et conservent l'orientation.

En considérant les métriques  $g_M, g_N$  et  $\Phi^*(\delta_{\mathbb{R}^n})$ , par des fonctions cutoff, on a par recollement, une métrique sur  $M \sharp N$  :

$$g_{M \sharp N} = \chi_1 g_M + \chi_0 \Phi^*(\delta_{\mathbb{R}^n}) + \chi_2 g_N,$$

par exemple.

Pour voir que sur les bords, les inversions sont inversées, on considère un observateur  $a$  de  $M$  tel que le repère  $(a, T)$  est direct avec  $T$  une orientation du bord. On déplace par une rotation, ou selon un chemin circulaire, vers un observateur  $b$  de  $N$  alors le repère  $(b, T')$  est direct si et seulement si  $T' = -T$ .

D'autre part, on voit que dans la carte de recollement, on a composé avec une inversion. Si  $M$  et  $N$  ont des structures localement conformément plates, par Kuiper, il existe pour chaque variété un atlas dont les changements de cartes sont des applications de Möbius. En utilisant la carte de recollement, on obtient un atlas sur  $M \sharp N$  formé d'applications de Möbius. Donc, sur la somme sonnexée on a une structure localement conformément plate. (ceci est dit dans la papier de Kulkarni).

12) Concernant la classification des surfaces. Cela peut se faire grâce aux fonctions de Morse. Par récurrence sur le nombre de points critiques.

1- On vérifie que sous certaines hypothèses d'orientabilité des bords et quand on a deux homeomorphismes entre deux ensembles, alors on a un homeomorphisme entre les recollés.

2- On utilise une récurrence sur le nombre de points critiques des fonctions de Morse.

On note  $g_1, g_2$  les applications de recollement, dans le Gramain,  $g_1 = f, g_2 = f'$ . Ici, dans le cas des recollés, on prend,  $g_1 = id$  et  $g_2 = id$ , les recollés sont les ensembles de départ (en fait ils sont difféomorphes aux ensembles de départ et  $f_* = id, f'_* = id$ , on a inversion des orientations quand on recolle, et,  $h_* = id, h'_* = id, h$  et  $h'$  conserve l'orientation et l'inversion de l'orientation, respectivement). Les ensembles  $A$  et  $A'$ , sont des ensembles de niveau pour une fonction de Morse  $C^\infty$ , donc ce sont des variétés compactes  $C^\infty$ , il y a un nombre fini de composantes connexes, sinon (en se plaçant sur le bord, vecteur tangent et vecteur rentrant, on aurait un point critique dans l'intersection de 2 lignes de niveaux), il y aurait un point critique.

Pour l'orientabilité des bords,  $A$  et  $A'$  sont (homéomorphes implique difféomorphes en dimension 1) difféomorphes à des cercles et, à droite (pour les sommes connexes), les orientations sont inversées, donc le difféomorphisme conserve l'inversion d'orientation, son jacobien est positif. D'où, l'application  $k_0$  conserve l'orientation. Ce n'est pas toujours vrai, car on n'a pas un

diffeomorphisme global  $h$  et  $h'$ , par contre il y a une definition par l'homologie de l'orientation. Voir ci-dessus.

(on pouvait le voir en remarquant qu'on inverse deux fois l'orientation, donc au final on conserve l'orientation pour  $k_0$ ).

Par exemple, on suppose que toute surface orientable ayant  $p \leq q - 1$  point critiques avec un maximum et un minimum et  $p - 2$  points critiques d'indice 1 est homeomorphe à  $\mathbb{T}_p$ . On peut commencer la recurrence pour  $p = 0$ , la fonction de Morse a un maximum et un minimum et les ensembles de niveaux sont homeomorphes a des demi-disques et par recollement on a une sphere. A l'ordre  $p = 1$ , pour le Tore, c'est ecrit dans le Gramain, la fonction "cote" a 4 points critiques, un maximum, un minimum et deux points critiques d'indice 1 (au milieu), dans le Gramain, il colle deux cylindres (les cylindres eux-memes sont obtenues par recollement d'un ensemble d'indice 0 ou 2 avec un ensemble d'indice 1) et il obtient un Tore . Ou bien si on commence la recurrence a partir du Tore, il suffit de voir que la surface est homeomorphe par recollement, au recollement de deux cylindres (les cylindres sont eux-memes obtenus par recollement denssembles d'indice 0 ou 2 et d'un ensemble d'indice 1, 0-1 et 1-2, de haut(0) en bas(1) ou de bas (2) vers le haut (1)) avec l'application de recollement  $g_1 = id, g_2 = id$ , et on obtient le Tore,  $g_2$  est la deuxieme application de recollement). Dans le cas general, on sait qu'il existe une fonction de Morse  $u$ , on decompose en deux, la partie de  $u$  ayant  $p - 1$  points critiques, on lui recolle un disque et par recurrence, elle homeomorphe à  $\mathbb{T}_{q-1}$  et le reste possede 4 point critiques, un maximum, un minimum et deux points critiques d'indice 1, on lui recolle un disque, qui est, par recurrence, homeomorphe au Tore ,  $\mathbb{T}_1$ . Donc, comme c'est ecrit dans le Gramain, en revenant à  $u$ , il y a une partie homeomorphe à  $V_{p-1}$  et l'autre à  $V_1$  et sur  $V_1$  on inverse l'orientation. Or aussi sur une partie de la surface considerée, on inverse l'orientation, donc , on inverse l'orientation deux fois (se placer à droite,  $Y - g_1(A)$  et  $V_1 = \mathbb{T}_1 - B$ ,  $B$  un disque), ce qui revient à conserver l'orientation en considerant la composée des deux homeomorphisms (c'est l'homeomorphisme  $k_0 = h'og_1og_2^{-1}oh^{-1}$  du Gramain). Il reste a voir donc avec ces hypotheses, qu'il y a homeomorphisms entre les recollements,  $S = (S - A)\#(S' - B) = (X - A)\#(Y - g_1(A)) = (X - A) \cup (Y - A)$ ,  $g_1 = id$ , et  $V_{p-1}\#V_1$ , ce qui est fait dans le cas orientable ( $A$  homemorphe au cercle dans le Gramain).

On ecrit  $(X - A) \cup (Y - A)$  pour dire qu'on recolle  $X$  et  $Y$  via  $A$ . Les applications du Gramain,  $f = g_1 = id, f' = g_2 = id$  et le recollé (pour la relation d'equivalence,  $x \equiv f(x) = x, x \in A$ ,  $f_* = -id, f'_* = -id$ , est diffeomorphes a l'ensemble de depart. On a  $f_* = -id$  et  $f'_* = -id$  car on inverse les orientations de depart quand on recolle  $(+, h, A \rightarrow A'$ , conservation de l'orientation,  $f', A' \rightarrow f'(A')$ ,  $-$  inversion de l'orientation,  $h'^{-1}, f'(A') \rightarrow f(A)$ ,  $+$ , conservation de l'orientation,  $f^{-1}, f(A) \rightarrow A$ ,  $-$ , inversion de l'orientation). Donc, on a,  $h_* = id, f'_* = -id$ ,  $(h'^{-1})_* = id$  et  $(f^{-1})_* = -id$ . Et on ecrit car  $f = id, f' = id, f_* = id, f'_* = id$ , pour dire qu'on envoie un generateur d'orientation vers un generateur d'orientation (meme si elle inversée).

On peut raisonner par les generateurs, si  $e_1$  est generateur de  $H_{1,A,X} = H_1(A, A - x_0, Z)$  et  $e_2$  est generateur de  $H_{1,A',X'} = H_1(A', A' - x'_0, Z)$ , alors, comme sur la partie de  $Y$  et  $Y'$  on inverse les orientations, on a  $-e_1$  est generateur de  $H_{1,A,Y}$  et  $-e_2$  est generateur de  $H_{1,A',Y'}$ , comme  $f = id$  alors,  $f_*(e_1) = -e_1$ . On ecrite,  $f_* = id$  dans le sens qu'elle envoie un generateur d'orientation vers un generateur d'orientation. et on ecrit  $f_* = -id$ , pour dire que  $f_*$  inverse l'orientation de depart sur  $A$ .

On a la meme chose pour  $A'$  et  $f'$ .

Des le depart on a deux homeomorphisms  $h$  et  $h'$ , supposons pas exemple que  $h_* = -id$ ,  $h_*(e_1) = -e_2$ , comme pour  $A'$  on est dans l'epsace euclidien, il suffit de composer avec une symetrie  $t$  pour avoir  $t_*(e_2) = -e_2$  donc,  $hot$  conserve l'orientation sur le bord.  $(hot)_*(e_1) = e_2$  et on fait la meme chose avec  $h'$ . Finalement, on a deux homomorphisms  $hot$  et  $h'ot'$  ou  $h'$  (si  $h'$  conserve l'inversion de l'orientation); qui conservent l'orientation sur les bords.

On a utilisé l'orientation definie par l'homologie pour prouver, par recollement que la surface  $S$  est homemorphe à la somme connexe de  $q$  Tores, muni d'une orientation homologique. Or La somme connxe de Tore est une varieté differentiable et donc, cette orientation homologique est equivalente à l'orientation usuelle du Tore. (On pouvait prouver ceci à chaque etape, en utilisant, le fait que la surface de depart est orientable et donc s'injecte dans  $\mathbb{R}^3$ , utiliser des "doubles", (voir le Vick, pour l'orientation homologique des varietés sans bord et des varietés bord), pour

orienter les surfaces a bord de chaque etape, puis, obtenir des surfaces munies d'orientation homologues et differentiables). L'equivalence entre orientation homologique et differentiable pour une variété lisse est ecrite dans le livre de Bredon (geometry and topology). Remarquons qu'une variété a bord  $W$  est orientable si et seulement si son interieur  $\dot{W}$  est orientable, il y a induction de l'orientation sur le bord  $\partial W$  et il y a equivalence aussi entre orientation homologique et differentiable. (il y a un isomorphisme entre  $H_n(W, \partial W, Z)$  et  $H_n(W, W - x, Z)$ ).

Concernant la structure differentiable sur le recollé de  $X - A \cup_{f,A} Y - A$ , dans Milnor (Somme connexe et structure differentiable et Differentiable manifolds which are homotopy spheres), ils prouvent que les voisinages des bords de  $X - A$  et  $Y - A$ , sont diffeomorphes a des tubes, puis recollent les tubes, c'est une carte de recollement, pour avoir une structure differentiable. Or, pour la somme connexe de deux variétés riemanniennes, les cartes exponentielles sont des voisinages tubulaires des bords, il n'y a pas besoin d'utiliser ce que dit Milnor. Quant à ici, le recollé  $X - A \cup_{f,A} Y - A$  est diffeomorphe à  $X - A \cup Y - A$ , on a deja une structure differentiable sur le recollé, via ce diffeomorphisme. (la projection  $p : x \rightarrow [x]$  est un diffeomorphisme).

Quant a l'ecriture  $\mathbb{T}_{q-1} \# \mathbb{T}_1$ , c'est la somme connexe, comme on est dans  $\mathbb{R}^3$ , somme connexe et recollement coincident.

Quand on a une application  $s$  qui conserve l'orientation, cela veut dire qu'on a, sur une variete  $M_1$  compacte sans bord de dimension 1,  $s_* = id$ . Pour le voir, on a si l'orientation est inversee sur  $M_1$  et  $M_2 = s(M_1)$ , cela veut dire que  $-1$  est generateur de  $H_1(M_1, M_1 - x_0)$  et de  $H_1(M_2, M_2 - s(x_0), Z) = H_1(s(M_1), s(M_1) - s(x_0), Z) = s_*(H_1(M_1, M_1 - x_0, Z))$ . Donc,  $s_*(-1) = -1$ , c'est a dire que  $s_* = id$ . Lorsque  $\varphi_1$  inverse l'orientation alors  $(\varphi_1)_* = -id$ .

En utilisant une suite de Mayer-Vietoris, et le fait que  $M_1 - x_0$  est d'homotopie un segment donc a un point, donc d'homologie nulle on a :

$s_*$  est un isomorphisme de  $H_1(M_1)$  vers  $H_1(M_2)$ , comme il conserve l'orientation  $s_* = id$ .

Pour le voir il suffit de raisonner sur les generateurs  $s_*(e_1) = ke_2$  et  $(s^{-1})_*(e_2) = k'e_1$ , donc,  $kk' = 1$ , comme ces des entiers  $k = 1$  ou  $k = -1$ , comme  $s$  conserve l'orientation  $k = 1$ . On fait la meme chose pour  $\varphi_1$  et on obtient  $k = -1$ .

On utilise l'homomorphisme surjectif d'Hurwicz qui est bijectif sur le cercle. De  $\pi_1(S_1)$  dans  $H_1(S_1)$

$$\bar{h} : [\gamma] \rightarrow \tilde{[\gamma]}$$

On applique cela aux applications du Gramain,  $s = h'^{-1}oh$  (conserve l'orientation) et  $\varphi_1 = \varphi$ ,  $A = \varphi(S_1 \times \{0\})$ , ici,  $f = id, f' = id$  et  $M_1 = M_2 = A$ , puis on raisonne en considerant  $S_1 \times \{0\}$  au lieu de  $S_1$ .

$$\begin{aligned} k &= \varphi^{-1}oso\varphi, \\ \pi(k)[\gamma] &= [\varphi^{-1}oso\varphi\gamma] = \\ \bar{h}^{-1}([\varphi^{-1}oso\varphi\gamma]) &= \\ = \bar{h}^{-1}(((\varphi_1)^{-1})_*os_*o\varphi_*(\tilde{[\gamma]})) &= \\ = \bar{h}^{-1}\tilde{[\gamma]} = \bar{h}^{-1}\bar{h}([\gamma]) &= [\gamma], \end{aligned}$$

Où on a utilisé le fait que  $\varphi_* = id$  si on se place sur  $X$  (on conserve l'orientation) ou  $\varphi_* = -id$  si on se place de coté de  $Y$  (on inverse l'orientation).

On pouvait remplacer  $[\gamma]$  par un generateur  $e_1 = [\gamma_1]$  et raisonner sur les generateurs.

Donc,

$$\pi(k) = id$$

Ceci dans le cas ou  $k(a) = a$ ,  $k$  fixe un point. Sinon, ( $k$  ne fixe pas  $a$ ), on compose avec une rotation  $r(e^{i\theta}) = e^{iu}e^{i\theta}$ , or en considerant  $F(e^{i\theta}, s) = e^{isu}e^{i\theta}$ ,  $s \in [0, 1]$ , on a une homotopie entre  $r$  et l'identite  $id$ . Donc,  $r_* = id$  de  $H_1(S_1) \rightarrow H_1(S_1)$ .

Donc,  $k'_* = id$ , puis on utilise le meme groupe fondamental en  $a$ ,  $\pi_1(S_1, a)$  et l'application d'Hurwicz, comme precedemment pour prouver que  $\pi(k') = id$ .

On peut utiliser le lift dans le livre de Gramain et prolonger  $k$ .

L'autre cas,  $Y$  rectangle et  $g_1(A)$ , deux segments, correspond au cas non orientable. Pour le voir, on choisit une orientation (choisir un repere mobile) sur  $Y$ , celle-ci change quand on part de  $X$  et on lui recolle  $Y$  via  $A$ . (ici,  $g_1 = f$  est l'application de recollement).

Notons que par Moise-Rado, homeomorphe implique diffeomorphe en dimension  $\leq 3$ .

13) Pour l'inegalité de Kato : on a  $u \in L^1_{loc}$  et  $\Delta u \in L^1_{loc}$  alors :  $u \in W^{1,1}_{loc}$ , pourquoi ?

Comme c'est local, on ecrit dans une boule  $u$  en fonction de la fonction de Green (de la boule par exemple et  $n \geq 3$  par exemple,  $n = 2$  c'est la meme chose) :

$$u = \frac{1}{r^{n-2}} * \Delta u + \int_{\partial B} P * u,$$

Par Fubini, Fubini-Tonelli,

$$\partial u = \partial\left(\frac{1}{r^{n-2}}\right) * \Delta u + \int_{\partial B} (\partial P)u,$$

avec  $\partial P$  regulier des qu'on considere des points interieurs et donc on peut derivier sous le signe  $\int$  pour cette partie.

On a,

$$u \in L^1_{loc} \Rightarrow \exists r \int_{\partial B_r} u(\sigma) d\sigma < +\infty,$$

Au sens des distributions on a pour  $\varphi \in D(B_{r/2})$  :

$$\int (-\partial\varphi)u = \int (-\Delta u) \int (-\partial\varphi)\left(\frac{1}{r^{n-2}}\right) + \text{termes reguliers de la fonction de Green}$$

Donc, apres integration par parties pour le noyau Newtonien,

$$\int (\partial\varphi)u = \int \int \left(\partial\left(\frac{1}{r^{n-2}}\right)\right)(-\Delta u)\varphi + \int \int \partial P u \varphi dx d\sigma = \int a\varphi, \quad a \in L^1,$$

Donc,

$$u \in W^{1,1}_{loc},$$

Ceci est valable pour  $u$  reguliere. Soit  $\rho_n$  un mollifier, alors :

Si  $u \in L^1(B_r)$ , alors :

$$\rho_n * u(x) = \int_{B_r} \rho_n(x-y)u(y)dy,$$

et pour  $x \in B_{r/2}$  :

$$\Delta(\rho_n * u)(x) = (\rho_n * \Delta u)(x),$$

On a aussi,

$$\rho_n * u \rightarrow u, \text{ dans } L^1_{loc}(B_r),$$

et,

$$\Delta(\rho_n * u) = \rho_n * (\Delta u) \rightarrow \Delta u, \text{ dans } L^1_{loc}(B_{r/2}),$$

On fait ce qu'on a fait avec  $u$ , avec  $\rho_n * u$ , comme on a des bornes uniformes en  $L^1_{loc}$ , alors,

$$\rho_n * u \in W^{1,1}_{loc}, \text{ et } \nabla(\rho_n * u) \rightarrow v \in L^1_{loc},$$

Donc,

$$\int u \partial\varphi = \lim_n \int (\rho_n * u) \partial\varphi = - \lim_n \int \partial(\rho_n * u) \varphi \rightarrow - \int v \varphi,$$

Donc,

$$u \in W^{1,1}_{loc},$$

On a la meme chose si on considere un probleme variationnel  $-\Delta u = f$ ,  $f \in L^1_{loc}$  et  $u \in L^1_{loc}$ .  
On a meme mieux,  $u \in W^{1,q}_{loc}$ .

On peut retrouver ce resultat en se ramenant a une fonction harmonique en soustrayant une solution d'un probleme de Dirichlet.

Soit  $f \in L^1$ ,  $\exists f_j \rightarrow f$  dans  $L^1$  avec  $f_j \in C_c^\infty$ , on resout :

$$-\Delta u_j = f_j, \text{ avec } u_j = 0, \text{ sur } \partial\Omega,$$

Alors, par Stampacchia ou Brezis-Strauss, on a :

$$\|u_j\|_{W^{1,q}_0} \leq C_q,$$

En passant à la limite en  $j$ , on a l'existence de  $u_0 \in W^{1,q}_0$  tel que :

$$-\Delta u_0 = f,$$

Alors,

$$-\Delta(u - u_0) = 0, \text{ et } u - u_0 \in L^1,$$

On utilise le theoreme de Weyl pour avoir,

$$u - u_0 \in C^\infty$$

Donc,

$$u \in W^{1,q}_{loc},$$

On retrouve le Theoreme dans le livre de Dautray-Lions.

On fait la meme chose avec le Theoreme 1 de Brezis-Merle, sauf que les relations ne sont pas locales.

On a :

$$-\Delta u = f \in L^1, u \in W^{1,1}_0(\Omega).$$

On resout pour  $f_j \rightarrow f$  dans  $L^1$ .  $f_j \in C_c^\infty(\Omega)$ . (la regularité du bord est au moins  $C^2$  pour pouvoir appliquer le theoreme de dualité de Stampacchia).

$$-\Delta u_j = f_j, u_j \in H^1_0(\Omega),$$

On a :

$$\|\nabla u_j\|_q \leq C_q, 1 \leq q < 2.$$

On passe a la limite en  $j$ .

On a :

$$-\Delta u_0 = f, u_0 \in W^{1,q}_0(\Omega).$$

Finalement :

$$-\Delta(u - u_0) = 0, u - u_0 \in W^{1,1}_0(\Omega).$$

Soit on utilise le principe du maximum dans  $W^{1,1}_0$  pour avoir  $u = u_0$  p.p.

Soit, on utilise le theoreme de regularité d'Agmon pour avoir  $u - u_0$  reguliere et appliquer le principe du maximum usuel.

Pour,  $u_j, f_j, |f_j|$  on applique le raisonnement de Brezis Merle (theoreme 1). Puis par le lemme de Fatou, l'inegalité de Brezis Merle est valide pour  $u_j$  et  $u_0$  donc pour  $u$ . ( $u = u_0$ , p.p).

14) Sur la fonction distance au bord : c'est bien ecrit dans le Gilbarg-Trudinger. Grace a la propriété de la sphere interieure, il existe un voisinage du bord assez petit tel que la fonction distance est  $C^k$  et est egale à la distance (pour chaque point) à un point unique du bord, car on fait varier des spheres le long du bord. Voir, Gilbarg-Trudinger. Le domaine (et le bord) doit etre par exemple au moins  $C^2$ .

Par des cartes, on a un segment, on peut faire rouler une sphere. On prend son image par l'application de carte, qui est suffisamment reguliere pour que le domaine d'arrivee contienne des ellipses, donc des cercles.

15) Pour le theoreme de Dualite de Stampacchia :

On part de l'equation :

$$-\Delta u_i = V_i e^{u_i},$$

avec la condition de Dirichlet. ( $\Delta = \partial_{11} + \partial_{22}$ ).

On a :

$$u_i \in W^{2,k} \cap C^{1,\epsilon}(\bar{\Omega}), \quad u_i = 0 \text{ on } \partial\Omega.$$

On a :

$$\int_{\Omega} |\Delta u_i| dx \leq bC.$$

On considere un vecteur  $f = (f_1, f_2) \in L^{q'}(\Omega)$  avec  $q' > 2$ . On utilise le Theoreme de Lax-Milgram dans les Hilbert, (voir Gilbarg-Trudinger), pour avoir une solution de  $z \in W_0^{1,2}(\Omega)$  de l'equation :

$$-\Delta z = \text{div}(f),$$

avec la propriete suivante (voir la preuve de l'inegalite de Harnack dans le Gilbarg-Trudinger) :

$$\|z\|_{L^\infty} \leq C\|f\|_{q'}.$$

On met  $u_i$  comme fonction test dans l'equation de  $z$ , on a :

$$\int_{\Omega} f \cdot \nabla u_i dx = \int_{\Omega} \nabla z \cdot \nabla u_i dx = - \int_{\Omega} z \Delta u_i dx \leq C'\|f\|_{q'},$$

On prend le supremum dans  $L^{q'}$ , et on a :

$$\|\nabla u_i\|_q \leq C_q, \quad \forall 1 \leq q < 2.$$

Dans le probleme de Brezis-Merle, on a :

$$\|\nabla(u_i - u)\|_{L^q(\Omega_\epsilon)} = o(1),$$

c'est la convergence interieure due au travail de Brezis et Merle. Apres, par l'inegalite de Holder :

$$\|\nabla(u_i - u)\|_{L^q(\Omega - \Omega_\epsilon)} \leq |\Omega - \Omega_\epsilon|^{1/q-1/r} \|\nabla(u_i - u)\|_{L^r} \leq C_r |\Omega - \Omega_\epsilon|^{1/q-1/r} = o(1), \quad 1 \leq q < r < 2.$$

On obtient finalement :

$$\|\nabla(u_i - u)\|_q = o(1).$$

16) Pourquoi dans le livre d'Aubin, il considere les solutions  $u$  pour un operateur du type :

$$a_{ij}(M)\partial_{ij}u + b_j(M)\partial_ju + c(M)u = f(M)?$$

Dans le livre d'Aubin  $a_{ij}(M)$ ,  $b_j(M)$  sont des champs de tenseurs, pourquoi tenseur ?

C'est lie aux cartes et aux changements par cartes et a la formulation variationnelle.

1) Dans le livre d'Hebey, il donne la definition d'un probleme pose de maniere variationnelle :

Pour les varietes :

$$\int_M a_{ij}\partial u\partial\varphi dV_g + b_j u\partial\varphi dV_g + cu\varphi dV_g = \int f\varphi dV_g$$

a) Il faut que le probleme soit pose sur une variete de maniere globale, donc independamment des cartes. C pour cela que dans le livre d'Hebey, il dit pour toute carte  $h$ .

b) Si on revient à un problème posé sur un ouvert de  $\mathbb{R}^n$ , il y a déjà une carte disponible, la carte euclidienne,  $(\Omega, id)$ . Donc pour  $\mathbb{R}^n$ , il suffit que le problème soit posé en coordonnées cartésiennes.

Et après, par la formule de changement de variable, on se ramène à toute carte de l'ouvert. Notons que la notation  $dV_g$  l'explique bien car par un changement de variable, on retrouve la Jacobien, qui donne l'élément de volume pour la métrique euclidienne.

Maintenant quand on fait le changement de variables, il faut que le problème soit invariant, c'est à dire que les coefficients ne changent pas ou ceci est possible si on les suppose comme champs de tenseurs.

on écrit par exemple :

$$a_{ij}(M) = a_{ij}[x(M)] = a_{kl}[y(M)] \partial_x y_i^k \partial_x y_j^l,$$

dans le changement de variables, cette loi est celle des tenseurs.

C'est pour cela qu'on suppose les coefficients, des champs de tenseurs. Pour que par changement de variables, ils soit invariants et ceci est possible si ils obéissent à la loi des tenseurs.

Et pour les ouverts de  $\mathbb{R}^n$ . Il suffit que le problème soit posé en coordonnées cartésiennes. Alors on la pour toute carte.

17) Pour quoi, quand on veut appliquer le principe du maximum sur une variété, on a besoin d'un opérateur global :

a) C'est parce qu'on a considéré une variété, qui est constituée de cartes. Il ne faut pas que ça dépende de la carte.

Par exemple, si on veut appliquer la principe du maximum en  $P$ ,

On écrit :  $Lu(P) = L(u \circ \varphi^{-1}(x_1, x_2))$ , on voit que dans l'écriture même, il ne faut pas que ça dépende de la carte et de l'application de carte  $\varphi$ .

b) Par recouvrement, dans l'intersection d'ouvert de carte, on écrit :

$$Lu(P) = L[u \circ \varphi^{-1}] = L[u \circ \psi^{-1}]$$

dans cette écriture, on a deux cartes, et il ne faut pas que ça dépende des deux cartes, pour cela il faut que l'opérateur soit global.

c) On a la même chose, si on raisonne que la dérivée normale et le principe du maximum de Hopf.

18) Sur les applications conformes du bord en dimension 2.

On a parlé d'application conforme en dimension 2 :

Pourquoi la définition d'un domaine analytique permet d'avoir une carte conforme locale du bord ?

a)-Sur le disque unité, on a une transformation conforme directe du disque sur le demi-plan de Poincaré. Il n'y a pas besoin de définir l'application  $\psi$  (voir ci-dessous).

b)-L'application  $\psi$ , permet de définir des coordonnées qui permettent d'utiliser une application conforme.

Ce qui suit est la traduction de ce qui a été écrit dans les preprints sur arXiv. Pour définir un carte "conforme"  $\gamma$ , en dimension 2.

1-Il suffit de prouver que  $\gamma_1((-\epsilon, \epsilon)) = \partial\Omega \cap \tilde{\gamma}_1(B_\epsilon) = \partial\Omega \cap \tilde{\gamma}_1(B_\epsilon) \cap \{|abscisse| < \epsilon\}$ , pour  $\epsilon > 0$  assez petit. Avec  $\tilde{\gamma}_1$  l'extension holomorphe de  $\gamma_1(t) = t + i\varphi(t)$ .

Pour voir ça, on raisonne par l'absurde. On a pour  $z_\epsilon \in B_\epsilon$ ,  $\tilde{\gamma}_1(z_\epsilon) = (t_\epsilon, \varphi(t_\epsilon))$  avec  $|t_\epsilon| \geq \epsilon$ . Comme  $\tilde{\gamma}_1$  est injective sur une boule fixés au départ par le théorème d'inversion locale,  $B_1$  et  $\tilde{\gamma}_1 = \gamma_1 = t + i\varphi(t)$  sur l'axe réel, on a nécessairement  $|t_\epsilon| \geq 1$ . Mais par continuité  $|\tilde{\gamma}_1(z_\epsilon)| \rightarrow 0$  parce que  $z_\epsilon \rightarrow 0$ . Et on utilise le fait que  $|\tilde{\gamma}_1(z_\epsilon)| = |(t_\epsilon, \varphi(t_\epsilon))| \geq |t_\epsilon| \geq 1$ , pour avoir une contradiction.) ( Cela veut dire que pour un rayon assez petit quand le graphe sort de la boule, il n'y retourne plus). ( Ce fait implique, en raisonnant avec des chemins, quand un a chemin qui coupe  $\partial\Omega$  in  $\tilde{\gamma}_1(B_\epsilon)$  en un point ce point a pour abscisse  $|abscisse| < \epsilon$ . Encore, une fois, ce fait (par un raisonnement par l'absurde avec le fait que  $\partial\tilde{\Omega} = \partial\Omega$ , il faut raisonner avec des chemins), implique que l'image de la partie supérieure est entièrement d'un côté de la courbe et l'image de l'autre est de l'autre côté de la courbe.

2- Posons :  $\psi : (\lambda_1, \lambda_2) \rightarrow M \in \Omega$  telle que :  $\overrightarrow{x_0 M} = \lambda_1 i'_1 + \lambda_2 j'_1$  avec  $(i'_1, j'_1)$  est une base telle que  $i'_1 = e^{-i\theta} i_1, j'_1 = e^{-i\theta} j_1$ . Et,  $\varphi = id : (x_1, x_2) \rightarrow M$  telle que :  $\overrightarrow{O M} = x_1 i_1 + x_2 i_2$

la base canonique  $(i_1, j_1)$ . Alors on a deux cartes de  $\Omega$ ,  $\varphi$  et  $\psi$  et les affixes  $T_M = \lambda_1 + i\lambda_2$  et  $z_M = x_1 + ix_2$  sont tels que :(l'application de changement de cartes) :

$$T_M/e^{i\theta} + x_0 = z_M = \varphi^{-1} \circ \psi(\lambda_1, \lambda_2),$$

On a :

$$\partial_{\lambda_1} = \cos \theta \partial_{x_1} + \sin \theta \partial_{x_2},$$

$$\partial_{\lambda_2} = -\sin \theta \partial_{x_1} + \cos \theta \partial_{x_2},$$

Donc, la métrique dans la carte  $\psi$  ou en coordonnées  $(\lambda_1, \lambda_2)$  est :  $g_{ij}^\lambda = \delta_{ij}$  et le Laplacien dans les deux cartes (coordonnées),  $\psi$  et  $\varphi$  est le Laplacien usuel  $\partial_{\lambda_1 \lambda_1} + \partial_{\lambda_2 \lambda_2}$ .

On écrit :

$$\Delta u(M) = \Delta_\lambda(u \circ \psi(\lambda_1, \lambda_2))$$

Puis on applique l'application conforme  $\tilde{\gamma}_1$  qui envoie l'affixe  $T_M, M$  dans un voisinage de  $x_0 \in \partial\Omega$  vers  $B_\epsilon$  et envoie  $T_M, M \in \partial\Omega$  sur l'axe réel  $(-\epsilon, \epsilon)$  et l'autre partie vers l'autre partie de  $\Omega$  et  $\bar{\Omega}^c$ .

On a :  $\psi : (\lambda_1, \lambda_2) \rightarrow M$  et  $\tilde{\gamma}_1 : (\lambda_1, \lambda_2) \rightarrow (\mu_1, \mu_2)$ . L'application considérée est :  $\psi \circ \tilde{\gamma}_1^{-1}$ . C'est bien une carte. Pour le voir :

La premiere carte (carte usuelle) est :  $\psi \circ g^{-1}$  avec  $g$  est l'application  $g : (\lambda_1, \lambda_2) \rightarrow [\lambda_1, \lambda_2 + \varphi_0(\lambda_1)]$  et  $\varphi_0$  l'application qui permet de définir  $\partial\Omega$  comme un graphe.

L'application de changement de carte est :

$$g \circ \tilde{\gamma}_1^{-1}$$

elle est reguliere d'un voisinage de 0 vers un autre voisinage de 0 et envoie la partie superieure du premier voisinage vers la partie superieure de l'autre voisinage (ainsi que les parties inferieures).

On voit bien que  $\psi \circ \tilde{\gamma}_1^{-1}$  est une carte avec la propriété que  $\tilde{\gamma}_1$  est conforme.

(l'application  $\psi \circ \tilde{\gamma}_1^{-1}$  est aussi la composée d'une rotation (donc conforme) et de  $\tilde{\gamma}_1^{-1}$  qui est conforme, si on se placait en coordonnées cartésiennes au départ. Mais, il faut voir que la carte  $\psi$  definit des coordonnés qui permettent la construction d'une application conforme. On n'a pas besoin de cela pour le disque unité, on a directement l'application du demi-plan de Poincaré).

Remarque :  $\psi$  et  $\varphi = id$  sont des cartes de  $\Omega$  et  $\psi$  est "presque" une carte de  $\partial\Omega$ . Mais  $\psi \circ \tilde{\gamma}_1^{-1}$  et  $\psi \circ g^{-1}$  sont des cartes du bord.

3- "Caractérisation des domaines  $C^k$ " : On peut dire que la définition d'un domaine  $C^k, k \geq 1$  est équivalente à la définition d'une sous-variété + la condition :  $\partial\bar{\Omega} = \partial\Omega$  or  $\dot{\bar{\Omega}} = \Omega$ .

## RÉFÉRENCES

- [1] Agmon. 1957 ou 1959 sur les estimations a priori locales.
- [2] Agmon-Douglis-Nirenberg. 1959
- [3] Ambrosio. Fusco. Pallara. Functions of Bounded variations and Free Discontinuity problems. Oxford.2000.
- [4] T. Aubin. Some Nonlinear Problems in Riemannian Geometry. Springer-Verlag, 1998.
- [5] Azé. Analyse variationelle...ellipse.1997.
- [6] C. Bandle. Isoperimetric Inequalities and Applications. Pitman, 1980.
- [7] A. Besse. Einstein manifolds. Springer. 1987.
- [8] Bredon. Geometry and Topology. Springer.
- [9] Brezis. Analyse fonctionnelle; 1983
- [10] Brezis-Marcus-Ponce. Nonlinear elliptic equations with measures revisited. Mathematical aspects of nonlinear dispersive equations, 55-109, Ann. of Math. Stud., 163, Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 2007.
- [11] Brezis, Merle. Uniform estimate and blow-up behavior... Comm.P.D.E..1991.
- [12] M. G. Crandall. P.H. Rabinowitz. Some continuation and variational methods for positive solutions of nonlinear elliptic eigenvalue problems. 1975.
- [13] Dautray-Lions.
- [14] De Figueiredo-Lions-Nussbaum. A priori estimates and existence of positive solutions of semilinear elliptic equations. J. Math. Pures Appl. (9) 61 (1982), no. 1, 41-63

- [15] Gallot. Hulin. Lafontaine. Riemannian Geometry.
- [16] D. Gilbarg, N.S. Trudinger. Elliptic Partial Differential Equations of Second order, Berlin Springer-Verlag, Second edition, Grundlehren Math. Wiss.,224, 1983.
- [17] William Goldman. 1983. Existence de varietes sans structure plate.
- [18] Gramain.A. Topologie des surfaces. Puf. 1971.
- [19] E. Hebey. Introduction a l'analyse non-lineaire sur les varietes. Diderot Editions.
- [20] Hatcher. Sur les Torus Bundles.
- [21] Huber.A. On subharmonic functions in the large. (1957)
- [22] Hulin, Troyanov. Prescribing curvature on open surfaces.(1992)
- [23] D.Huybrechts. Lecture on K3 surfaces.
- [24] D. Joyce. Constant scalar curvature metrics on connected sums. International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences.(2003), Issue 7, pp 405-450.
- [25] Kuiper. (Conformally flat structure in the large). (1949).
- [26] Kulkarni. Conformally flat manifolds.1972.
- [27] Lafontaine.Introduction a la geometrie Differentielle.2010.
- [28] Lang, S. Differentiable and Riemannian manifolds.
- [29] Necas, J. Direct Methods in the Theory of Elliptic Equations. Springer.
- [30] J.G. Ratcliffe.S.T. Tschantz. On the Davis hyperbolic 4-manifold. Topology and its Applications Volume 111, Issue 3. pp 327-342
- [31] Robert, Frederic. Preprint, Fonctions de Green sur les varietes a bord.
- [32] R. Sa Earp. E. Tubiana. Introduction a la geometrie hyperbolique et aux surfaces de Riemann.

EQUIPE D'ANALYSE COMPLEXE ET GEOMETRIE, UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, 75005, PARIS, FRANCE.  
*E-mail address:* samybahoura@yahoo.fr, samybahoura@gmail.com