



HAL
open science

Cas d'existence de solutions d'EDP.

Samy Skander Bahoura

► **To cite this version:**

| Samy Skander Bahoura. Cas d'existence de solutions d'EDP.. 2017. hal-01559242v5

HAL Id: hal-01559242

<https://hal.science/hal-01559242v5>

Submitted on 5 Dec 2018 (v5), last revised 18 Jul 2022 (v17)

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.

CAS D'EXISTENCE DE SOLUTIONS D'EDP.

SAMY SKANDER BAHOURA

1. CAS D'EXISTENCE DE SOLUTIONS D'EDP

Estimations uniformes pour l'équation de Yamabe, l'équation du type Yamabe, l'équation de la courbure scalaire prescrite, l'équation du type courbure scalaire prescrite, l'équation de Gauss. On se pose la question de savoir s'il y a des solutions.

En dimension 2 :

1) Les solutions de Liouville en fonction des fonctions holomorphes dont les dérivées ne s'annulent pas, voir le livre de C. Bandle.

2) Sur la boule unité, il y a des solutions radiales, nulle au bord, cela revient à résoudre une équation différentielle.

3) Si le domaine n'est plus une boule, par la méthode des sur et sous solutions, il y a des solutions au problème de Gelfand, $u = 0$ est sous solution et la fonction distance est une sur solution. (Voir Dupaigne).

4) Par la méthode variationnelle, il y a toujours des solutions, c'est lié à la compacité de l'injection de Moser-Trudinger dans L^1 .

Pour la dimension 2, sur des surfaces compactes sans bord, il y a des résultats d'existence dans le livre d'Aubin, par la méthode variationnelle si la courbure scalaire $S = -1$ on peut minorer les solutions, lorsque $S = 0$ il se peut qu'on ne puisse pas minorer les solutions.

Pour une courbure scalaire négative, on peut résoudre le problème de la courbure scalaire prescrite avec une courbure prescrite $f \leq 0$ par la méthode des sur et sous solutions, puis on rajoute une constante ou fonction petite $f + c$ ou $f + g$, $c, g > 0$. Dans ce cas, il se peut qu'on puisse minorer les solutions. C'est fait dans le livre d'Aubin.

Dans le cas nul (courbure scalaire nulle, par la méthode variationnelle), on peut résoudre le problème de la courbure prescrite, pour une courbure prescrite f changeant de signe et $\int f < 0$. Dans ce cas il se peut que les solutions ne soient pas minorables. C'est fait dans le livre d'Aubin.

En ce qui nous concerne, on se placera sur la partie positive de $f + c = c > 0$ et $f + g = g > 0$.

On peut résoudre le Problème de la courbure scalaire sur une surface compacte non orientable, c'est fait dans le livre d'Aubin pour le Projectif réel de dimension 2, \mathbb{P}^2 .

En dimension ≥ 3 .

1) Pour l'équation de Yamabe (5 et 6) et l'équation de la courbure prescrite en dimension 4 : Quand la variété est compacte sans bord, les résultats existent par Aubin-Schoen en dimension 5 et 6.

Si on considère une fonction f changeant de signe et que la courbure scalaire $S_g = 0$ (et de métrique g), par la méthode variationnelle f est courbure scalaire d'une métrique conforme, voir le livre de Hebey (pour les dimensions 3, 4, le théorème d'Escobar-Schoen) et le livre d'Aubin (le Théorème d'Escobar-Schoen dans le cas conformément plat et le Théorème de Bismuth). Voir aussi dans le livre d'Aubin d'autres conditions sur f pour qu'elle soit courbure scalaire d'une métrique conforme. Dans le cas, changeant de signe on se placera sur l'ensemble $\{f > 0\}$. Ceci est valable en toute dimension ≥ 3 (conformément plat, Escobar-Schoen et Aubin et invariant de Yamabe positif).

Pour la dimension 6, on résout le problème de la courbure scalaire prescrite sur une variété de courbure scalaire $S_g = -1$ (de métrique g), pour une courbure prescrite $f \leq 0$, par exemple une cutoff avec $f = 0$ une boule, puis par un théorème dans le livre d'Aubin, il existe un voisinage de f dans C^α , dans lequel on peut résoudre le problème de la courbure prescrite. (La condition, voir dans le livre d'Aubin, de Rauzy, Ouyang, Tang, Vazquez-Veron est que la valeur propre du Laplacien est plus grande que la courbure scalaire, or en prenant des petites boules, on a grâce au

Theoreme de Levy-Brhul, le comportement asymptotique des valeurs propres du Laplacien des petites boules geodesiques (elle le prouve dans le cas de varietes Riemanniennes analytiques), voir l'article et le monograph de Leon Karp-Mark Pinsky (ils le prouvent dans le cas de varietes Riemanniennes C^∞).

Après avoir resolu le probleme de la courbure prescrite pour des fonctions cutoff $f \leq 0$, par exemple (de boules petites), il suffit d'ajouter une constante positive petite pour avoir $f + c$ courbure prescrite d'une métrique conforme telle que $f + c = c > 0 =$ boule et $f + c$ est négative dans un autre ensemble. Alors on remarque que la ou la solution est minimum, alors elle est minorée par une constante strictement positive. On vient de construire un exemple de solutions minorées par une constante positive, qui est un exemple de solutions en dimension 6 pour la quelle le minimum est minoré par une constante positive et est solution de Yamabe dans la boule ou $f + c = c > 0$. (le minorant est $m = 1/(1 - c)$, si on suppose $0 \geq f \geq -1$, utiliser l'équation et le fait qu'en P point minimum de la solution u , $\Delta u(P) \leq 0$.)

Pour la dimension 4 et l'équation de la courbure prescrite, il suffit de suivre le meme chemin que pour la dimension 6, en remplaçant $c > 0$ par une fonction positive voisine de c , $c > 0$ petite, alors les solutions sont minorées par une constante $m > 0$. (Voir Travail de These dans le cas plat (JMPA) et Journal of Mathematical Analysis and Applications).

Quand la variété a un bord :

En dimension 5, il y a des solutions voir l'article de Z-C. Han et YY.Li, l'operateur doit etre de type positif, ce qui est possible si on considère des boules géodesiques, la courbure moyenne est alors presque constante et positive (proche de de la sphère), on choisit la courbure scalaire et de Ricci non constantes pour avoir un point non ombilique.(Journal of Functional Analysis).

2) Pour l'équation du type Yamabe : si $R = \frac{(n-2)}{4(n-1)}S_g$ avec S_g est la courbure scalaire et g la metrique.

Quand la variété est compacte sans bord, à partir de la dimension 4, il y a les résultats d'Aubin pour un opérateur du type $(\Delta + a$, avec $a < R$ en un point).(Bulletin des Sciences Mathématiques).

Quand la variété a un bord, à partir de la dimension 5, il y a les résultats de Holzman pour un opérateur du type $(\Delta + a$, avec $a < R$).(Bulletin des Sciences Mathématiques).

3) Pour l'équation du type courbure scalaire prescrite :

Dans le cas sous-critique tendant vers le critique, il y a des solutions par la méthode variationnelle car l'injection de Sobolev est compacte dans ce cas.(Travail de Thèse).

4) Dans le cas radial, il y a des exemples dans l'article de Chen, C.C-Lin, C-S, propositions 4.2 et 4.3. avec des courbures prescrites de la forme $V = 1 + Kr^\rho$, $1 < \rho < n - 2$. (Voir travail de These, pour les fonctions radiales).

Il y a les résultats de Brezis-Nirenberg dans le cas d'un ouvert de l'espace euclidien en dimension ≥ 4 , pour une perturbation non linéaire sous critique de l'équation de Yamabe dans le cas d'un ouvert plat. (Voir travail de Thèse).

Pour l'equation de la courbure scalaire prescrite en dimension 4, on en a parlé ci-dessus, il suffit de considerer une courbure prescrite changeant de signe de telle manière que les solutions soient positives et minorées et se placer sur la partie positive de la courbure prescrite. (Voir Travail de These dans le cas plat (JMPA) et Journal of Mathematical Analysis and Applications).

Pour la dimension 2, les estimations a priori ont pour but de prouver l'existence de solutions par la méthode du degré topologique de Leray-Schauder, comme dans De Figueiredo-Lions-Nussbaum, une des conditions est que l'operateur compact M est nulle en 0, or ici cette condition n'est pas satisfaite car il y a une exponentielle. Cette méthode ne s'applique pas à l'exponentielle, mais ce cas particulier peut induire l'existence de solutions par la méthode des sur et sous solutions (voir Dupaigne), en fait ici on s'interesse aux estimations a priori des solutions d'équations du type Gauss. On a une compacité à la Gromov des suites de métriques ou bien un theoreme de compacité de fonctions (Ascoli ou d'autres theoremes, voir le livre de Brezis dans L^p) ou si on revient aux EDP, des estimations a priori elliptiques.

Pour les dimensions ≥ 3 , on se borne à dire qu'on a des inégalités du type Harnack, une particularité de ces équations à exposant critique de Sobolev comme pour les fonctions harmoniques.

Un des but des estimations du type $\sup \times \inf$ est de prouver qu'il n'y a que des blow-up isolés simples pour les solutions de ces équations et donc elles convergent vers une fonction semblable à la fonction de Green, le Théorème de la masse positive s'il est vrai tout le temps, permet de dire

que le terme constant est positif, alors que par l'identité de Pohozaev l'intégrale d'une certaine quantité serait à la fois positive ou nulle (blow-up isolés simples) et strictement négative (masse positive), ce qui n'est pas possible. Donc il n'y a pas de blow-up, c'est-à-dire que les solutions sont bornées dans C^2 et par un argument d'homotopie et degré topologique le degré serait non nul ce qui veut dire qu'il y a des solutions.

L'existence de solutions était déjà connu par la méthode variationnelle, on se borne à considérer que ce travail a pour but de chercher des estimations a priori et en particulier des inégalités du type Harnack, propriétés de ces solutions à exposant critique de Sobolev.

Donc, on suppose que les solutions existent, ce qui est le cas dans les différents cas considérés et on prouve certaines propriétés qualitatives de ces équations. (Convergence de métriques, à la Cheeger-Gromov, estimations a priori, compacité de solutions, inégalités du type Harnack)

Concernant les variétés qu'on considère, elles peuvent être non conformément plates, il y a quelques exemples de ces variétés.

1) Les variétés de dimension 1 et 2 sont localement conformément plates.

2) Les sphères, sommes connexes de sphères, produit de sphères et d'un cercle, l'espace hyperbolique et le produit d'une variété de courbure sectionnelle constante par un cercle, sont conformément plates.

Par le revêtement, les projectifs réels sont conformément plats car de courbure sectionnelle constante égale à 1 (Voir le livre d'Hebey, égalité des courbures sectionnelles, quand on a un revêtement riemannien). Les projectifs de dimension paire sont non orientables, les projectifs de dimension impaire sont orientables (voir le livre de Lafontaine).

3) Il existe une variété compacte de dimension 3, non conformément plate, plus précisément, elle ne possède pas de structure localement conformément plate. (William Goldman).

Si on considère une variété de courbure sectionnelle non constante et son produit par un cercle, alors la variété obtenue est non localement conformément plate.

4) Le projectif complexe de dimension 2 complexe donc de dimension 4 réelle est non conformément plat (métrique de Fubini-Study), il est d'Einstein et de courbure scalaire constante positive.

5) Les surfaces K3, non conformément plat de dimension 4 réelle. Il est d'Einstein de constante 0.

6) Le produit $S^2 \times S^2$ est de dimension 4 réelle et non conformément plat, d'Einstein, de courbure scalaire constante positive.

7) Les projectifs complexes de dimensions > 2 , non conformément plat. (Métrique de Fubini-Study).

8) Maintenant, si on veut que la courbure scalaire soit, -1, 0, 1, on utilise les procédés suivant :

-On construit des variétés produit à partir des variétés précédentes, elles sont alors soit plates soit non plate (il suffit qu'une ne soit pas plate, voir le Hebey).

-On utilise les sommes connexes, en se référant à un article de Dominic Joyce, sur les différentes combinaisons possibles des sommes connexes donnant des variétés de courbures scalaire -1, 0, 1. On construit de telles variétés et elles peuvent être plates ou non plates.

Exemple en dimension 4, cas non plat :

Soit S_2 la sphère de dimension 2. On considère une surface de genre grand, 2, la somme connexe de deux Tores $T_2 \# T_2$, on résout l'équation de la courbure prescrite constante $k = -1$, c'est fait dans le livre d'Aubin. On peut supposer qu'il existe une surface S de courbure scalaire constante (et donc sectionnelle constante $-3/2$) égale à -3 par exemple. On considère le produit $S_2 \times S$, il est non conformément plat par le théorème dans le livre d'Hebey (courbures sectionnelles non opposées) et de courbure scalaire -1. On peut alors appliquer le procédé d'existence de solutions pour l'équation de la courbure prescrite en dimension 4 minorées par $m > 0$ (pour la fonction cutoff nulle au voisinage du point P ou $Weyl(P) \neq 0$, est non nul). On obtient alors des solutions de l'équation de la courbure prescrite en dimension 4 minorées par une constante positive et sur une variété non localement plate.

Exemple en dimension 5 et 6, cas non plat:

On peut faire la même chose pour l'équation de Yamabe en dimension 5 et 6. On considère $S_1 \times S_2 \times S$ et $S_1 \times S_1 \times S_2 \times S$ qui sont non plates et de courbure scalaire -1.

Un autre exemple en dimension 5, cas non plat:

Soit S_3 la sphere de dimension 3 (courbure scalaire 6 et courbure sectionelle 1) et S une surface de Riemann compacte de courbure scalaire -6 (donc sectionelle -3). Alors le produit $S_3 \times S$ est non localement plat (voir theoreme du livre d'Hebey, courbures sectionelles constantes non opposees) et de courbure scalaire $R = 0$. En considerant une fonction changeant de signe et cutoff $f = \epsilon > 0$ dans une petite boule centree en P tel que $Weyl(P) \neq 0$ et $f < 0$ ailleurs telle que $\int f < 0$ (ϵ petit). On peut appliquer le theoreme de Bismuth en dimension 5 d'existence de solutions de l'equation de la courbure prescrite f changeant de signe (avec une courbure scalaire nulle sur une variete compacte). Ici on n'a pas forcement un minorant du minimum des solutions.

On a un exemple de solutions de l'equation de Yamabe sur $\{f = \epsilon > 0\}$, sur une variete non conformement plate de dimension 5 ou on n'a pas forcement un minorant des solutions.

Un autre exemple en dimension 5:

Un theoreme dans le livre d'Aubin dit que si on considere une varieté M de dimension $n \geq 3$ non conformement diffeomorphe a la sphere (en particulier non localement conformement plate), alors il existe $k > 1$, ne dependant que de la varieté M , tel que toute fonction $f > 0$ verifiant:

$$\sup_M f \leq k \inf_M f,$$

est courbure scalaire d'une metrique conforme. On applique cela à $M = S_1 \times P_2(\mathbb{C})$ (le cercle fois le projectif complexe de dimension 2, M est non localement conformement plate par le theoreme dans le livre d'Hebey, de courbure scalaire constante $R > 0$, $dim(M) = 5$), et, f une fonction cutoff telle que $\frac{1+2\epsilon}{k} \leq f \leq 1+\epsilon$ et $f \equiv 1+\epsilon$ dans une boule centree en P telle que $Weyl(P) \neq 0$.

Ici, on ne sait pas minorer les solutions.

Exemple en dimension 4, cas plat et equation de la courbure prescrite:

Soit S_4 la sphere de dimension 4. On considere une variete de courbure scalaire -1 si elle est conformement plat, c'est fini, on utilise le meme procede que precedement dans le cas non plat. Si cette variete est non plate, on utilise la somme connexe avec la sphere S_4 de Dominic Joyce ; on obtient une variete de courbure scalaire -1 dans le quelle (la partie de S_4 , car on a soit la metrique de S_4 soit une fonction fois la metrique de S_4 et le tenseur de Weyl reste nul car on a un invariant conforme) est plate, on resout le probleme de la courbure prescrite pour une fonction cutoff nulle au voisinage du point P ou la metrique est plate et negative ailleurs puis on rajoute une fonction $C^{0,1}$. Alors on a des solutions mineores et comme la metrique est plate au voisinage de P et que c'est l'equation de la courbure prescrite, en faisant un changement de metrique conforme, on obtient l'equation sur un ouvert de \mathbb{R}^4 avec des solutions mineores.

Davis, M, W, (1985), (Closed orientable hyperbolic 4-manifold), montre l'existence d'une varieté compacte sans bord orientable hyperbolique de dimension 4, c'est-a-dire de courbure sectionelle constante -1, (en fait, comme pour le Tore, ces varietes sont obtenues par un revetement riemannien du au quotient de l'espace hyperbolique par un groupe discret d'isometries). Donc elle est localement conformement plate et de courbure scalaire constante strictement negative. On peut utiliser le meme procede d'existence de solutions mineores par une constante positive $m > 0$ et solutions de l'equation de la courbure prescrite. Par un changement de metrique conforme on se ramene a un ouvert de l'espace \mathbb{R}^4 .

Exemples en dimension 3, cas non plat et plat

Soit M_φ le Torus bundle de William Goldman. Cette variete compacte connexe orientable ne possede pas de structure localement plate. C'est à dire que toute metrique g sur cette varieté est non localement plate. D'apres Aubin, il existe une metrique g_1 de courbure scalaire $S_{g_1} = -1$ et a partir de cette metrique, pour toute fonction f strictement negative quelque part, il existe une metrique g_2 telle que $S_{g_2} = f$. Il suffit de prendre f changeant de signe.

Comme on peut resoudre le probleme de la courbure prescrite avec H une courbure prescrite cutoff (autour de P tel que $C_{g_2}(P) \neq 0$, en dimension 3, le tenseur de Weyl est nul, on prend le tenseur de Cotton, C_{g_2} caracterise la courbure et c'est un invariant conforme), et $H \leq 0$, pour une courbure scalaire de depart egale a f relativement a la metrique g_2 , puis on rajoute a H une constante $c > 0$ ou une fonction $k > 0$, dans ce cas il se peut qu'on ne puisse pas minorer les solutions, car le point Q ou le minimum est atteint peut etre tel que $f(Q) \geq 0$.

Remarque: Pour trouver des solutions de l'équation de la courbure prescrite, on considère, $f \leq 0$ cutoff alors $\exists g_2$ telle que $S_{g_2} = f$, puis on résout le problème de la courbure prescrite avec $F \equiv -1$, c'est fait dans le livre d'Aubin, de plus la solution u_1 est unique. On considère la métrique $g_3 = u_1^{4/(n-2)} g_2$, sa courbure scalaire est -1 . On résout le Problème de la courbure prescrite (par les sous et sur solutions, c'est fait dans le livre d'Aubin), pour une courbure prescrite H cutoff, comme on l'a dit précédemment, puis on rajoute une constante positive c ou une fonction positive k . Dans ce cas les solutions u_c sont minorées par $m > 0$. Donc les solutions au final sont du type $u_1 u_c$ sont minorées. Ce qu'on vient de voir c'est qu'il existe des solutions et elles sont minorées par $m > 0$ de :

$$-\Delta u + fu = (H + c)u^{N-1}, \quad u > 0, \quad (E_c)$$

Par contre ce qu'on ne sait pas est que si toutes les solutions sont minorables par $m > 0$.

Soit, u une solution de (E_c) alors elle n'est pas forcément minorable, car le point Q où le minimum est atteint peut être tel que $f(Q) = 0$.

Dans le cas plat, il suffit de considérer $S_1 \times S_1 \times S_1$ qui est plat de courbure scalaire nulle (produit d'un Tore de courbure sectionnelle nulle et d'un cercle, avec la métrique produit) et utiliser le théorème du livre de Hebey, comme ce qu'on a fait pour la dimension 5. (Théorème de Schoen-Escobar d'existence de solutions changeant de signe).

Un exemple en dimension 3:

On résout le problème de la courbure prescrite sur la sphère S_2 de dimension 2 avec la courbure prescrite $R = 1 + (\langle x | e \rangle)^2$, $R(-x) = R(x)$, (c'est un résultat de Moser, voir le livre d'Aubin), R est non constante et donc la courbure sectionnelle associée est non constante.

On considère le produit $M_3 = S_1 \times S_2$ avec la métrique précédente sur S_2 de courbure sectionnelle non constante. Donc M_3 est non localement conformément plate par un résultat d'Hebey (courbure sectionnelle de S_2 non constante).

On utilise le théorème dans le livre d'Aubin, comme dans l'exemple 3 en dimension 5. (sup $f \leq k \inf f$, $k > 1$). On choisit $f > 0$ telle ∇f non borné, tendant vers une fonction Heaviside, car un théorème de YY.Li-M.Zhu dit que tout est borné, si f est C^2 et en particulier les solutions sont minorées).

Dans ce cas on n'a pas forcément un minorant des solutions de l'équation de Yamabe dans la boule où $C_g(P) \neq 0$, (tenseur de Cotton), sur une variété non conformément plate.

On utilise le résultat d'Escobar-Schoen en dimension 3, pour une fonction $f = \epsilon > 0$ changeant de signe ou bien une f une fonction changeant de signe ayant un point critique en P point maximum de f tel que $C_g(P) \neq 0$. (voir le livre d'Hebey).

Dans ce cas aussi, on ne peut pas minorer les solutions sur une variété compacte non localement conformément plate de dimension 3.

Ici aussi, on ne sait pas minorer les solutions.

Exemples en dimension 4, cas plat et non plat

On prend une surface de Riemann S de courbure scalaire $R = -2$ (donc sectionnelle -1) et la sphère S_2 de courbure scalaire 2 (donc sectionnelle 1). Le produit $S_2 \times S$ est conformément plat et de courbure scalaire nulle, par le théorème du livre d'Hebey (courbures sectionnelles constantes opposées). On peut appliquer le Théorème d'existence de solutions pour des courbures prescrites changeant de signe en dimension 4, sur une variété compacte de courbure scalaire nulle (Résultat d'Escobar-Schoen). On pouvait prendre aussi, le produit de 2 Tores, muni de la métrique produit (courbures sectionnelles nulles donc opposées), $\mathbb{T}^2 \times \mathbb{T}^2$ de courbures scalaire nulle. Ici, on ne sait pas minorer les solutions.

Dans le cas non plat, il suffit de considérer la surface $K3$ munie d'une métrique non localement conformément plate, de courbure scalaire nulle. On fait la même chose que dans le cas plat. Ici, on ne sait pas minorer les solutions.

On peut prendre $P_2(\mathbb{C})$ de dimension réelle 4 non localement conformément plat et de courbure scalaire constante positive, on applique le théorème d'Aubin comme en dimension 5, dans le cas d'invariant de Yamabe positif. Ici aussi, on ne sait pas minorer les solutions.

Exemples en dimension $n \geq 3$, cas plat

Sur le Tore \mathbb{T}^n , $n \geq 3$, il existe une métrique plate (voir, Gallot-Hulin-Lafontaine) et donc de courbure scalaire $R = 0$. Le théorème dans le livre d'Hebey d'existence de solutions pour des

courbures scalaires prescrite changeant de signe et d'integrales negative, sur une variété compacte de courbure scalaire nulle, n'est pas forcement vrai, sauf en dimensions 3 et 4 (Escobar-Schoen) et en dimension 5 par Bismuth avec des conditions supplementaires, dans le cas non conformement plat.

Par contre dans le cas conformement plat (ce qui nous interesse ici), ce theoreme est vrai en prenant des fonctions cutoff changeant de signe, c'est un theoreme d'Escobar-Schoen.

On pouvait resoudre une equation differentielle sur une boule de l'espace euclidien avec ou sans condition au bord (attention a la formule de Pohozaev).

Par exemple, dans des couronnes, Kazdan-Warner montrent l'existence de solutions avec conditions de Dirichlet.

Il y a aussi le resultat de Coron dans des domaines à trous, on peut modifier un peu le domaine pour avoir une infinité de solutions pour une infinité de domaines à trous, par exemple on enleve des disques.

On a aussi les solutions de Caffarelli-Gidas-Spruck.

Ici, on ne sait pas minorer les solutions.

Exemple en dimension 2 pour l'equation avec singularité au bord: sur la boule unité.

Ici, $\Delta = -(\partial_{11} + \partial_{22})$.

Soit $\mu \geq 0$ tel que:

$$\mu = \inf \left\{ \int_{\Omega} |\nabla u|^2 dx, \int_{\Omega} \frac{V e^u}{|x - x_0|^{2\alpha}} dx = 1, u \in H_0^1(\Omega) \right\}$$

Ici, $\Omega = B_1(0)$, la boule unité.

1) On prouve que cet ensemble est non vide:

On considere, $u_{\beta}(r) = \beta(1 - r^2)$ et $0 < \epsilon \leq V \leq 2\epsilon$. On prend d'abord la fonction nulle $u \equiv 0$. Alors, on choisit $\epsilon > 0$ petit tel que:

$$\int_{\Omega} V e^u / |x - x_0|^{2\alpha} dx \leq 2\epsilon \int_{\Omega} 1 / |x - x_0|^{2\alpha} dx < 1.$$

On utilise u_{β} , on utilise les coordonnes polaires:

$$\int_{\Omega} V e^u / |x - x_0|^{2\alpha} dx \geq \int_{B_1(0)} V e^{u_{\beta}} / |x - x_0|^{2\alpha} dx \geq \frac{2\pi\epsilon}{2^{2\alpha}} \int_0^1 r e^{\beta(1-r^2)} dr$$

Donc en prenant β grand, on a:

$$\int_{\Omega} V e^u / |x - x_0|^{2\alpha} dx \geq \frac{2\pi\epsilon}{2^{2\alpha+1}\beta} e^{\beta} (1 - e^{-\beta}) \rightarrow +\infty.$$

Donc, il existe $\beta_0 \leq \beta_{max} = \beta_{max}(\epsilon, \alpha)$ tel que:

$$\int_{\Omega} V e^{u_{\beta_0}} / |x - x_0|^{2\alpha} dx = 1.$$

Donc μ est bien definit.

2) En utilisant une suite minimisante et l'injection compacte de Moser-Trudinger dans L^1 . μ est atteint et par les multiplicateurs de Lagrange on a l'existence de u et λ tels que:

$$\Delta u = \lambda V e^u / |x - x_0|^{2\alpha}, u \in H_0^1, \int_{\Omega} V e^u / |x - x_0|^{2\alpha} dx = 1.$$

u est reguliere. Si $\lambda \leq 0$ par le principe du maximum $u \leq 0$ et donc:

$$\int_{\Omega} V e^u / |x - x_0|^{2\alpha} dx < 1.$$

Ce n'est pas possible.

Donc $\lambda > 0$ et $u > 0$. En utilisant la premiere fonction propre du Laplacien φ_1 (dans le probleme variationnel) et u_{β_0} on a $\mu \leq C(\beta_{max})$ et $\lambda \leq C(\beta_{max}, \epsilon, \varphi_1) = C(\alpha, \epsilon, \varphi_1)$. Puisque β_{max} est uniformement borne, par l'injection compacte de Moser Trudinger, $\int e^{u_i}$ converge et donc les solutions sont uniformement bornees (ici on fait varier V).

On vient de construire une solution du probleme variationel avec singularité au bord et ces solutions (puisque λ est uniformément borné) verifient des conditions du probleme du type Brezis-Merle avec bornes uniformes. Ceci dans le cas d'un $\epsilon > 0$ fixé et petit.

Dans le cas où on fait tendre $\epsilon > 0$ vers 0. on a

Le terme $\lambda \times \epsilon$ et donc λV sont uniformément bornés et positifs (il suffit d'utiliser la premiere fonction propre du laplacien φ_1 pour eliminer le terme $\int_{\Omega} e^u / |x - x_0|^{2\alpha} \varphi_1 dx$) et en utilisant la contrainte $\int_{\Omega} e^u / |x - x_0|^{2\alpha} dx \geq 1/2\epsilon \rightarrow +\infty$ quand $\epsilon \rightarrow 0$.

Finalement, on a deux exemples, un avec volumes bornés (energies bornées) et un avec volumes tendant vers l'infini (energies tendant vers l'infini) et λV uniformément borné. Il est clair que quand le volume tend vers l'infini (l'energie tend vers l'infini) le $\sup_{\Omega} u$ tend vers l'infini. Il suffit de supposer les volumes bornés (energies bornées).

Pour construire un exemple avec volume bornés et courbures positives et uniformément bornées avec singularité au bord mais avec sup divergeant, on part du contre exemple de Brezis-Merle (la singularité est $x_0 = 0$ et Ω la boule unité centrée en $(1, 0)$):

$$\Delta u_{\epsilon} = f_{\epsilon},$$

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

On pose alors, $V_{\epsilon} = |x|^{2\alpha} f_{\epsilon} e^{-u_{\epsilon}}$. Alors on a:

$$\Delta u_{\epsilon} = V_{\epsilon} \frac{e^{u_{\epsilon}}}{|x|^{2\alpha}},$$

avec condition de Dirichlet.

On remarque que quand $x \in B_{\epsilon}(a_{\epsilon})$, $|x|$ est de l'ordre de $d_{\epsilon} = |a_{\epsilon}|$, car $d_{\epsilon} = \epsilon^{\beta}$ avec $\beta < 1$. Puis le support de f_{ϵ} est dans $B_{\epsilon}(a_{\epsilon})$, donc:

$$\|V_{\epsilon}\|_{\infty} \leq C d_{\epsilon}^{2\alpha} \frac{1}{\epsilon^2} \left(\frac{\epsilon}{d_{\epsilon}} \right)^{2A}$$

Ceci est la premiere condition.

Pour la deuxieme condition on a aussi un facteur $d_{\epsilon}^{-2\alpha}$, dans w_{ϵ} quand $x \in B_{\epsilon}(a_{\epsilon})$ et aussi, en distinguant le cas $\{x, d_{\epsilon} \geq |x - a_{\epsilon}| \geq d_{\epsilon}/2\}$, dans ce cas, $1 \leq \frac{d_{\epsilon}}{|x - a_{\epsilon}|} \leq 2$ et le cas, $\{x, \epsilon \leq |x - a_{\epsilon}| \leq d_{\epsilon}/2\}$, dans ce cas, $|x| \geq d_{\epsilon}/2$ par l'inegalité triangulaire, car $|a_{\epsilon}| = d_{\epsilon}$. On obtient alors, la condition de borne uniforme de $\int_{\Omega} \frac{e^{u_{\epsilon}}}{|x|^{2\alpha}} dx$,

$$d_{\epsilon}^{-2\alpha} \epsilon^2 \left(\frac{d_{\epsilon}}{\epsilon} \right)^{2A},$$

Qui doit etre constant. Ce qui veut dire que l'exposant de ϵ , dans cette quantité doit etre nul.

Et $d_{\epsilon} = \epsilon^{\beta}$ avec $\beta = \frac{A-1}{A-\alpha}$ convient car $\alpha \in (0, 1)$.

Dans le cas regulier ($\alpha = 0$), si on suppose $0 < a \leq V \leq b$, la premiere condition (sur la fonction nulle) est $b < 1/\pi$. Par les memes arguments que precedemment on a $\lambda \times a \leq \lambda_1 \leq 6$, (pour voir que $\lambda_1 \leq 6$, on utilise la definition de λ_1 comme minimum d'un probleme variationel calculant le quotient pour la fonction explicite $u = 1 - r \in H_0^1$).

Comme $\int_{\Omega} V e^u = 1$, on a $\int_{\Omega} \lambda V e^u = \lambda \leq \frac{6}{a}$ et comme a peut etre choisit arbitrairement inferieur à $b < 1/\pi$, on peut choisit a tel que $\int_{\Omega} \lambda V e^u dx < 24\pi$. Ainsi, on a exhibé dans le cas regulier des suites de volumes bornés et tel que λV borné et positif et $\int_{\Omega} \lambda V e^u < 24\pi$. Comme β_{max} depend de a qui est fixe, β_{max} est fixe et donc par l'injection compacte de Moser-Trudinger, la suite des $\sup_{\Omega} u$ est bornée.

On pouvait prendre les fonctions radiales de la forme $u_i(r) = \log \frac{8c_i^2}{(1+c_i^2 r^2)^2} - \log \frac{8c_i^2}{(1+c_i^2)^2}$, (c_i bornée), nulles au bord et de volume fini et de masse $\leq 8\pi$.

De plus, Brezis et Merle donnent un exemple de suites de volumes bornés et de courbure prescrite positives et bornées et de masses egales a $4\pi A$ avec $A > 1$ quelconque (la masse est definit comme $m = \int_{\Omega} W e^u dx$, avec W la courbure prescrite et u la solution). Donc on peut choisir A de sorte que la masse, m soit $m < 24\pi$, mais $\sup_{\Omega} u \rightarrow +\infty$.

On voit que la condition de borne uniforme sur le volume est vrai dans les deux cas et est necessaire et que pour le deuxieme cas le $\sup_{\Omega} u$ diverge.

De meme que precedemment, comme b peut etre choisit petit, on peut exhiber une suite de volume divergeant dont on connait pas la masse. Par contre en utilisant la suite de fonctions radiales (u_i) ci-dessus avec $c_i \rightarrow +\infty$ on a exemple avec volume divergeant et masse $\leq 8\pi$.

Exemple en dimension 2 pour l'equation avec operateur different du Laplacien: sur une boule unite.

On part de :

$$-\Delta u - \epsilon(x_1 \partial_1 u + x_2 \partial_2 u) = V e^u,$$

Avec condition de Dirichlet. Ici, $\Delta = \partial_{11} + \partial_{22}$.

On utilise les notations du contre exemple de Brezis et Merle.

Le domaine Ω est la boule de rayon 1 et de centre $(1, 0)$.

On considere z_i (par la methode variationnelle), tel que:

$$-\Delta z_i - \epsilon_i x \cdot \nabla z_i = -L_{\epsilon_i}(z_i) = f_{\epsilon_i}.$$

Avec condition de Dirichlet. Par les theoremes de regularite et les injections de Sobolev $z_i \in C^1(\bar{\Omega})$.

On a:

$$\|f_{\epsilon_i}\|_1 = 4\pi A.$$

Par un theoreme de dualite de Stampacchia ou Brezis-Strauss, on a:

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

On resout:

$$-\Delta w_i = \epsilon_i x \cdot \nabla z_i,$$

Avec condition de Dirichlet.

Par les estimations elliptiques, $w_i \in C^1(\bar{\Omega})$ et $w_i \in C^0(\bar{\Omega})$ uniformement.

Par le principe du maximum:

$$z_i - w_i \equiv u_i.$$

avec u_i la fonction du contre exemple de Brezis et Merle.

On ecrit:

$$-\Delta z_i - \epsilon_i x \cdot \nabla z_i = f_{\epsilon_i} = V_i e^{z_i}.$$

Donc, on a:

$$\int_{\Omega} e^{z_i} \leq C_1,$$

Et,

$$0 \leq V_i \leq C_2,$$

Et,

$$z_i(a_i) \geq u_i(a_i) - C_3 \rightarrow +\infty, \quad a_i \rightarrow O.$$

Remarques sur ce type de equations:

1-Comme dans le cas du Laplacien, on peut avoir un exemple avec solutions uniformement bornees, par la methode variationnelle (comme dans le cas avec singularite au bord).

2-On peut ecrire ce probleme dans la boule de rayon 1 ou une ellipse et les deux problemes sont differents. Car si on passe de l'ellipse au cercle par une transformation lineaire $(y_1, y_2) = (x_1/a, x_2/b)$, le laplacien ne se conserve pas. Si on utilise une tranformation conforme par le theoreme de Riemann, le terme $x \cdot \nabla u$ ne se conserve pas. Il y a un probleme dans la formule de Pohozaev quand on cherche a savoir si les solutions sont compactes.

Exemple en dimension 2 pour l'equation avec singularité d'exposant positif: sur une boule unité.

Pour construire un exemple avec volume bornés et courbures positives et uniformément bornées avec singularité au bord d'exposant positif, mais avec sup divergeant, on part du contre exemple de Brezis-Merle (la singularité est $x_0 = 0$ et Ω la boule unité centrée en $(1, 0)$):

$$\Delta u_\epsilon = f_\epsilon,$$

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

On pose alors, $V_\epsilon = |x|^{-2\beta} f_\epsilon e^{-u_\epsilon}$, $\beta \geq 0$. Alors on a:

$$\Delta u_\epsilon = |x|^{2\beta} V_\epsilon e^{u_\epsilon}$$

avec condition de Dirichlet.

On remarque que quand $x \in B_\epsilon(a_\epsilon)$, $|x|$ est de l'ordre de $d_\epsilon = |a_\epsilon|$, car $d_\epsilon = \epsilon^s$ avec $s < 1$. Puis le support de f_ϵ est dans $B_\epsilon(a_\epsilon)$, donc:

$$\|V_\epsilon\|_\infty \leq C d_\epsilon^{-2\beta} \frac{1}{\epsilon^2} \left(\frac{\epsilon}{d_\epsilon}\right)^{2A}$$

Ceci est la premiere condition.

Pour la deuxieme condition on a aussi un facteur $d_\epsilon^{2\beta}$, dans w_ϵ quand $x \in B_\epsilon(a_\epsilon)$ et aussi, en distinguant le cas $\{x, \epsilon \leq |x - a_\epsilon| \leq d_\epsilon\}$ du cas $\{x, |x - a_\epsilon| \geq d_\epsilon\}$. Pour borner $\int_\Omega |x|^{2\beta} e^{u_\epsilon} dx$, il revient de borner:

$$d_\epsilon^{2\beta} \epsilon^2 \left(\frac{d_\epsilon}{\epsilon}\right)^{2A},$$

Qui doit etre constant. Ce qui veut dire que l'exposant de ϵ , dans cette quantité doit etre nul. Et $d_\epsilon = \epsilon^s$ avec $s = \frac{A-1}{A+\beta}$ convient.

Exemple en dimension 2 pour l'equation avec singularité logarithmique: sur une boule unité.

La construction de l'exemple est similaire au cas avec singularités negatives et positives. Le point essentiel est de borner la quantité :

$$-\log(d_\epsilon/d) \times \epsilon^2 \times (d_\epsilon/\epsilon)^{2A}.$$

Ceci revient a resoudre :

$$-\log(d_\epsilon/d) \times d_\epsilon^{2A} = \epsilon^{2(A-1)}.$$

Et de verifier qu'il est plus grand que ϵ . Ici, $d = \text{diam}(\Omega)$. On considere alors la fonction $f(r) = -\log(r/d) \times r^{2A}$.

REFERENCES

- [1] T. Aubin. Some Nonlinear Problems in Riemannian Geometry. Springer-Verlag, 1998.
- [2] C. Bandle. Isoperimetric Inequalities and Applications. Pitman, 1980.
- [3] H. Brezis, L. Nirenberg. Positive solutions of nonlinear elliptic equations involving critical Sobolev exponents. Comm. Pure and Appl. Math. Volume 36, 4, pp 437-477. (1983).
- [4] Davis.M.W. A hyperbolic 4-manifold Proc. Amer. Math. Soc.93 (1985), pp.325-328.
- [5] Dupaigne. Stable Solutions of Elliptic Partial Differential Equations (Monographs and Surveys in Pure and Applied Mathematics). 2011.
- [6] J. Escobar. R. Schoen. Conformal metrics with prescribed scalar curvature. Inventiones mathematicae (1986) 86, page 243-254.
- [7] Gallot. Hulin. Lafontaine. Riemannian Geometry.
- [8] E. Hebey. Introduction a l'analyse non-lineaire sur les varietes. Diderot Editions.
- [9] D. Holzman. Solutions nodales sur les varietes riemanniennes non localement conformement plates a bord. Comment. Math. Helv. 76 (2001), no. 3, 373-387.
- [10] D.Huybrechts. Lecture on K3 surfaces.
- [11] D. Joyce. Constant scalar curvature metrics on connected sums. International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences.(2003), Issue 7, pp 405-450.
- [12] Karp. L, Pinsky. M. The first eigenvalue of a small geodesic ball in a Riemannian manifold. Bull. Sci. Math. (2)111 (1987), no. 2,229-239.
- [13] J. Lafontaine.Introduction a la geometrie Differentielle.2010.

- [14] J.G. Ratcliffe.S.T. Tschantz. On the Davis hyperbolic 4-manifold. Topology and its Applications Volume 111, Issue 3, pp 327-342
- [15] Troyanov. M. Prescribing curvature on compact surfaces with conical singularities. Trans. Amer. Math. Soc. 324 (1991), no. 2, 793-821.

2. OPERATEURS D'ORDRE 2.

1) Inégalités de Harnack pour les solutions, les sur-solutions, les sous-solutions: ces estimations se font à l'aide du procédé d'itération de De Giorgi-Nash-Moser.

2) Existence de solutions: formulation variationnelle et théorèmes du type Lax-Milgram dans les Hilberts.

3) Existence des solutions pour des EDP elliptiques avec operateur Laplacien: Potentiel Newtonien, régularité en se ramenant (par soustraction du postentiel Newtonien) aux fonctions harmoniques qu'on sait regulieres par le Theoreme de Weyl (conditions minimales L^1 , mais la formulation variationelle on sait qu'on a mieux). pour la regularite au bord, on suppose la condition de Dirichlet, alors les fonctions harmoniques (on se ramene a ce cas par soustraction du potentiel Newtonien) sont prolongeables grace à la formule de la moyenne qu'on etend à travers le demi-espace par symetrisation). La regularité C^2 se fait grace a la regularité du noyau Newtonien (se fait par calcul explicite de derivees sous le signe somme), puis par soustraction, on se ramene aux fonctions harmoniques).

4) On dispose des theoremes d'existence et regularite pour le probleme de Dirichlet pour le Laplacien. Pour le cas d'un operateur elliptique d'ordre 2, on utilise la methode de continuité pour prouver l'existence de solutions avec regularite de Schauder. Puis on compare par le principe du maximum dans $W_0^{1,2}$ ces solutions regulieres aux solutions obtenues par la formulation variationelle. Si le coefficient devant le terme lineaire $c \leq 0$, alors le principe du maximum donne l'unicité des solutions, d'où la regularité de Schauder, interieures et sur le bord. Par une alternative de Fredholm on etend au cas ou c non necessairement negatif ou nul.

5) Régularité $W^{2,p}$ d'Agmon, elles sont font par la methode des quotients differentiels, elles sont interieures et au bord pour des fonctions tests $C_c^2(\Omega)$ pour la regularité interieures (au sens des distributions) et pour des fonctions $C_0^2(\Omega)$ (C^2 et nulles au bord) pour la regularité au bord.

Les estimations uniformes $W^{2,p}$ peuvent etre obtenues (en plus de ce que dit Agmon) par le procede de Calderon-Zygmund, qui consiste a obtenir une estimée L^p pour les derivees secondes a partir de celle du noyau Newtonien. C'est une decomposition en n-cubes de Calderon-Zygmund et l'utilisation du theoreme d'interpolation $(L^1, L^2) \rightarrow L^p(1 < p < 2)$ (et par dualité $L^p, p > 2$) de Marcienewicz-Thorin. Puis on ramene l'estimation pour l'operateur L à une estimation pour un operateur à coefficient constant comme le Laplacien par exemple.

Les theoremes d'Agmon et de regularite sont utilises dans la construction des fonctions de Green.

3. FONCTIONS DE GREEN.

Le monograph de Druet-Hebey-Robert est assez clair et precis. On donne quelques explications sur les fonctions de Green et sur le fait que le dernier terme dans la decomposition de cette fonction est de classe C^1 . C'est essentiellement du au fait que le premier terme est donné explicitement et on utilise une recurrence pour prouver que les termes dela decomposition sont Sobolev et continues en dehors de la digaonale. (Ou bien comme dans le monograph de Druet-Hebey-Robert, on fait la difference des fonctions en deux points et on remarque qu'on a des fonctions Lipschitziennes, Notons comme c'est ecrit dans Ambrosio-Fusco-Pallara,pour pouvoir savoir si une fonction est Sobolev, il suffit qu'on ait des derivees directionelles).

Soit (\bar{W}, g) une variété Riemannienne compacte avec ou sans bord. Dans le cas sans bord, on la note (M, g) .

Soit H la fonction definie comme dans le livre d'Aubin. Cette fonction ne depend pas de la fonction rayon d'injectivé dans le cas d'une variété compacte sans bord. Elle depend (à gauche en P) du rayon d'injectivé dans le cas d'une variété à bord. On sait que la fonction rayon d'injectivité est continue sur \bar{W} avec $\delta(P) \leq d(P, \partial W)$, on peut alors la prolonger par 0 sur ∂W . Alors $\delta(P)$ est continue sur \bar{W} .

On pose:

$$\Gamma_1(P, Q) = -\Delta_Q H(P, Q), \quad \Gamma_{i+1}(P, Q) = \int_W \Gamma_i(P, R) \Gamma_1(R, Q) dR.$$

Alors,

$$|\Gamma_1| \leq C[d(P, Q)]^{2-n}.$$

Explicitement et par recurrence les Γ_i sont continues en dehors de la diagonale et pour P ou Q proche du bord, elles sont nulles (conditions au bord). On les prolonge par 0 au bord. Par le theoreme de la convergence dominee de Lebesgue, on prouve qu'elles sont $W^{1,\infty}$ en dehors de la diagonale en Q car elles sont Sobolev est leur derivees bornees. La fonction $d(P, Q) = d_P(Q)$ est reguliere en Q en dehors de P et en fixant Q elle est Lipschitzienne en P , on alors le fait que $(R, Q) \rightarrow \partial_Q d_R(Q)$ est continue en dehors de la diagonale et L_{loc}^∞ . Donc, par le theoreme de convergence dominee (enlever de petites boules) $\Gamma_i * \partial_Q \Gamma_1$ et $\Gamma_i * \partial_Q H$ sont C^0 en dehors de la diagonale. Donc, les Γ_i et $\Gamma_i * H$ sont C^1 en dehors de la diagonale. (Le point essentiel est la fonction distance). (Concernant la fonction distance, $(R_i, Q) \rightarrow d(R_i, Q) = d(R_i, \exp_{R_i}(r\theta))$, $Q = \exp_{R_i}(r\theta)$, $\epsilon_0/2 \leq r \leq \delta(R_i)/3$, $\theta \in \mathbb{S}_{n-1}$ et la carte de reference est $[B(R_0, \delta(R_0)/3), \exp_{R_0}]$ avec $R_i \rightarrow R_0$. On voit alors qu'en coordonnees geodesiques polaires centrees en R_i un calcul de $\Delta_{g,Q} d(R_i, Q) \in L^\infty$ et $d(R_i, \cdot) \rightarrow d(R_0, \cdot)$ et par les estimations elliptiques on a $\partial_Q d(R_i, Q) \rightarrow \partial_Q d(R_0, Q)$ pour $d(R_i, Q) \geq \epsilon_0 > 0$.)

Dans le cas où $W = M$ sans bord:

D'apres sa formule explicite H est C^1 en dehors de la diagonale. Elle est $W^{1,1+\epsilon}$ de chaque variable pour un $\epsilon > 0$ assez petit, par recurrence et par Fubini, Fubini-Tonnelli:

$$\partial_P \Gamma_{i+1}(P, Q) = \int_M \partial_P \Gamma_i(P, R) \Gamma_1(R, Q) dR,$$

et,

$$\partial_Q \Gamma_{i+1}(P, Q) = \int_M \Gamma_i(P, R) \partial_Q \Gamma_1(R, Q) dR.$$

Pour une varieté avec bord, on ne peut pas deriver par rapport P , car l'expression de Γ_i et en particulier de Γ_1 contient δ_P qu'on sait seulement continue et pas forcement differentiable. Dans le cas avec bord, les fonctions Γ_i sont continues en P en dehors de la diagonales et $L^{1+\epsilon}$, $\epsilon > 0$ seulement, mais ceci suffit pour prouver la symetrie par le theoreme d'Agmon)

On a aussi, les estimees de Giraud. Ainsi de proche en proche, les Γ_i deviennent de plus en plus regulieres. on utilise le theoreme de Giraud pour prouver que $\Gamma_k = r^{\lambda-n} * r^{2-n}$ avec $\lambda + 2 > n$ (donc $\geq n + 1$ car λ est entier puisqu'on derive les Γ_i). (Si $\lambda > n - 1$ ($\lambda \geq n$) c'est fini (on regarde Γ_{k-1}), si $\lambda = n - 1$ alors: $\Gamma_k = r^{-1} * r^{2-n}$ et $\partial_P \Gamma_k = r^{-2} * r^{2-n}$ et $\partial_Q \Gamma_k = r^{-1} * r^{1-n}$ qui est en log par Giraud et donc $\partial_P \Gamma_{k+1}$ et $\partial_Q \Gamma_{k+1}$ sont $C^0(M \times M)$ par Giraud et donc Γ_{k+1} est $C^1(M \times M)$. (Utiliser le produit de convolution, car Γ_{k+1} et sa derivee Sobolev sont continues pour ecrire qu'elle est $\int \partial_P$, l'integrale d'une fonction continue donc C^1 , il a convergence uniforme de la convolution, car la fonction et son Sobolev sont continues). Dans le cas avec bord, Γ_k continue implique que Γ_{k+1} est $W^{1,\infty}$ en Q . (On a mieux C^1 en Q car la fonction $(R, Q) \rightarrow \partial_Q d(R, Q)$ est C^0 en dehors de la diagonale de W et H est a support compact (elle s'annule avant le bord) et donc $(\Gamma_k * \partial_Q H)$ est C^0 en dehors de la diagonale de \bar{W})).

Dans le cas d'un operateur $-L = -\Delta + h$, la regularite de Γ_{k+1} depend de celle de h . Si par exemple h est C^1 alors comme precedemment Γ_{k+1} est C^1 de P et Q . Bien sur le Γ_1 change:

$$\Gamma_1(P, Q) = -\Delta_Q H(P, Q) + h(Q)H(P, Q).$$

On peut faire plus, on remarque que par exemple que pour les varietes a bord, la parametrix est solution d'une EDP elliptique en dehors de la singularité, on utilise les theoremes d'Agmon et de regularité dans la construction complete de la fonction de Green dans le cas des varietes a bord, voir le monograph de F.Robert (que je n'ai pas cité ici).

4. PRINCIPE DU MAXIMUM.

4.1. La methode "moving-plane" et "moving-sphere". La methode "moving-plane" consiste à rechercher, si possible, les points de symétrie pour des E.D.P définies sur des domaines ayant des axes de symétries, puis, de caractériser ces solutions. On part de "l'infini", un point très loin, puis, on considère la fonction et son symétrisée par rapport au plan contenant ce point, puis on ramène, le plan jusqu'à l'annulation de la différence entre cette fonction et son symétrisée, si c'est le cas, le plan limite est le plan de symétrie. Ici, on suppose les solutions dans $C^{2,\alpha}$, $\alpha > 0$.

Cette technique de symetrie a été introduite par A.D. Alexandrov.

Notons que certains des auteurs suivants, utilisent les proprietes du au principe du maximum.

L'idee est qu'on doit utiliser les proprietes du principe du maximum.

1-Le principe du maximum lui meme et le lemme de Hopf.

2-Le minimum est atteint sur le bord, (YY.Li-L-Zhang), ils passent d'un operateur du type $L + c$ a un operateur du type L en resolvant un probleme de Dirichlet (ils eliminent c en considerant le produit par une fonction $v > 0$ solution de $Lv = 0$ et $v = 1$ sur le bord) avec Alexandrov-Bekelman-Pucci (quand on fait varier les boules autour du point considéré et les fonctions v) et le principe du maximum de Gidas-Ni-Nirenberg. (Il existe un voisinage du point considéré, assez petit tel que le principe du maximum est vrai, par l'inégalité d'Alexandrov-Bakelman-Pucci. Par le principe du maximum $-v \leq 0$, et par le principe du maximum de Gidas-Ni-Nirenberg $-v < 0$, puis on fait varier les voisinages et les fonctions v qui doivent etre uniformément strictement positives et bornées en réutilisant l'inégalité d'Alexandrov-Bakelman-Pucci en considerant $u_k = v_k - 1$ pour un operateur L_k relatif a la boule $B(0, r)$ via exp_{x_k} , $L_k u_k = c_k$ et $u_k = 0$ sur le bord.).

Exemple 1: Gidas-Ni-Nirenberg.

Sur la boule unité B de \mathbb{R}^n , $n \geq 3$, on considère le problème suivant:

$$\begin{cases} -\Delta u = u^{(n+2)/(n-2)-\epsilon} & \text{dans } B_1(0) \subset \mathbb{R}^n, \\ u > 0 & \text{dans } B_1(0) \\ u = 0 & \text{sur } \partial B_1(0). \end{cases}$$

Où $\epsilon > 0$ est très petit.

Gidas-Ni-Nirenberg: La solution u du problème précédent est radiale et strictement décroissante.

Exemple 2: De Figueiredo-Lions-Nussbaum et Chen-Li, Ma-Wei.

Sur un ouvert regulier en dimension 2, on considere:

$$\begin{cases} -\Delta u = u^q, \quad 1 < q < +\infty & \text{dans } \Omega \subset \mathbb{R}^2, \\ u = 0 & \text{dans } \partial\Omega, \end{cases}$$

Et aussi,

$$\begin{cases} -\Delta u = V e^u, & \text{dans } \Omega \subset \mathbb{R}^2, \\ u = 0 & \text{dans } \partial\Omega, \end{cases}$$

avec,

$$0 \leq V \leq b, \text{ sur } \bar{\Omega},$$

et,

$$|\nabla V| \leq A, \text{ sur } \bar{\Omega}.$$

Pour l'équation avec l'exponentielle, on suppose de plus que:

$$\int_{\Omega} e^u dx \leq C,$$

Alors les solutions sont uniformément bornées sur $\bar{\Omega}$.

Un point essentiel est de borner les solutions au voisinage du bord. Cela se fait par la methode "moving-plane".

Estimations de De Figueiredo-Lions-Nussbaum: ce sont des estimations uniformes au voisinage du bord, on les prouve grace a la méthode moving-plane. C'est essentiellement une transformation de Kelvin, pour rendre le voisinage du bord convexe, et une application du principe du maximum (suivant la direction normale).

Par la methode moving-plane on prouve que les points critiques sont loin du bord, en se placant suivant la normale, apres avoir utiliser la transformee de Kelvin. Voir les articles de Chen-Li et Ma-Wei.

En utilisant la transformee de Kelvin et le principe du maximum, on classe les solutions de l'equation :

Exemple 3: Caffarelli-Gidas-Spruck et Chen-Li.

Caffarelli-Gidas-Spruck. Les solutions de:

$$\begin{cases} -\Delta u = u^{(n+2)/(n-2)}, & u > 0 \text{ dans } \mathbb{R}^n \\ u(0) = 1, \nabla u(0) = 0. \end{cases}$$

Sont:

$$u(x) = (1 + \gamma|x|^2)^{(2-n)/2}, \quad \gamma > 0$$

La preuve de Chen-Li est plus courte et elle utilise les memes arguments que ceux de Caffarelli-Gidas-Spruck, c'est essentiellement une transformation de Kelvin pour avoir un comportement asymptotique et aussi l'utilisation du principe du minimum pour des fonctions regulieres singulieres en un point puis l'argument moving-plane basé sur le principe du maximum.

On presente le resultat de Classification par la methode moving-plane des solutions d'une EDP elliptique nonlineaire en dimension 2:

Chen-Li: pour $K > 0$, les solutions de:

$$\begin{cases} -\Delta u = Ke^u, & \text{dans } \mathbb{R}^2 \\ u(0) = 0, \nabla u(0) = 0, \\ \int_{\mathbb{R}^2} e^u < +\infty. \end{cases}$$

Sont:

$$u(x) = -2 \log(1 + \gamma|x|^2), \quad \gamma = \sqrt{(K/8)}$$

Cette preuve utilise des estimees asymptotiques specifiques a la dimension 2 et le principe du maximum et lemme de Hopf.

Exemple 4: Han.

Si on remplace B par un ouvert régulier quelconque, noté Ω , en maintenant la même équation, les solutions ne sont pas forcément radiales.

$$\begin{cases} -\Delta u = u^{(n+2)/(n-2)-\epsilon} & \text{dans } \Omega \subset \mathbb{R}^n, \\ u > 0 & \text{dans } \Omega \\ u = 0 & \text{sur } \partial\Omega. \end{cases}$$

Où $\epsilon > 0$ est très petit.

Han Il existe un voisinage du bord ω ne dépendant que de la géométrie du domaine Ω et de la dimension n , ainsi qu'une constante $c = c(\Omega, n) > 0$ telle que:

$$\|u\|_{L^\infty(\omega)} \leq c.$$

Où u est la solution du problème précédent.

Exemple 5: Chen-Lin.

En utilisant la méthode moving-plane, Chen et Lin ont prouvé une estimation a priori sur un ouvert Ω de \mathbb{R}^n , $n \geq 3$:

Si u est solution de:

$$-\Delta u = Vu^{(n+2)/(n-2)},$$

avec,

$$0 < a \leq V(x) \leq b < +\infty, \|\nabla V\|_\infty \leq A,$$

$$\|\nabla^\alpha V\| \leq C_\alpha \|\nabla V\|^{\beta(\alpha)}, \text{ avec } \alpha \leq n-2.$$

alors,

$$\sup_K u \times \inf_\Omega u \leq c = c(a, b, A, C_\alpha, n, K, \Omega).$$

La preuve de Chen-Lin consiste a utiliser le principe du maximum et le lemme de Hopf pour prouver que la symetrisee d'une certaine fonction est positive et que la derivee de cette fonction est strictement positive alors que par le raisonnement par l'absurde ("blow-up") cette fonction a maximum local (point critique), ce qui est absurde.

Exemple 6: Brezis-Li-Shafrir.

En dimension 2, la methode "moving-sphere" donne pour les solutions de:

$$-\Delta u = Ve^u,$$

On suppose $0 < a \leq V(x) \leq b < +\infty$ et que V est uniformément Lipschitzienne,

$$\sup_K u + \inf_\Omega u \leq c = c(a, b, \|\nabla V\|_\infty, K, \Omega).$$

Exemple 7: Korevaar-Mazzeo-Pacard-Schoen.

La methode "moving-sphere" donne:

Sur un ouvert Ω de \mathbb{R}^n , $n \geq 3$, on considère l'équation de Yamabe:

$$-\Delta u = u^{(n+2)/(n-2)}, \quad u > 0.$$

Alors: pour tout compact K de Ω , on a:

$$\sup_K u \times \inf_\Omega u \leq c = c(K, n, \Omega).$$

La preuve est basee sur le fait qu'on ne pas pas avoir une certaine condition au bord par le principe du maximum et le lemme de Hopf.

Exemple 8: C.C.Chen-C.S.Lin.

En dimension 2, la technique "blow-up" et une inégalité géométrique sur les courbures intégrales a permis a CC.Chen et CS.Lin de prouver pour l'équation:

$$-\Delta u = Ve^u,$$

avec, $0 < a \leq V(x) \leq b < +\infty$ et que V est uniformément Hölderienne (C^α , $\alpha \in]0, 1]$), que:

$$\sup_K u + \inf_\Omega u \leq c = c(a, b, \alpha, \|V\|_{C^\alpha}, K, \Omega).$$

Ce théorème peut etre prouvé par la methode "moving-sphere" de YY.Li-L.Zhang (point suivant).

Exemple 9: Li-Zhang.

La methode "moving-sphere" donne:

Sur une variété Riemannienne quelconque (M, g) (non nécessairement compacte), de dimension $n \geq 3$ et de courbure scalaire S_g , on considère l'équation de Yamabe:

$$-\Delta_g u + \frac{n-2}{4(n-1)} S_g u = u^{(n+2)/(n-2)}, \quad u > 0.$$

Alors: en dimensions 3, 4, pour tout compact K de M , on a:

$$\sup_K u \times \inf_M u \leq c = c(K, M, g, n = 3 \text{ ou } n = 4).$$

Après avoir utiliser la transformation de Kelvin, Li-Zhang prouvent que la positivite de la fonction obtenue par symetrisation implique la positivite de la fonction limite (obtenue par symetrisation) et dans ce cas elle serait constante, ce qui n'est pas possible par le resultat de Caffarelli-Gidas-Spruck. (La fonction limite est due au "blow-up").

La preuve de Li-Zhang s'adapte en dimension 3 sur un ouvert Ω quand on suppose les courbures prescrites uniformément entre deux constantes positives a, b et s -hölderiennes, $s \in]1/2, 1]$, de constante de Hölder A , on a une inégalité du type:

$$(\sup_K u)^{2s-1} \times \inf_{\Omega} u \leq c = c(a, b, A, s, K, \Omega)$$

4.2. Principe du maximum dans $W_0^{1,1}(\Omega)$. Le principe du maximum dans $W_0^{1,1}(\Omega)$ est basé sur l'inegalite de Kato dont on peut trouver la preuve dans le livre d'Otared Kavian.

Kato: si $u \in L^1(\Omega)$ et $\Delta u \in L^1(\Omega)$, alors on a au sens des distributions:

$$\Delta u^+ \geq \chi_{\{u \geq 0\}} \Delta u.$$

On remarquera qu'en utilisant la fonction $f_\epsilon(t) = \sqrt{(t^2 + \epsilon^2)}$, on prouve que $Trace(|u|) = |Trace(u)|$ et $Trace(u^+) = (Trace(u))^+$ et donc si $u \in W_0^{1,1}$ alors $u^+ \in W_0^{1,1}$ et appliquer a u^+ ce qui est considéré comme le principe de comparaison dans le monograph de Brezis-Marcus-Ponce. (il suffit de consider la fonction $-\Delta \xi = 1$ avec condition de Dirichlet).

Exemple 1: Brezis-Merle.

On considère deux suites de fonctions (u_i, V_i) solutions de:

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

avec,

$$V_i \geq 0, \|V_i\|_{L^p(\Omega)} \leq C_1, \|e^{u_i}\|_{L^{p'}(\Omega)} \leq C_2,$$

avec, $1 < p \leq +\infty$. Alors, on a, ou bien

$$\sup_K |u_i| \leq c = c(K, C_1, C_2, \Omega)$$

ou bien,

$$u_i \rightarrow -\infty, \text{ sur tout compact de } \Omega,$$

ou bien,

Il existe un ensemble fini de points S tel que $u_i \rightarrow -\infty$ uniformément sur tout compact de $\Omega - S$ et $u_i \rightarrow +\infty$ sur S et, au sens faible, on a,

$$V_i e^{u_i} \rightarrow \sum_j \alpha_j \delta_{a_j}, \text{ avec } \alpha_j \geq 4\pi/p', \text{ et } a_j \in S.$$

Comme corollaire de ce résultat, on a:

$$\sup_K u \leq c = c(\inf_{\Omega} V, \|V\|_{L^\infty(\Omega)}, \inf_{\Omega} u, K, \Omega).$$

On a aussi la compacité globale de Chen-Li, cité dans la section 4.1. Le resultat de Chen-Li utilise le fait qu'on a compacité au voisinage du bord lorsque $\|\nabla \log V\| \leq A$, puis il etend ce resultat lorsque $\|\nabla V\| \leq A_1$, pour cela il utilise l'extension des resultats de Brezis-Merle (Theorem 1 de Brezis Merle), qui reste vrai dans des domaines Lipschitzien dès qu'on a la regularité des solutions dans $W_0^{1,2}$, car le principe du maximum est valable dans ce cas (on utilise l'integration par parties, qui est vrai des que la regularité du bord est Lipschitzien. Lipschitz suffit). (et aussi l'extension des fonctions harmoniques et la formule de la moyenne). Voir la preuve du corollaire de l'article de Chen-Li.

REFERENCES

- [1] A.D. Alexandrov. Uniqueness theorems for surfaces in the large. V. *Vestnik Leningrad Univ. Mat. Astronom* 13, 5-8 (1958); *Amer. Math. Soc. Transl.* 21, 412-416 (1962).
- [2] T. Aubin. *Some Nonlinear Problems in Riemannian Geometry*. Springer-Verlag, 1998.
- [3] Ambrosio. L, Fusco. N, Pallara, D. *Functions of Bounded variations and Free discontinuity Problems*, Oxford Press, 2000.
- [4] C. Bandle. *Isoperimetric Inequalities and Applications*. Pitman, 1980.
- [5] Berestycki. H, Nirenberg. L, Varadhan. The principal eigenvalue and maximum principle for second-order elliptic operators in general domains. *Comm. Pure Appl. Math.* 47 (1994), no. 1, 47-92
- [6] L. Boccardo, T. Gallouet. Nonlinear elliptic and parabolic equations involving measure data. *J. Funct. Anal.* 87 no 1, (1989), 149-169.
- [7] H. Brezis. *Analyse Fonctionnelle et Applications*. 1983.
- [8] Brezis. H, Marcus. M, Ponce. A. C. 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.
- [9] H. Brezis, F. Merle. Uniform estimates and Blow-up behavior for solutions of $-\Delta u = V(x)e^u$ in two dimension. *Commun. in Partial Differential Equations*, 16 (8 and 9), 1223-1253(1991).
- [10] H. Brezis, W. A. Strauss. Semi-linear second-order elliptic equations in L^1 . *J. Math. Soc. Japan* 25 (1973), 565-590.
- [11] H. Brezis, YY. Li, I. Shafirir. A sup+inf inequality for some nonlinear elliptic equations involving exponential nonlinearities. *J.Funct.Anal.* 115 (1993) 344-358.
- [12] L. Caffarelli, B. Gidas, J. Spruck. Asymptotic symmetry and local behavior of semilinear elliptic equations with critical Sobolev growth. *Comm. Pure Appl. Math.* 37 (1984) 369-402.
- [13] Chen. W, Li, C. Classification of solutions of some nonlinear elliptic equations. *Duke Math. J.* 63 (1991), no. 3, 615-622.
- [14] W. Chen, C. Li. A priori Estimates for solutions to Nonlinear Elliptic Equations. *Arch. Rational. Mech. Anal.* 122 (1993) 145-157.
- [15] C-C. Chen, C-S. Lin. Local behavior of singular positive solutions of semilinear elliptic equations with Sobolev exponent. *Duke Math. J.* 78 (1995), no. 2, 315-334.
- [16] C-C.Chen, C-S. Lin. Estimates of the conformal scalar curvature equation via the method of moving planes. *Comm. Pure Appl. Math.* L(1997) 0971-1017.
- [17] C-C. Chen, C-S. Lin. A sharp sup+inf inequality for a nonlinear elliptic equation in \mathbb{R}^2 . *Commun. Anal. Geom.* 6, No.1, 1-19 (1998).
- [18] de Figueiredo, D. G, Lions, P.-L, Nussbaum, R. D. A priori estimates and existence of positive solutions of semilinear elliptic equations. *J. Math. Pures Appl.* (9) 61 (1982), no. 1, 41-63.
- [19] O. Druet, E. Hebey, F.Robert, *Blow-up theory in Riemannian Geometry*, Princeton University Press 2004.
- [20] B. Gidas, W-M. Ni, L. Nirenberg. *Symmetry and Related Properties via the Maximum Principle*. *Commun. Math. Phys.* 68, 209-243 (1979).
- [21] D. Gilbarg, N.S. Trudinger. *Elliptic Partial Differential Equations of Second order*, Berlin Springer-Verlag, Second edition, Grundlehern Math. Wiss.,224, 1983.
- [22] Han Z-C. Asymptotic approach to singular solutions for nonlinear elliptic equations involving critical Sobolev exponent. *Ann. Inst. Henri Poincaré. Analyse non lineaire* 8 (1991) 159-174.
- [23] E. Hebey, *Analyse non lineaire sur les Variétés*, Editions Diderot.
- [24] O. Kavian. *Introduction à la Théorie des points critiques*. Springer-Verlag, 1993.
- [25] N. Korevaar, F. Pacard, R. Mazzeo, R. Schoen. Refined asymptotics for constant scalar curvature metrics with isolated singularities. *Invent. Math.* 135 (1999), no. 2, 233-272.
- [26] YY. Li. Harnack Type Inequality: the Method of Moving Planes. *Commun. Math. Phys.* 200,421-444 (1999).
- [27] YY. Li, L. Zhang. A Harnack type inequality for the Yamabe equation in low dimensions. *Calc. Var. Partial Differential Equations* 20 (2004), no. 2, 133-151.
- [28] L. Ma, J-C. Wei. Convergence for a Liouville equation. *Comment. Math. Helv.* 76 (2001) 506-514.
- [29] J. Serrin, A symmetry problem in potential theory, *Arch. Rational Mech. Anal.* 43 (1971), 304-318.

EQUIPED' ANALYSE COMPLEXE ET GEOMETRIE, UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, 75005, PARIS, FRANCE.