



**HAL**  
open science

## Cohomologie $L^2$ des variétés QALE

Gilles Carron

► **To cite this version:**

| Gilles Carron. Cohomologie  $L^2$  des variétés QALE. 2005. hal-00003936v1

**HAL Id: hal-00003936**

**<https://hal.science/hal-00003936v1>**

Preprint submitted on 19 Jan 2005 (v1), last revised 21 Nov 2005 (v3)

**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.

# COHOMOLOGIE $L^2$ DES VARIÉTÉS QALE

GILLES CARRON

RÉSUMÉ. Nous donnons une interprétation topologique des espaces de formes harmoniques  $L^2$  de certaines des variétés QALE introduites par D. Joyce. Nous introduisons pour cela un critère analytique qui nous permet d'utiliser des bouts de suites exactes de Mayer-Vietoris.

## 1. INTRODUCTION

Sur une variété riemannienne compacte, le célèbre théorème de Hodge et de Rham identifie les espaces de formes harmoniques  $L^2$  aux groupes de cohomologie réels de la variété. Lorsque  $(X, g)$  est une variété complète et non compacte, ses espaces de formes harmoniques  $L^2$

$$\mathcal{H}^k(X) = \{\alpha \in L^2(\Lambda^k T^* X), d\alpha = d^* \alpha = 0\}$$

peuvent être identifiés aux espaces de  $L^2$  cohomologie réduite :

$$\mathcal{H}^k(X) \simeq \mathbb{H}^k(X) = \{\alpha \in L^2(\Lambda^k T^* X), d\alpha = 0\} / \overline{\{d\alpha, \alpha \in L^2(\Lambda^{k-1} T^* X), d\alpha \in L^2\}}$$

où l'adhérence est prise pour la topologie  $L^2$ . Cependant cette cohomologie  $L^2$  réduite n'est pas en général pratique à calculer, car elle ne vérifie pas les suites exactes de Mayer-Vietoris. La cohomologie  $L^2$  non réduite définie par

$${}^{nr}\mathbb{H}^k(X) = \{\alpha \in L^2(\Lambda^k T^* X), d\alpha = 0\} / \{d\alpha, \alpha \in L^2(\Lambda^{k-1} T^* X), d\alpha \in L^2\}$$

peut se calculer à l'aide de suites exactes de Mayer Vietoris, cependant ces espaces ne coïncident que lorsque l'image de  $d$  est fermée et dans le cas contraire les espaces de cohomologie  $L^2$  non réduite sont de dimension infinie : ils ne permettent pas de récupérer la cohomologie  $L^2$  réduite.

De nombreux travaux donnent une interprétation topologique de ces espaces de cohomologie  $L^2$  réduite en fonction de la topologie et de la géométrie à l'infini. Par exemple, dans [1], M. Atiyah, V. Patodi et I. Singer calculent la cohomologie  $L^2$  réduite des variétés à bouts cylindriques, les travaux de A. Borel, B. Casselman, E. Looijenga, L. Saper, M. Stern et S. Zucker ont permis d'identifier la cohomologie  $L^2$  des variétés hermitiennes localement symétriques <sup>1</sup> à la cohomologie d'intersection de leurs compactifications de Borel-Serre-Satake ([3, 4, 24, 35, 40, 41]), les variétés à courbure négative ou asymptotiquement nulle ont aussi fait l'objet de nombreux travaux ([25, 27, 29, 39, 9]).

Récemment, A. Sen a utilisé une dualité issue de la M-théorie pour prédire l'existence de formes harmoniques  $L^2$  sur l'espace réduit des monopoles de charges  $k$

---

*Date:* 18 janvier 2005.

1991 *Mathematics Subject Classification.* Primary 58A14 ; Secondary 58J10.

*Key words and phrases.*  $L^2$  cohomology, crepant resolution.

<sup>1</sup>dans ce cas l'image de  $d$  est fermée et cohomologie  $L^2$  réduite et non réduite coïncident.

sur  $\mathbb{R}^3$  ([37]). Grâce à des arguments également issus de la physique théorique, il existe aujourd'hui de nombreuses prédictions concernant les espaces de formes harmoniques  $L^2$  sur certaines variétés riemanniennes complètes à holonomie exceptionnelle. Dans un papier remarquable, N. Hitchin montre qu'une variété hyperkählérienne complète de dimension réelle  $4d$  obtenue par réduction hyperkählérienne de  $\mathbb{R}^{4n}$  ne peut porter de formes harmoniques  $L^2$  qu'en degré  $2d$  [16]; pour cela il utilise une amélioration due à J.Jost et K.Zuo ([21]) d'un résultat de M. Gromov ([14] cf. aussi [6, 26]). N. Hitchin détermine aussi les formes harmoniques  $L^2$  de certaines de ces variétés dont l'espace réduit des monopoles de charge 2 et il vérifie dans ce cas les prédictions de A.Sen. En fait les travaux de G. Segal et A. Selby montrent les prédictions de Sen équivalent à démontrer que pour ces variétés la cohomologie  $L^2$  réduite est isomorphe à l'image de la cohomologie à support compact dans la cohomologie absolue ([36]). Un travail fondamental de T. Hausel, E. Hunsicker, R. Mazzeo interprète les espaces de cohomologie  $L^2$  réduite des variétés dont la géométrie à l'infini est de type "fibred boundary" (à bord fibré) ou "fibred cusp" (à pointe fibré) en terme de cohomologie d'intersection de la compactification obtenue en écrasant les fibres de la fibration à l'infini ([15]). Ces géométries introduites par R. Mazzeo et R. Melrose modélisent les variétés localement symétrique de  $\mathbb{Q}$ -rang 1 et certaines géométries (ALE, ALF, ALG) des variétés à holonomie exceptionnelle ([28]) et ce travail leurs permet de confirmer ou d'infirmer certaines des prédictions issues de physique théorique (cf. la septième partie de [15] pour plus de précisions).

L'objet de ce travail est la classe de variétés à holonomie  $SU(n)$  ou  $Sp(n/2)$  construite par D. Joyce (théorème 9.3.3 de [22]) :

**Théorème A.** *Soit  $G \subset SU(n)$  un sous groupe fini et  $X \xrightarrow{\pi} \mathbb{C}^n/G$  une résolution crépante de  $\mathbb{C}^n/G$  si  $X$  porte une métrique kählérienne QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  alors elle porte aussi une métrique Kähler-Einstein plate ; de plus si  $G \subset Sp(n/2)$  alors cette métrique est hyperkählérienne.*

Nous ne donnons pas la définition de résolution crépante (cf. [22] page 126 par exemple), nous signalons uniquement qu'une telle résolution n'existe pas toujours. Nous dirons plus loin deux mots sur la géométrie des variétés QALE (Quasi-Asymptotiquement Localement Euclidienne). Certaines de ces résolutions comme les schémas de Hilbert sur  $\mathbb{C}^2$  sont aussi connues sous le nom d'espace des instantons non commutatifs ([33, 32]). Notre résultat principal est le suivant :

**Théorème B.** *Soit  $G \subset SU(n)$  un sous groupe fini, on suppose que  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  le quotient de la sphère par  $G$  soit à singularités isolées. Si  $X \xrightarrow{\pi} \mathbb{C}^n/G$  une résolution crépante de  $\mathbb{C}^n/G$  équipée d'une métrique QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  alors*

$$\mathbb{H}^k(X) \simeq \text{Im} ( H_c^k(X) \rightarrow H^k(X) ) .$$

Les travaux de Y. Ito et M. Reid, V. Batyrev, J. Denef et F. Loeser permettent de décrire la cohomologie usuelle de  $X$  à l'aide des classes de conjugaison de  $G$  ([20, 2, 13]). Notons  $\mathcal{C}(G)$  l'ensemble des classes de conjugaison de  $G$ , en corollaire de ce théorème nous obtenons :

**Corollaire 1.1.** *Soit  $G \subset SU(3)$  ou  $G \subset Sp(2)$  un sous groupe fini et  $X \xrightarrow{\pi} \mathbb{C}^n/G$  une résolution crépante de  $\mathbb{C}^n/G$  équipée d'une métrique QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$ ,*

alors :

$$\begin{aligned}\chi_{L^2}(X) &= \sum_{k=0}^{2n} (-1)^k \dim \mathbb{H}^k(X) = \sum_{l=0}^n \dim \mathbb{H}^{2l}(X) \\ &= \text{card} \{ [g] \in \mathcal{C}(G), \ker(g - \text{Id}) = \{0\} \}.\end{aligned}$$

En particulier, nous démontrons que l'espace des formes harmoniques  $L^2$  de  $\text{Hilb}^3(\mathbb{C}^2)$  est de dimension 1 et qu'il est formé de formes de degré 4. Notre théorème répond par l'affirmative à une question de E. Hunsicker. Lorsque  $G$  agit sans point fixe sur  $\mathbb{S}^{2n-1}$  alors  $X$  est une variété ALE : au dehors de  $\pi^{-1}\{0\}$ ,  $X$  est quasi isométrique au bout de cône  $\{z \in \mathbb{C}^n, \|z\| \geq 1\}/G$  et dans ce cas ce théorème est déjà connu ([31, 7]).

Décrivons rapidement la géométrie à l'infini des variétés QALE considérées ici : nous supposons donc que  $G \subset \text{SU}(n)$  soit un sous groupe fini et que  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  soit à singularités isolées. Notons  $S \subset \mathbb{S}^{2n-1}/G$  ce lieu singulier ; c'est le quotient par  $G$  d'une réunion de sphères. Si  $(X, g)$  est une variété QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  alors au dehors d'un compact  $K \subset X$ ,

$$X \setminus K = \cup_{i=0}^l E_i$$

où  $E_0$  est quasi-isométrique à un bout cône sur  $\mathbb{S}^{2n-1}/G \setminus S^\varepsilon$  où  $S^\varepsilon$  est un  $\varepsilon$  voisinage de  $S \subset \mathbb{S}^{2n-1}/G$  et chaque  $E_i$  a un revêtement fini quasi isométrique à

$$\{(y, v) \in Y_i \times V_i, 1 \leq \|v\| \leq 2\varepsilon \|\pi_i(y)\|\}$$

où  $V_i \subset \mathbb{C}^n$  est un sous espace vectoriel,  $A_i = \{g \in G, g|_{V_i} = \text{Id}\} \neq \{\text{Id}\}$  et  $\pi_i : Y_i \rightarrow V_i^\perp/A_i$  est une résolution de  $V_i^\perp/A_i$  équipée d'une métrique ALE asymptote à  $V_i^\perp/A_i$ .

L'outil important introduit ici est une suite de Mayer-Vietoris entre cohomologie  $L^2$  à poids réduite. Pour alléger les discours on introduit la définition suivante :

Soit  $(X, g)$  une variété riemannienne (non nécessairement complète) et  $\mu, w$  des fonctions strictement positives (lisses) sur  $X$ , on suppose de plus que  $w$  est bornée. On peut définir la cohomologie à poids :

$$\mathbb{H}_\mu^k(X) = \{\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X), d\alpha = 0\} / \overline{\{d\alpha, \alpha \in L_\mu^2(\Lambda^{k-1} T^* X), d\alpha \in L_\mu^2\}}$$

où l'adhérence est prise pour la topologie  $L_\mu^2$  associée à la mesure  $\mu d \text{vol}_g$ . On note aussi  $\mathcal{D}_\mu^{k-1}(d) = \{d\alpha, \alpha \in L_\mu^2(\Lambda^{k-1} T^* X), d\alpha \in L_\mu^2\}$  le domaine de  $d$ .

*Définition 1.2.* On dira que l'image de  $d : \mathcal{D}_\mu^{k-1}(d) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  est **presque fermée** (en degré  $k$  et par rapport à  $w$ ) si lorsqu'on introduit l'espace

$$\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) = \{\alpha \in L_{w\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X), d\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)\}$$

alors l'image de  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  est fermée et son image est exactement  $\overline{\{d\alpha, \alpha \in L_\mu^2(\Lambda^{k-1} T^* X), d\alpha \in L_\mu^2\}}$ .

Cette notion de "presque fermeture" de l'image de  $d$  est très pratique car elle permet d'obtenir des suites de Mayer-Vietoris :

**Théorème C.** *Si  $X = U \cup V$ , on suppose que l'image de  $d$  est presque fermée (en degré  $k$  et par rapport à  $w$ ) sur  $X, U, V$  et  $U \cap V$  et que*

$$\{0\} \rightarrow \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \xrightarrow{r^*} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V) \xrightarrow{\delta} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U \cap V) \rightarrow \{0\}$$

alors la suite exacte courte suivante est vérifiée :

$$\mathbb{H}_{w\mu}^k(U) \oplus \mathbb{H}_{w\mu}^k(V) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}_{w\mu}^k(U \cap V) \xrightarrow{b} \mathbb{H}_\mu^k(X) \xrightarrow{r^*} \mathbb{H}_\mu^k(U) \oplus \mathbb{H}_\mu^k(V) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}_\mu^k(U \cap V).$$

Cette suite exacte permet en principe de déterminer  $\mathbb{H}_\mu^k(X)$  lorsqu'on connaît les autres espaces et les différentes flèches de cette suite exacte.

Grâce à un résultat de L. Hörmander ([17]) et à nos précédents travaux sur la non parabolicité à l'infini, nous obtiendrons :

**Théorème D.** *Soit  $(X, g)$  une variété riemannienne complète et  $w$  une fonction strictement positive lisse bornée sur  $X$  (vérifiant 3.2), nous notons  $d_w^* = w^{-1}d^*$  l'adjoint formel de l'opérateur  $d : L_w^2(\Lambda^{k-1}T^*X) \rightarrow L_w^2(\Lambda^kT^*X)$  alors il existe un compact  $K \subset X$  telle que*

$$\forall \varphi \in C_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*(X \setminus K)), \|\varphi\|_{L_w^2} \leq C [\|d_w^*\varphi\|_{L^2} + \|d\varphi\|_{L^2}]$$

si et seulement si les images de  $d : C_{w,w}^{k-2}(X) \rightarrow L_w^2(\Lambda^{k-1}T^*X)$  et de  $d : C_{w,1}^{k-1}(X) \rightarrow L^2(\Lambda^kT^*X)$  sont fermées et si  $\dim \mathbb{H}_w^{k-1}(X) < \infty$ .

Ceci est à rapprocher de la définition que nous avons introduite dans [8] et utilisée dans [9] pour déterminer la cohomologie  $L^2$  réduite des variétés plates au dehors d'un compact :

*Définition 1.3.* Soit  $(X, g)$  une variété riemannienne complète, on dit que l'opérateur  $d + d^*$  est non parabolique à l'infini s'il existe un compact  $K \subset X$  tel que pour tout ouvert borné  $U$  de  $X \setminus K$ , il existe une constante  $C > 0$  telle que

$$\forall \varphi \in C_0^\infty(\Lambda^\bullet T^*(X \setminus K)), C \|\varphi\|_{L^2(U)} \leq \|(d + d^*)\varphi\|.$$

Décrivons maintenant l'organisation de ce papier : dans une première partie, on rappelle les définitions des espaces de cohomologie  $L^2$  à poids, dans une deuxième partie nous décrivons notre critère de presque fermeture de l'image de  $d$  et nous y donnons des conditions pour que l'image de  $d$  soit presque fermée sur  $U \cup V$  lorsqu'elle l'est sur  $U, V$  et  $U \cap V$  et pour qu'elle soit presque fermée sur  $U$  lorsqu'elle est sur  $U \cup V$  et  $U \cap V$ . On comparera aussi cette condition à la non parabolicité à l'infini et nous montrerons le théorème D. On calcule ensuite la cohomologie  $L^2$  réduite des cônes et à titre d'illustration nous reprouvons un résultat de R. Melrose ([31]) à propos de la cohomologie  $L^2$  des variétés à bouts coniques. On décrit ensuite la géométrie des variétés QALE. Enfin dans la dernière partie nous prouverons notre résultat principal, en fait notre méthode permet aussi de déterminer la cohomologie  $L^2$  des variétés QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  (où  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  est à singularités isolées) et pas seulement des résolutions crépantes. La description de ces variétés faite plus haut implique qu'il y a un compact  $K$  sur lequel la variété  $X$  se rétracte. Et le bord de  $K$  est une résolution de  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$ . Les singularités de  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  sont de la forme  $(\mathbb{C}^{m_i}/A_i \times \mathbb{S}^{2n_i-1})/B_i$  où  $A_i \subset \text{SU}(m_i)$  agit sans points fixes sur  $\mathbb{C}^{m_i} \setminus \{0\}$ ,  $B_i$  agit sans point fixe sur  $\mathbb{C}^{m_i}/A_i \setminus \{0\}$  et sur  $\mathbb{S}^{2n_i-1}$ ; ces singularités sont résolus par  $(Y_i \times \mathbb{S}^{2n_i-1})/B_i$ . Notons  $Y = \cup_i Y_i/B_i$ , on dispose d'une application  $f : Y \rightarrow \partial K$ , on peut considérer le sous complexe de  $C^\infty(\Lambda^k T^*K)$  formé par les formes différentielles dont le tiré en arrière par  $f$  est nulle et on note  $H^*(K, \ker f^*)$  la cohomologie de ce complexe : un cas particulier de notre résultat est le suivant

**Théorème E.** *Soit  $G \subset \mathrm{SU}(n)$  et  $(X, g)$  une variété QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  on suppose que  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  est à singularités isolées et que la dimension réelle de ces singularités est plus grande ou égale à trois alors*

$$\mathbb{H}^k(X) \simeq \begin{cases} H^k(K, \partial K) \simeq H_c^k(X) & \text{si } k \leq 2 \\ H^k(K, \ker f^*) & \text{si } k \in [3, 2n-2] \\ H^k(K) \simeq H^k(X) & \text{si } k \geq 2n-2 \end{cases}$$

*Remerciements.* Je tiens à remercier C. Sorger pour avoir répondu patiemment à mes questions naïves sur la cohomologie des résolutions crépantes. Je remercie aussi T. Hausel, E. Hunsicker et R. Mazzeo et l' A.I.M. pour avoir organisé et accueilli la conférence "  $L^2$  Harmonic Forms in Geometry and Physics " au cours de laquelle cette question a été soulevée. Ce travail a débuté alors que je bénéficiais d'une délégation partielle au C.N.R.S.

## 2. $L^2$ COHOMOLOGIE (À POIDS).

Nous présentons ici les espaces de cohomologie  $L^2$ , on trouvera d'autres présentations dans les articles de J.Cheeger, S. Zucker, J. Lott ([11, 40, 25] et de façon plus abstraite dans le papier de J. Brüning et M. Lesch ([5]) .

Si  $(X, g, \mu)$  est une variété riemannienne équipée d'une mesure lisse  $\mu(x)d \mathrm{vol}_g(x)$  (ou même seulement dans  $L_{loc}^\infty$ ), on introduit l'espace  $L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  des formes différentielles qui sont de carré sommables pour cette mesure, la norme de cet espace de Hilbert est :

$$\|\alpha\|_\mu^2 = \int_X |\alpha|^2 \mu d \mathrm{vol}.$$

On note  $\langle \cdot, \cdot \rangle_\mu$  le produit scalaire associé.

L'espace des  $k$ -formes  $L_\mu^2$  fermées est l'espace  $Z_\mu^k(X)$  des formes  $\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  qui sont fermées au sens des distributions, i.e. celle qui vérifie :

$$\forall \beta \in C_0^\infty(\Lambda^{k+1} T^* X), \langle \alpha, d_\mu^* \beta \rangle_\mu = 0.$$

Où  $d_\mu^*$  est l'adjoint différentiel formel de l'opérateur

$$d : C_0^\infty(\Lambda^k T^* X) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^{k+1} T^* X) ;$$

si la variété  $X$  est orientée et si  $*$  est l'opérateur de Hodge on a

$$d_\mu^* = \pm \mu^{-1} * d * \mu$$

le signe étant fonction du degré. Lorsque  $\mu = 1$ , on ne mentionnera pas la référence à la fonction  $\mu$  : on notera  $L_1^2 = L^2$ ,  $d^* = d_1^*$ ... Le domaine (maximal) de  $d$  est

$$\mathcal{D}_\mu^k(d) = \{\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X), d\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^{k+1} T^* X)\}.$$

C'est à dire  $\alpha \in \mathcal{D}_\mu^k(d)$  si et seulement si  $\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  et s'il y a une constante  $C$  tel que

$$\forall \varphi \in C_0^\infty(\Lambda^{k+1} T^* X), |\langle \alpha, d_\mu^* \varphi \rangle_\mu| \leq C \|\varphi\|_\mu.$$

Maintenant on fait l'hypothèse suivante :

(2.1)

La variété  $X$  est l'intérieur d'une variété à coins  $\bar{X}$  et la métrique  $g$  et le poids  $\mu$  s'étendent à  $\bar{X}$  et  $\bar{X}$  est complet pour la distance géodésique.

On note alors  $C_0^\infty(\Lambda^k T^* X)$  l'espace des formes différentielles lisses et à support compacte dans  $X$  et  $C_0^\infty(\Lambda^k T^* \bar{X})$  l'espace des formes différentielles lisses et à support compacte dans  $\bar{X}$  c'est à dire celle dont le support est borné dans  $(X, g)$ . Avec cette hypothèse,  $C_0^\infty(\Lambda^k T^* \bar{X})$  est dense dans  $\mathcal{D}_\mu^k(d)$  lorsque ce dernier espace est équipé de la norme

$$\alpha \mapsto \|\alpha\|_\mu + \|d\alpha\|_\mu.$$

La  $L_\mu^2$ -cohomologie non réduite de  $(X, g, \mu)$  est définie par

$${}^{nr}\mathbb{H}_\mu^k(X) = Z_\mu^k(X)/d\mathcal{D}_\mu^{k-1}(d).$$

La  $L^2$  cohomologie non réduite est la cohomologie d'un complexe mais lorsque l'image de  $d$  n'est pas fermée ce n'est pas un espace de Hilbert, c'est pourquoi on introduit la  $L_\mu^2$ -cohomologie réduite :

$$\mathbb{H}_\mu^k(X) = Z_\mu^k(X)/\overline{d\mathcal{D}_\mu^{k-1}(d)} = Z_\mu^k(X)/\overline{dC_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*\bar{X})}.$$

On notera  $B_\mu^k(X) = \overline{dC_0^\infty(\Lambda^k T^* \bar{X})}$  où l'adhérence est pris dans  $L_\mu^2$ . Évidemment lorsque l'image de  $d : \mathcal{D}_\mu^{k-1}(d) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  est fermée ces deux espaces coïncident. L'objet de cet article est la cohomologie  $L^2$  réduite, pour alléger le discours on omettra de signaler l'adjectif réduite.

La cohomologie  $L_\mu^2$  se représente par des espaces de formes harmoniques. On introduit le domaine de  $d_\mu^*$ , ou plus exactement de l'adjoint de  $d : \mathcal{D}_\mu^{k-1}(d) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  : lorsque  $\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  alors  $\alpha \in \mathcal{D}^k(d_\mu^*)$  si et seulement s'il y a une constante  $C$  telle que

$$\forall \varphi \in C_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*\bar{X}), \quad |\langle \alpha, d\varphi \rangle_\mu| \leq C\|\varphi\|_\mu.$$

Lorsque  $\alpha \in C_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*\bar{X})$  alors  $\alpha \in \mathcal{D}(d_\mu^*)$  si et seulement si le long de la partie lisse du bord de  $\bar{X}$ ,  $\alpha$  n'a pas de composante tangentielle. Lorsque  $\mathcal{D}^k(d_\mu^*)$  est équipée de la norme du graphe

$$\alpha \mapsto \|\alpha\|_\mu + \|d_\mu^* \alpha\|_\mu$$

alors  $C_0^\infty(\Lambda^k T^* X)$  est dense dans  $\mathcal{D}^k(d_\mu^*)$ . On introduit donc :

$$\mathcal{H}_\mu^k(X) = \{\alpha \in Z_\mu^k(\Lambda^k T^* X), \alpha \in \mathcal{D}(d_\mu^*) \text{ et } d_\mu^* \alpha = 0\}.$$

La décomposition de Hodge-deRham nous apprend que :

$$\begin{aligned} L_\mu^2(\Lambda^k T^* X) &= \mathcal{H}_\mu^k(X) \oplus B_\mu^k(\Lambda^k T^* X) \oplus \overline{d_\mu^* \mathcal{D}^{k+1}(d_\mu^*)} \\ &= \mathcal{H}_\mu^k(X) \oplus \overline{dC_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*\bar{X})} \oplus \overline{d_\mu^* C_0^\infty(\Lambda^{k+1}T^*\bar{X})} \end{aligned}$$

l'adhérence étant bien entendu prise pour la topologie de  $L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  et on sait de plus que

$$Z_\mu^k(X) = \mathcal{H}_\mu^k(X) \oplus B_\mu^k(\Lambda^k T^* X).$$

Donc on en déduit l'isomorphisme :

$$\mathbb{H}_\mu^k(X) \simeq \mathcal{H}_\mu^k(X).$$

On peut aussi définir la  $L_\mu^2$  cohomologie relative (à  $\partial\bar{X}$  ou à  $Y \subset \partial\bar{X}$  une hypersurface de  $\bar{X}$ ) en considérant l'espace  $\mathcal{D}_\mu^k(d, Y)$  des formes  $\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  pour lesquelles il existe une constante  $C$  telle que

$$\forall \varphi \in C_0^\infty(\Lambda^{k+1}T^*(X \cup Y)), \quad |\langle \alpha, d_\mu^* \varphi \rangle_\mu| \leq C\|\varphi\|_\mu.$$

On définit alors

$$Z_\mu^k(X, Y) = \{ \alpha \in \mathcal{D}_\mu^k(d, Y), d\alpha = 0 \}$$

et

$$B_\mu^k(X, Y) = \overline{d\mathcal{D}^{k-1}(d, Y)}.$$

$$\mathbb{H}_\mu^k(X, Y) = Z_\mu^k(X, Y) / B_\mu^k(X, Y).$$

Ces espaces admettent aussi une interprétation en terme de formes harmoniques : on introduit donc l'espace  $\mathcal{D}_\mu^k(d_\mu^*, Y)$  des formes  $\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  pour lesquelles il existe une constante  $C$  telle que,

$$\forall \varphi \in C_0^\infty(\Lambda^{k+1} T^*(\bar{X} \cup Y)), \quad | \langle \alpha, d\varphi \rangle_\mu | \leq C \|\varphi\|_\mu.$$

Si on définit

$$\mathcal{H}^k(X, Y) = \{ \alpha \in Z_\mu^k(X, Y) \cap \mathcal{D}_\mu^k(d_\mu^*, Y), d_\mu^* \alpha = 0 \}$$

alors nous avons l'isomorphisme

$$H_\mu^k(X, Y) \simeq \mathcal{H}_\mu^k(X, Y).$$

Lorsque  $X$  est orientée<sup>2</sup>, grâce à l'opérateur  $*$  de Hodge on a un isomorphisme :

$$H_\mu^k(X) \simeq H_{\mu-1}^{n-k}(X, \partial X).$$

On peut aussi introduire comme implicitement L. Hörmander [17, 18] et plus explicitement N. Teleman [38] la  $L_{loc}^2$ -cohomologie. C'est la cohomologie du complexe des formes différentielles qui sont dans  $L_{loc}^2$  ainsi que leur différentielle. Selon la proposition 3.3 [38], la cohomologie de ce complexe calcule la cohomologie de  $X$  (la cohomologie de de Rham). La dualité de Poincaré dit que la cohomologie de  $X$  est isomorphe au dual de la cohomologie à support compact, en particulier il n'y a pas lieu de distinguer la  $L_{loc}^2$  cohomologie réduite ou non réduite car l'image de  $d$  est fermée sur  $L_{loc}^2$ . En effet, une forme fermée  $L_{loc}^2$  nulle en cohomologie  $L_{loc}^2$  réduite est exacte en restriction à chaque domaine compact à bord lisse de  $X$ , elle définit donc une forme linéaire nulle sur la cohomologie à support compact, elle est donc exacte en cohomologie  $L_{loc}^2$ .

En particulier lorsque  $\bar{X}$  est compacte alors la  $L_\mu^2$  cohomologie (qui est évidemment isomorphe à la  $L_{loc}^2$  cohomologie) est isomorphe à la cohomologie de  $X$ . Aussi une forme fermée de  $L_\mu^2$  nulle en cohomologie  $L_\mu^2$  réduite est nulle en cohomologie  $L_{loc}^2$  en particulier elle est la différentielle d'une forme dans  $L_{loc}^2$ .

### 3. LA CONDITION DE PRESQUE-FERMETURE DE L'IMAGE DE $d$ ET LA SUITE DE MAYER-VIETORIS

On introduit maintenant une condition qui permet d'obtenir un petit bout de suite exacte de Mayer-Vietoris.

---

<sup>2</sup>Lorsque  $X$  n'est pas orientée, un résultat analogue est valide en considérant les formes à valeurs dans le fibré d'orientation.



**3.1. Définition.** On considère donc  $(X, g, \mu)$  une variété riemannienne équipée de la mesure  $\mu(x)d \text{vol}_g$  et  $w : X \rightarrow ]0, \infty[$  une fonction lisse bornée, on dira que

*l'image de  $d : \mathcal{D}_\mu^{k-1}(d) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  est presque fermée (en degré  $k$  et par rapport à  $w$ ) si lorsqu'on introduit l'espace*

$$\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) = \{\alpha \in L_{w\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X), d\alpha \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)\}$$

$$\text{alors } B_\mu^k(X) = d\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X).$$

Lorsque  $(X, g, \mu)$  vérifie l'hypothèse (2.1) alors ceci équivaut à ce que l'image de  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  soit fermée. Dans ces conditions une forme  $L_\mu^2$  fermée  $\alpha \in Z_\mu^k(X)$  est nulle en cohomologie  $L_\mu^2$  si et seulement si il existe  $\beta \in L_{w\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X)$  telle que  $\alpha = d\beta$ <sup>3</sup>. Il est évident que lorsque l'image de  $d$  est fermée elle est presque fermée. Remarquons que lorsque  $w' \leq w$ , alors

$$\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \subset \mathcal{C}_{w',\mu}^{k-1}(X) ;$$

ainsi si l'image de  $d : \mathcal{D}_\mu^{k-1}(d) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  est presque fermée par rapport à  $w$  alors on a

$$B_\mu^k(X) \subset d\mathcal{C}_{w',\mu}^{k-1}(X),$$

mais on n'a pas forcément égalité. Dans (lemme 3.1 de [10]), nous avons obtenu un critère qui assure l'inclusion inverse (cf. aussi les articles de N. Hitchin, P. Li, Mc Neal J, Jost et Zuo [16, 23, 26, 21]) :

**Proposition 3.1.** *Si  $(X, g, \mu)$  vérifie (2.1) et si  $w(x) \geq \frac{1}{\psi^2(d(o,x))}$  où  $o$  est un point fixé de  $X$  vérifie*

$$\int^\infty \frac{dt}{\psi(t)} = \infty$$

alors

$$d\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \subset B_\mu^k(X)$$

**Définition 3.2.** Lorsque  $w$  vérifiera les hypothèses de cette proposition on dira que  $w$  est à **décroissance parabolique**.

Un corollaire de ce résultat est donc le suivant :

**Corollaire 3.3.** *Si  $(X, g, \mu)$  vérifie les hypothèses (2.1) et si l'image de  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  est fermée alors pour tout poids  $w' \leq w$  à décroissance parabolique, l'image de  $d : \mathcal{C}_{w',\mu}^{k-1}(X) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  est encore fermée.*

### 3.2. Suite de Mayer-Vietoris.

**Théorème 3.4.** *Si  $X = U \cup V$  et  $w : X \rightarrow ]0, \infty[$  une fonction lisse, on suppose que l'image de  $d$  est presque fermée (en degré  $k$  et par rapport à  $w$ ) sur  $X, U, V$  et  $U \cap V$  et que*

$$\{0\} \rightarrow \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \xrightarrow{r^*} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V) \xrightarrow{\delta} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U \cap V) \rightarrow \{0\}$$

alors la suite suivante est exacte :

$$\mathbb{H}_{w\mu}^k(U) \oplus \mathbb{H}_{w\mu}^k(V) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}_{w\mu}^k(U \cap V) \xrightarrow{b} \mathbb{H}_\mu^k(X) \xrightarrow{r^*} \mathbb{H}_\mu^k(U) \oplus \mathbb{H}_\mu^k(V) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}_\mu^k(U \cap V).$$

<sup>3</sup>au sens des distribution.

*Démonstration.* Si  $A \subset B \subset X$  on note  $\iota_{A,B}$  l'inclusion  $\iota_{A,B} : A \rightarrow B$  et on note  $W = U \cap V$ .

Montrons l'exactitude de la dernière flèche i.e  $\ker \delta = \text{Im } r^*$  : soit donc  $(\alpha, \beta) \in Z_\mu^k(U) \oplus Z_\mu^k(V)$  telle que

$$\iota_{W,U}^* \alpha - \iota_{W,V}^* \beta \in B_\mu^k(W).$$

Il y a alors  $\psi \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(W)$  tel que  $\iota_{W,U}^* \alpha - \iota_{W,V}^* \beta = d\psi$  et par hypothèse il y a aussi  $(\psi_U, \psi_V) \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V)$  tel que  $\iota_{W,U}^* \psi_U - \iota_{W,V}^* \psi_V = \psi$ . Alors si  $\gamma$  est la  $k$ -forme  $L^2$  sur  $X$  telle que

$$\iota_{U,X}^* \gamma = \alpha - d\psi_U \text{ et } \iota_{V,X}^* \gamma = \beta - d\psi_V$$

alors  $\gamma$  est fermée sur  $X$  et on a bien  $\iota_{U,X}^* \gamma - \alpha \in B_\mu^k(U)$  et  $\iota_{V,X}^* \gamma - \beta \in B_\mu^k(V)$ .

On montre maintenant l'exactitude de la flèche du milieu i.e.t  $\ker r^* = \text{Im } \delta$ . Soit donc  $\gamma \in Z_\mu^k(X)$  telle que

$$\iota_{U,X}^* \gamma \in B_\mu^k(U) \text{ et } \iota_{V,X}^* \gamma \in B_\mu^k(V),$$

on trouve donc  $(\psi_U, \psi_V) \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V)$  tel que :  $\iota_{U,X}^* \gamma = d\psi_U$  et  $\iota_{V,X}^* \gamma = d\psi_V$ . Alors  $\iota_{W,U}^* \psi_U - \iota_{W,V}^* \psi_V \in Z_{w\mu}^{k-1}(W)$ , et évidemment on a  $\delta(\iota_{W,U}^* \psi_U - \iota_{W,V}^* \psi_V) = [\gamma]$ .

On montre finalement l'exactitude de la première flèche : c'est à dire  $\text{Im } r^* = \ker \delta$ . Soit donc  $\eta \in Z_{w\mu}^{k-1}(W)$ , tel que si on choisit  $(\psi_U, \psi_V) \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V)$  vérifiant  $\eta = \iota_{W,U}^* \psi_U - \iota_{W,V}^* \psi_V$  alors la  $k$ -forme  $L^2$  fermée  $\gamma$  définie par

$$\iota_{U,X}^* \gamma = d\psi_U \text{ et } \iota_{V,X}^* \gamma = d\psi_V$$

est nulle en cohomologie  $L_\mu^2$ . Par hypothèse il existe  $\phi \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X)$  telle que  $\gamma = d\phi$ . Mais alors on a  $\alpha = \psi_U - \iota_{U,X}^* \phi \in Z_{w\mu}^{k-1}(U)$  et  $\beta = \psi_V - \iota_{V,X}^* \phi \in Z_{w\mu}^{k-1}(V)$  d'où  $\eta = \iota_{W,U}^* \alpha - \iota_{W,V}^* \beta$ .

□

*Remarques 3.5.* i) On peut évidemment énoncé un théorème analogue pour la cohomologie  $L_\mu^2$  relative à une hypersurface  $Y \subset \partial X$  à condition d'introduire l'espace  $\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X, Y)$  des formes  $\alpha \in L_{w\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X)$  telles qu'il existe une constante  $C$  avec

$$\forall \varphi \in C_0^\infty(\Lambda^k T^*(X \cup Y)) \mid \langle \alpha, d_\mu^* \varphi \rangle_\mu \mid \leq C \|\varphi\|_\mu.$$

ii) La preuve indique aussi que pour avoir l'exactitude au niveau des deux dernières flèches, on a uniquement besoin que l'image de  $d$  soit presque fermée sur  $U \cap V$ , pour l'exactitude au niveau des deux flèches du milieu, il suffit que l'image de  $d$  soit presque fermée sur  $U$  et  $V$  et au niveau des deux premières flèche il suffit que l'image de  $d$  soit presque fermée sur  $X$ .

**3.3. Condition pour assurer la presque fermeture de l'image de  $d$ .** Si on découpe la variété en petits bouts sur lesquels l'image de  $d$  est presque fermée, il n'est pas clair que l'image de  $d$  soit presque fermée sur la variété; voici une proposition qui assure ceci (c'est en quelque sorte un voyage de la cohomologie vers l'analyse fonctionnelle).

**Proposition 3.6.** *Soit  $(X, g)$  une variété riemannienne vérifiant (2.1) et  $\mu, w, w'$  des fonctions strictement positives lisses sur  $\bar{X}$ . On suppose que  $X = U \cup V$  et que les conditions suivantes sont vérifiées :*

- l'image de  $d$  est presque fermée sur  $U$  et  $V$  par rapport au poids  $w$ .
- Le poids  $w$  est à décroissance parabolique.
- La suite  $\{0\} \rightarrow \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \xrightarrow{r^*} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V) \xrightarrow{\delta} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U \cap V) \rightarrow \{0\}$  est exacte.
- $d\mathcal{C}_{w',w\mu}^{k-2}(U \cap V) = B_{w\mu}^{k-1}(U \cap V)$ .
- $\mathcal{C}_{w',w\mu}^{k-2}(U) \oplus \mathcal{C}_{w',w\mu}^{k-2}(V) \xrightarrow{\delta} \mathcal{C}_{w',w\mu}^{k-2}(U \cap V) \rightarrow \{0\}$
- la suite suivante  $\mathbb{H}_{w\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathbb{H}_{w\mu}^{k-1}(V) \rightarrow \mathbb{H}_{w\mu}^{k-1}(U \cap V) \xrightarrow{b} \mathbb{H}_{w\mu}^k(X)$  est aussi exacte,

alors l'image de  $d$  est presque fermée sur  $X$  par rapport au poids  $w$ .

*Démonstration.* Soit donc  $\gamma \in B_{w\mu}^k(X)$ , évidemment on a aussi

$$\iota_{U,X}^* \gamma \in B_{w\mu}^k(U) \text{ et } \iota_{V,X}^* \gamma \in B_{w\mu}^k(V)$$

Il y a donc  $(\psi_U, \psi_V) \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V)$  tels que

$$\iota_{U,X}^* \gamma = d\psi_U \text{ et } \iota_{V,X}^* \gamma = d\psi_V.$$

On définit alors  $\eta = \iota_{W,U}^* \psi_U - \iota_{W,V}^* \psi_V \in Z_{w\mu}^{k-1}(W)$  et cette forme vérifie par construction  $b[\eta] = 0$ . Il y a donc  $\phi \in \mathcal{C}_{w',w\mu}^{k-2}(W)$  et  $(\alpha_U, \alpha_V) \in Z_{w\mu}^{k-1}(U) \oplus Z_{w\mu}^{k-1}(V)$  tels que

$$\eta = d\phi + \iota_{W,U}^* \alpha_U - \iota_{W,V}^* \alpha_V.$$

Et on trouve aussi  $(\phi_U, \phi_V) \in \mathcal{C}_{w',w\mu}^{k-2}(U) \oplus \mathcal{C}_{w',w\mu}^{k-2}(V)$  tels que

$$\iota_{W,U} \phi_U - \iota_{W,V} \phi_V = \phi.$$

Si  $\psi \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X)$  est défini par

$$\iota_{U,X}^* \psi = \psi_U - d\phi_U - \alpha_U \text{ et } \iota_{V,X}^* \psi = \psi_V - d\phi_V - \alpha_V,$$

alors on a bien  $\gamma = d\psi$ . Ainsi, nous avons obtenu l'inclusion :

$$B_{w\mu}^k(X) \subset d\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X).$$

L'inclusion réciproque est une conséquence du fait que  $w$  est à décroissance parabolique.  $\square$

Nous avons bien évidemment un énoncé analogue pour la cohomologie  $L_\mu^2$  relative à  $Y \subset \partial X$ .

On a aussi un critère qui assure que l'image de  $d$  est presque fermée sur  $U$  lorsqu'elle l'est sur  $X$  et  $U \cap V$ .

**Proposition 3.7.** *Soit  $(X, g)$  une variété riemannienne telle que (2.1) soit vérifiée à coins et  $\mu, w$  des fonctions strictement positives lisses sur  $\bar{X}$ . On suppose que  $X = U \cup V$  où  $U$  vérifie aussi (2.1). Les conditions suivantes*

- L'image de  $d$  est presque fermée sur  $X$  et  $U \cap V$  par rapport au poids  $w$ .
- Le poids  $w$  est à décroissance parabolique.
- $\{0\} \rightarrow \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \xrightarrow{r^*} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V) \xrightarrow{\delta} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U \cap V) \rightarrow \{0\}$
- $\iota_{U,X}^* : \mathbb{H}_\mu^k(X) \rightarrow \mathbb{H}_\mu^k(U)$  est injective

impliquent que l'image de  $d$  est presque fermée sur  $U$  par rapport au poids  $w$

*Démonstration.* Soit  $\alpha \in B_\mu^k(U)$  on a donc  $\iota_{W,U}^* \alpha \in B_\mu^k(W)$  et on trouve de même  $(\psi_U, \psi_V) \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V)$  tels que  $d\iota_{W,U}^* \psi_U - d\iota_{W,V}^* \psi_V = \iota_{W,U}^* \alpha$ . Maintenant si  $\gamma \in Z_\mu^k(X)$  est défini par

$$\iota_{U,X}^* \gamma = \alpha - d\psi_U \text{ et } \iota_{V,X}^* \gamma = -d\psi_V.$$

Alors  $\gamma$  est fermé et  $\iota_{U,X}^* \gamma \in B_\mu^k(U)$  donc par hypothèse :  $\gamma \in B_\mu^k(X)$  et on trouve  $\phi \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X)$  tel que  $\gamma = d\phi$ , ainsi  $\alpha = d\psi_U + d\iota_{U,X}^* \phi$ . D'où l'inclusion

$$B_\mu^k(U) \subset d\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U).$$

L'inclusion réciproque est une conséquence du fait que  $w$  est à décroissance parabolique.  $\square$

*Remarque 3.8.* On remarque que l'on peut remplacer l'hypothèse que l'image de  $d$  est presque fermée sur  $X$  par l'hypothèse que si  $\alpha \in B_\mu^k(X)$  alors il y a une forme  $\beta \in L_{loc}^2$  tel que  $\alpha = d\beta$  et  $\iota_{U,X}^* \beta \in L_{w\mu}^2$ .

La preuve de la proposition précédente montre même le résultat suivant :

**Corollaire 3.9.** *Si en plus des hypothèses précédentes, on a  $\mathbb{H}_\mu^k(U \cap V) = \{0\}$ , alors*

$$\mathbb{H}_\mu^k(U) \simeq \mathbb{H}_\mu^k(X).$$

**3.4. Comparaison avec la non parabolicité.** Dans [9], nous avons utilisé une condition similaire à la presque fermeture de l'image de  $d$  :

*Définition 3.10.* Soit  $(M, g)$  une variété riemannienne *complète*, on dit que l'opérateur  $d + d_\mu^*$  est non parabolique à l'infini s'il existe un compact  $K \subset M$  tel que pour tout ouvert borné  $U$  de  $M \setminus K$ , il existe une constante  $C > 0$  telle que

$$\forall \varphi \in C_0^\infty(\Lambda^\bullet T^*(M \setminus K)), \quad C \|\varphi\|_{L^2(U)} \leq \|(d + d_\mu^*)\varphi\|_\mu.$$

Soit  $\tilde{K}$  un compact contenant  $K$  dans son intérieur, on note  $W(\Lambda^\bullet T^*M)$  le complété de  $C_0^\infty(\Lambda^\bullet T^*M)$  pour la norme :

$$\alpha \mapsto \|\alpha\|_{L^2(\tilde{K})} + \|(d + d_\mu^*)\varphi\|_\mu.$$

Cet espace ne dépend pas du compact  $\tilde{K}$  choisi, il s'injecte donc naturellement dans  $W_{loc}^{1,2}$ . De plus l'opérateur  $(d + d_\mu^*) : W(\Lambda^\bullet T^*M) \longrightarrow L_\mu^2(\Lambda^\bullet T^*M)$  est Fredholm et on a

$$B_\mu^k(M) = dW(\Lambda^{k-1}T^*M).$$

Si l'on fait l'hypothèse de coercivité suivante :

$$\forall \varphi \in C_0^\infty(\Lambda^\bullet T^*(M \setminus K)), \quad C \|\varphi\|_{w\mu} \leq \|(d + d_\mu^*)\varphi\|_{w\mu},$$

alors l'opérateur  $d + d_\mu^*$  est clairement non parabolique à l'infini et l'image de  $d$  est presque fermée sur  $M$  pour le poids  $w$ . Dans ce cas une norme sur l'espace  $W(\Lambda^\bullet T^*M)$  est

$$\alpha \mapsto \|\varphi\|_{w\mu} + \|(d + d_\mu^*)\varphi\|_{w\mu}.$$

Alors le noyau  $W$  de l'opérateur  $d + d_\mu^*$  est le noyau  $L_{w\mu}^2$  de l'opérateur  $d + d_\mu^*$  ; et il y a donc une constante  $C > 0$  telle que si  $\varphi \in C_0^\infty(\Lambda^\bullet T^*M)$  vérifie

$$\langle \varphi, h \rangle_{w\mu} = 0, \quad \forall h \in \ker_{L_{w\mu}^2}(d + d_\mu^*)$$

alors

$$C \|\varphi\|_{w\mu} \leq \|(d + d_\mu^*)\varphi\|_{w\mu}$$

L'avantage de cette définition est qu'elle ne dépend que de la géométrie à l'infini de  $M$  et qu'avec un peu d'analyse on peut obtenir une suite exacte longue en cohomologie  $L_\mu^2$ . Mais ceci ne permet pas de découper la géométrie à l'infini en morceaux sur lesquels on ferait une analyse similaire. La condition de presque fermeture pour l'image de  $d$  est assez souple mais nous ne savons pas si elle ne dépend que de la géométrie à l'infini : par exemple si  $(X, g)$  est une variété riemannienne qui vérifie nos hypothèses (2.1) et  $\mu$  une fonction lisse strictement positive sur  $\bar{X}$ . Soit  $K \subset \bar{X}$  un compact, est-il vrai que la presque fermeture de l'image de  $d$  sur  $X$  implique la presque fermeture de l'image de  $d$  sur  $X \setminus K$  (et vice versa) ? Notons par exemple que l'hypothèse de presque fermeture de l'image de  $d$  ne requiert pas la finitude de la dimension des espaces de  $L_\mu^2$  cohomologie.

**Lemme 3.11.** *Supposons que  $(X, g, \mu)$  vérifie la condition (2.1) et que  $w$  soit à décroissance parabolique, alors  $C_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*\bar{X})$  est dense dans  $\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X)$  lorsque ce dernier espace est équipé de la norme du graphe  $\alpha \mapsto \|\alpha\|_{w\mu}^2 + \|d\alpha\|_\mu$ .*

*Démonstration.* C'est en fait une reformulation du lemme (3.1) de [10]. Grâce aux hypothèses (2.1), il suffit de démontrer que si  $\beta \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X)$ , alors on peut trouver une suite  $(\beta_l)_l$  d'élément  $\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X)$  à support compact qui converge vers  $\beta$ .

Rappelons que  $w$  est à décroissance parabolique :

$$w(x) \geq \frac{1}{\psi^2(d(o, x))}$$

où  $o$  est un point fixé de  $X$  et  $\psi$  vérifie

$$\int_0^\infty \frac{dt}{\psi(t)} = \infty.$$

On introduit alors les fonctions de troncature de [10] : si  $r, R$  deux nombres réels tels que  $0 < r < R$ , on leur associe la fonction  $\phi_{r,R}$  définie par

$$(3.1) \quad \phi_{r,R}(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } s \leq r \\ \int_s^R \frac{dt}{\psi(t)} \times \left( \int_r^R \frac{dt}{\psi(t)} \right)^{-1} & \text{si } s \in [r, R] \\ 0 & \text{si } s \geq R \end{cases}$$

Il existe alors par hypothèse des suites  $r_l < R_l$  telles que  $\lim_{l \rightarrow \infty} r_l = \infty$  et

$$\left( \int_{r_l}^{R_l} \frac{dt}{\psi(t)} \right)^{-1} \leq \frac{1}{l};$$

On considère alors  $\beta_l = \phi_{r_l, R_l}(r(x))\beta$  où  $r(x) = d(o, x)$ . Il est clair que  $\lim_{l \rightarrow \infty} \|\beta_l - \beta\|_{w\mu} = 0$ . De plus puisque  $d\beta_l = \phi_{r_l, R_l}d\beta + \phi'_{r_l, R_l}dr \wedge \beta$  et que par construction :

$$\|\phi'_{r_l, R_l}dr \wedge \beta\|_\mu \leq \frac{2}{l}\|\beta\|_{w\mu},$$

on déduit immédiatement que  $\lim_{l \rightarrow \infty} \|d\beta_l - d\beta\|_\mu = 0$ .  $\square$

Introduisons maintenant l'opérateur

$$T := (d : \mathcal{C}_{w,w\mu}^{k-2}(X) \rightarrow L_{w\mu}^2(\Lambda^{k-1}T^*X))$$

et  $T^*$  son adjoint, le domaine de  $T^*$  est aussi l'espace  $\mathcal{D}(T^*)$  des  $(k-1)$ -formes  $\alpha \in L_{w\mu}^2$  telles que

$$\forall \phi \in C_0^\infty(\bar{X}), \quad \phi\alpha \in \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*)$$

et telles que  $d_{w\mu}^* \alpha \in L_\mu^2$ . Une preuve identique en utilisant que  $d_{w\mu}^* \beta_l = \phi_{r_l, R_l} d_{w\mu}^* \beta - \phi'_{r_l, R_l} \text{int}_{\nabla_r} \beta$ , montre que l'on a aussi :

**Lemme 3.12.** *Supposons que  $(X, g, \mu)$  vérifie la condition (2.1) et que  $w$  soit à décroissance parabolique, alors  $C_0^\infty(\Lambda^{k-1} T^* \bar{X}) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*)$  est dense dans  $\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \cap \mathcal{D}(T^*)$  lorsque ce dernier espace est équipé de la norme du graphe  $\alpha \mapsto \|\alpha\|_{w\mu}^2 + \|d\alpha\|_\mu + \|d_{w\mu}^* \alpha\|_\mu$ .*

Grâce à ce dernier lemme, un théorème de L. Hörmander (théorème 1.1.2 de [17]) implique néanmoins le résultat suivant qui établit un premier lien entre les notions de non-parabolicité à l'infini et la presque-fermeture de l'image de  $d$ .

**Théorème 3.13.** *Soit  $(X, g)$  est une variété riemannienne orientée de dimension  $d$  qui vérifie nos hypothèses (2.1) et  $\mu, w$  des fonctions lisses strictement positives sur  $\bar{X}$  où  $w$  est à décroissance parabolique. Les images des applications*

$$d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$$

$$\text{et } d : \mathcal{C}_{w,w\mu}^{k-2}(X) \rightarrow L_{w\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X)$$

sont fermées si et seulement si il y a une constante  $C > 0$  telle que si  $\varphi \in C_0^\infty(\Lambda^{k-1} T^* \bar{X}) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*)$  vérifie

$$\langle \varphi, h \rangle_{w\mu} = 0, \quad \forall h \in \mathcal{H}_{w\mu}^{k-1}(X)$$

alors

$$C \|\varphi\|_{w\mu}^2 \leq \|d\varphi\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^* \varphi\|_\mu^2$$

On peut aussi re-visiter une partie de nos travaux sur la non-parabolicité à l'infini à partir de cette inégalité. Nous remarquons que si en plus des hypothèses de ce théorème nous supposons que  $\mathcal{H}_{w\mu}^{k-1}(X)$  est de dimension finie alors on trouve  $K \subset \bar{X}$  un compact et  $C$  une constante strictement positive telle que

$$\forall \phi \in C_0^\infty(\Lambda^{k-1} T^*(\bar{X} \setminus K)) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*), \\ C \|\phi\|_{w\mu}^2 \leq \|d\phi\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^* \phi\|_\mu^2.$$

En effet si  $\{h_1, \dots, h_l\}$  est une base orthonormée de  $\mathcal{H}_{w\mu}^{k-1}(X)$ , nous avons pour  $\phi \in C_0^\infty(\Lambda^{k-1} T^*(\bar{X} \setminus K)) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*)$

$$C \|\phi\|_{w\mu}^2 \leq \|d\phi\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^* \phi\|_\mu^2 + C \sum_i |\langle \phi, h_i \rangle_{w\mu}|^2$$

Il suffit de choisir alors  $K$  afin que

$$\sum_i \|h_i\|_{L_{w\mu}^2(M \setminus K)}^2 \leq \frac{1}{10}.$$

On a aussi une réciproque à ce résultat :

**Théorème 3.14.** *Supposons en plus que  $w$  soit à décroissance parabolique et que pour un compact  $K \subset \bar{X}$ , il existe une constante  $C > 0$  telle que*

$$(3.2) \quad \forall \phi \in C_0^\infty(\Lambda^{k-1} T^*(\bar{X} \setminus K)) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*) \\ C \|\phi\|_{w\mu}^2 \leq \|d\phi\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^* \phi\|_\mu^2.$$

alors l'image de  $d$  est presque fermée en degré  $k$  pour le poids  $w$ ,  $\mathcal{H}_{w\mu}^{k-1}(X)$  est de dimension finie et l'image de  $d : \mathcal{C}_{w,w\mu}^{k-2}(X) \rightarrow L_{w\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X)$  est aussi fermée.

*Démonstration.* On s'inspire largement de [8] : soit  $\tilde{K}$  un compact contenant  $K$  dans son intérieur, on lui associe la norme  $N_{\tilde{K}}$  définie sur  $C_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*\tilde{X}) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*)$  par

$$N_{\tilde{K}}(\phi) = \left( \int_{\tilde{K}} |\phi|^2 + \|d\phi\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^*\phi\|_\mu^2 \right)^{1/2}.$$

Cette norme est en fait équivalente à la norme :

$$N_w(\phi) = (\|\phi\|_{w\mu}^2 + \|d\phi\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^*\phi\|_\mu^2)^{1/2}.$$

En effet la norme  $N_w$  est à un facteur près plus grande que la norme  $N_{\tilde{K}}$ , il suffit donc de montrer l'estimation réciproque. Soit donc  $\rho$  une fonction qui vaut 1 dans un voisinage de  $X \setminus \tilde{K}$  et à support dans  $X \setminus K$ . Si  $\phi \in C_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*\tilde{X}) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*)$ , on a

$$\begin{aligned} \|\phi\|_{w\mu}^2 &\leq 2\|(1-\rho)\phi\|_{w\mu}^2 + 2\|\rho\phi\|_{w\mu}^2 \\ &\leq C \int_{\tilde{K}} |\phi|^2 + C [\|d(\rho\phi)\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^*(\rho\phi)\|_\mu^2] \\ &\leq C \int_{\tilde{K}} |\phi|^2 + C [\|d\phi\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^*\phi\|_\mu^2] \end{aligned}$$

Où on a utilisé d'abord l'inégalité de non parabolicité (3.2) et ensuite que

$$\|d(\rho\phi)\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^*(\rho\phi)\|_\mu^2 \leq C \int_{\tilde{K}} |\phi|^2 + C [\|d\phi\|_\mu^2 + \|d_{w\mu}^*\phi\|_\mu^2]$$

Soit donc  $W$  le complété de  $C_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*\tilde{X}) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*)$  pour la topologie induite par ces normes. Nous allons montrer que l'opérateur

$$(d + d_{w\mu}^*) : W \longrightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X) \oplus L_\mu^2(\Lambda^{k-1} T^* X)$$

est semi-Fredholm : son noyau est de dimension finie et son image est fermée.

Grâce au critère très commode de L. Hörmander (prop 19.1.3 de [19]), il suffit pour cela de montrer que si  $\{\alpha_l\}_l$  converge faiblement dans  $W$  et que  $\{(d + d_{w\mu}^*)\alpha_l\}_l$  converge fortement dans  $L_\mu^2$  alors la suite  $\{\alpha_l\}_l$  converge fortement dans  $W$ .

Il suffit donc de démontrer qu'une telle suite converge fortement dans  $L^2(\Lambda^{k-1}T^*\tilde{K})$ . Mais par hypothèse une telle suite est bornée dans  $W_{loc}^{1,2}$  et converge faiblement dans  $W_{loc}^{1,2}$ , puisque l'inclusion de  $W_{loc}^{1,2}$  dans  $L^2(\tilde{K})$  est compacte, le résultat est immédiat. On vient de démontrer que l'image de  $d : W \longrightarrow L_\mu^2$  est fermée. Grâce au lemme 3.12, on en déduit que les opérateurs  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \rightarrow L_\mu^2$  et  $T^*$  ont leurs images fermées, c'est donc aussi le cas de  $T$ .

On montre maintenant que  $\mathcal{H}_{w\mu}^{k-1}(X)$  est de dimension finie, on sait que  $\ker_W(d + d_{w\mu}^*) \subset \mathcal{H}_{w\mu}^{k-1}(X)$ . On va vérifier que ces deux espaces coïncident. Soit  $h \in \mathcal{H}_{w\mu}^{k-1}(X)$ , on veut montrer que  $h$  est dans  $W$ , il faut donc trouver une suite  $(h_l)_l$  de  $C_0^\infty(\Lambda^{k-1}T^*\tilde{X}) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w\mu}^*)$  telle que  $\|dh_l\|_\mu \rightarrow 0$  et  $\|d_{w\mu}^*h_l\|_\mu \rightarrow 0$ . On reprend les fonction de troncature (3.1), et on considère alors  $h_l = \phi_{r_l, R_l}(r(x))h$  où  $r(x) = d(o, x)$ . On a  $dh_l = \phi'_{r_l, R_l} dr \wedge h$  et  $d_{w\mu}^*h_l = -\phi'_{r_l, R_l} \text{int}_{\nabla r} h$  on obtient donc

$$\|dh_l\|_\mu + \|d_{w\mu}^*h_l\|_\mu \leq \frac{2}{l} \|h\|_{w\mu}$$

d'où le résultat.  $\square$

La conclusion de cette discussion est donc la suivante :

**Théorème 3.15.** *Lorsque  $(X, g, \mu)$  vérifie (2.1) et que  $w$  est à décroissance parabolique, la conjonction des trois conditions suivantes ne dépend que de la géométrie à l'infini de  $(X, g, \mu)$  :*

- (1) *La dimension de  $\mathbb{H}_{w,\mu}^{k-1}(X)$  est finie.*
- (2) *L'image de  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \rightarrow L_{\mu}^2(\Lambda^k T^* X)$  est fermée.*
- (3) *L'image de  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-2}(X, \partial X) \rightarrow L_{w,\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X)$  est fermée.*

*Et elles équivalent à l'existence d'un compact  $K \subset \bar{X}$  tel que :*

$$\forall \phi \in C_0^\infty(\Lambda^{k-1} T^*(\bar{X} \setminus K)) \cap \mathcal{D}^{k-1}(d_{w,\mu}^*) \\ C \|\phi\|_{w,\mu}^2 \leq \|d\phi\|_{\mu}^2 + \|d_{w,\mu}^* \phi\|_{\mu}^2.$$

Il est évident qu'il existe aussi un énoncé analogue relativement à  $Y \subset \partial X$ .

3.5. On donne maintenant le critère qui plus loin nous permettra d'affirmer que la suite

$$\{0\} \rightarrow \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \xrightarrow{\Gamma^*} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \oplus \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(V) \xrightarrow{\delta} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U \cap V) \rightarrow \{0\}$$

est exacte.

**Proposition 3.16.** *Si  $X = U \cup V$  où  $\partial V \cap U \subset \Omega$  où  $\Omega$  est quasi isométrique au bout de cône sur  $] -1, 1[ \times \Sigma : \Omega \simeq C_1(] -1, 1[ \times \Sigma)$ . On suppose que  $\partial V \cap U = C_1(\{0\} \times \Sigma)$  et  $V \cap \Omega = C_1(] -1, 0[ \times \Sigma)$ . Si les poids  $w, \mu$  sont radiaux sur  $\Omega$ , alors on a*

$$\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U) \xrightarrow{\iota_{U \cap V, U}^*} \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U \cap V) \rightarrow \{0\}$$

*Démonstration.* Les arguments de la preuve sont en fait empruntés à J. Cheeger ( lemme 4.2 de [11]) : on considère  $s : \Omega \rightarrow ] -1, 1[$  la projection sur le deuxième facteur  $\Omega = ]1, \infty[ \times ] -1, 1[ \times \Sigma$ , on note  $\Omega^\pm = \{\pm s > 0\}$  et  $\sigma$  l'involution de  $\Omega$  qui échange  $\Omega^\pm$  avec  $\Omega^\mp$ . Soit  $\rho$  une fonction lisse sur  $\Omega$  qui ne dépend que de  $s$  tel que  $\rho(\Omega) \subset [0, 1]$  et  $\rho = 0$  si  $s \geq 1/2$ , et  $\rho = 1$  si  $s \leq 1/3$ . On étend cette fonction à  $U \cup \Omega$  en lui imposant la valeur 0 sur le complémentaire de  $\Omega$ . Lorsque  $\alpha \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U \cap V)$ , on étend  $\alpha$  à  $(U \cap V) \cup \Omega$  en reflétant  $\alpha$  le long de  $\partial V \cap U = C_1(\{0\} \times \Sigma)$ , i.e. sur  $\Omega \setminus V$ ,  $\alpha = \sigma^* \alpha$  et on pose  $\bar{\alpha} = \rho \alpha$ . On vérifie facilement que si  $\nu$  est une fonction positive sur  $X$  qui est radiale sur  $\Omega$  alors

$$\|\bar{\alpha}\|_{L_{\nu}^2(\Omega)} \leq 2\|\alpha\|_{L_{\nu}^2(\Omega^+)}.$$

Les arguments de J. Cheeger montre que si  $\alpha \in \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(U \cap V)$  alors

$$d\bar{\alpha} = \overline{d\alpha} + d\rho \wedge \bar{\alpha}$$

puisque le gradient de  $\rho$  est borné sur  $\Omega$  et qu'on a supposé  $w \leq 1$ , la proposition est bien démontré.  $\square$

#### 4. $L^2$ COHOMOLOGIE DES CÔNES.

**4.1. Inégalités de Hardy.** On rappelle ici quelques inégalités de type Hardy qui seront utile un peu plus loin à propos de la  $L^2$  cohomologie des cônes et des variétés QALE. Pour plus de détails sur ces inégalités nous renvoyons le lecteur au traité ([34]) et dans un cadre un peu plus général nous conseillons le survol de E.B. Davies ([12]).



**Lemme 4.1.** Soit  $\rho : [1, \infty[ \rightarrow \mathbb{R}_+^*$  une fonction positive telle que

$$\int_1^\infty \frac{dt}{\rho(t)} < \infty.$$

Si on définit

$$G(t) = \int_t^\infty \frac{d\tau}{\rho(\tau)},$$

alors pour tout  $\varphi \in W_{loc}^{1,2}([1, \infty[)$  tel que  $\varphi' \in L^2([1, \infty[, \rho dt)$  on a

$$\frac{1}{4} \int_1^\infty \left( \frac{G'(t)}{G(t)} \right)^2 |\varphi(t)|^2 \rho(t) dt \leq \int_1^\infty |\varphi'(t)|^2 \rho(t) dt.$$

*Démonstration.* La preuve est standard on pose  $\varphi(t) = \sqrt{G(t) - G(T)} u(t)$  et on a alors

$$\int_1^T |\varphi'(t)|^2 \rho(t) dt = \int_1^T \left[ |u'|^2 (G - G(T)) + 2u'uG' + \frac{1}{4}u^2 \frac{G'(t)^2}{G(t) - G(T)} \right] \rho(t) dt$$

En intégrant par partie le terme du milieu, on obtient :

$$\int_1^T |\varphi'(t)|^2 \rho(t) dt \geq u(1)^2 + \frac{1}{4} \int_1^T u^2 \frac{G'(t)^2}{G(t) - G(T)} \rho(t) dt$$

On obtient alors le résultat en faisant tendre  $T$  vers l'infini.  $\square$

Lorsque  $\int_1^\infty \frac{dt}{\rho(t)} = \infty$  la même preuve fournit :

**Lemme 4.2.** Soit  $\rho : [1, \infty[ \rightarrow \mathbb{R}_+^*$  une fonction positive telle que

$$\int_1^\infty \frac{dt}{\rho(t)} = \infty.$$

Si on définit

$$g(t) = \int_1^t \frac{d\tau}{\rho(\tau)},$$

alors pour tout  $\varphi \in W_{loc}^{1,2}([1, \infty[)$  tel que  $\varphi' \in L^2([1, \infty[, \rho dt)$  et  $\varphi(1) = 0$  on a

$$\frac{1}{4} \int_1^\infty \left( \frac{g'(t)}{g(t)} \right)^2 |\varphi(t)|^2 \rho(t) dt \leq \int_1^\infty |\varphi'(t)|^2 \rho(t) dt.$$

De ceci on en déduit les résultats de continuité pour les opérateurs

$$M_k(v) = \int_t^\infty v(s) \frac{s^{k-1}}{t^{k-1}} ds$$

$$\text{et } m_k(v) = \int_1^t v(s) \frac{s^{k-1}}{t^{k-1}} ds$$

**Proposition 4.3.** (1) si  $a > 2k$ , alors l'opérateur  $M_k$  est borné de  $L^2([1, \infty[, r^{a-1} dr)$  dans  $L^2([1, \infty[, r^{a-3} dr)$ ,

(2) si  $a < 2k$ , alors l'opérateur  $m_k$  est borné de  $L^2([1, \infty[, r^{a-1} dr)$  dans  $L^2([1, \infty[, r^{a-3} dr)$ .

(3) Si  $a = 2k$  alors l'opérateur  $m_b$  est borné de  $L^2([1, \infty[, r^{a-1} dr)$  dans  $L^2([1, \infty[, r^{a-3} \log(r)^{-2} dr)$ .

- (4) Si  $a > 2k$  ou si  $a = 2k$  et  $b > 1$  alors l'opérateur  $M_k$  est borné de  $L^2([1, \infty[, (1 + \log r)^b r^{a-1} dr)$  dans  $L^2([1, \infty[, (1 + \log r)^b r^{a-3} dr)$ .
- (5) Si  $a < 2k$  ou si  $a = 2k$  et  $b < 1$  alors l'opérateur  $m_k$  est borné de  $L^2([1, \infty[, (1 + \log r)^b r^{a-1} dr)$  dans  $L^2([1, \infty[, r^{a-3}(1 + \log(r))^{b-2} dr)$ .

On considère maintenant  $(V, h)$  une variété riemannienne de dimension  $d - 1$  et on note  $C(V)$  le cône sur  $V$ , c'est la variété  $]0, \infty[ \times V$  équipée de la métrique

$$g = dr^2 + r^2 \pi^* h$$

où  $r, \pi$  sont les projections sur le premier et second facteur. Pour  $R > 0$  on note  $C_R(V) = \{r > R\}$  et  $V_R = \{R\} \times V \subset C(V)$ . Pour  $R > 0$ , les variétés  $C_R(V)$  sont quasi isométriques entre elles.

#### 4.2. Annulation de la $L^2$ cohomologie des cônes.

**Proposition 4.4.** Si  $k \leq d/2$  alors  $\mathbb{H}^k(C_1(V)) = \{0\}$  et si  $k \geq d/2$  alors  $\mathbb{H}^k(C_1(V), V_1) = \{0\}$ .

Ce résultat est bien connu mais la preuve nous fournira des renseignements supplémentaires sur  $B^k(C_1(V))$ .

*Démonstration.* On considère le champ de vecteur  $X = r \frac{\partial}{\partial r}$  et  $\Phi_t$  son flot :

$$\Phi_t(r, \theta) = (e^t r, \theta).$$

Si  $\alpha \in Z_2^k(C_1(V))$ , grâce à la formule de Cartan, nous avons pour  $t > 0$  :

$$\alpha - \Phi_t^* \alpha = d\beta_t \text{ avec } \beta_t = - \int_0^t \Phi_\tau^* (\text{int}_X \alpha) d\tau.$$

où  $\text{int}_X$  est l'opérateur produit intérieur par  $X$ . Avec l'estimation :

$$|\Phi_t^* \alpha|(r, \theta) \leq e^{kt} |\alpha|(e^t r, \theta),$$

nous obtenons :

$$\int_{C_{e^t}(V)} |\Phi_t^* \alpha|^2 \leq e^{(2k-d)t} \int_{C_{e^t}(V)} |\alpha|.$$

Ainsi pour  $k \leq d/2$  on a  $\alpha = L^2 \lim_{t \rightarrow \infty} d\beta_t$  et puisque  $\beta_t \in L^2$  on a bien  $\alpha \in B_2^k(C_1(V))$ . Remarquons que puisque

$$|\Phi_\tau^* (\text{int}_X \alpha)|(r, \theta) \leq e^{k\tau} r |\alpha|(e^\tau r, \theta),$$

l'on a aussi

$$|\beta|(r, \theta) \leq \frac{1}{r^{k-1}} \int_r^{e^t r} |\alpha|(s, \theta) s^{k-1} ds.$$

Et donc on a pour  $k < d/2$  :  $\alpha = dB^+ \alpha$  avec

$$|B^+ \alpha|(r, \theta) \leq \frac{1}{r^{k-1}} \int_r^\infty |\alpha|(s, \theta) s^{k-1} ds.$$

Et avec d'après (4.3), nous obtenons :

$$(4.1) \quad \|r^{-1} B^+ \alpha\| \leq C \|\alpha\|.$$

Dans le second cas, si  $\alpha \in Z_2^k(C_1(V), V_1)$  alors l'extension par zéro de  $\alpha$  à  $C(V)$  est encore fermée, on notera encore  $\alpha$  cette extension et si  $t < 0$  on a encore  $\Phi_t^* \alpha \in Z_2^k(C_1(V), V_1)$ . Grâce à la formule de Cartan, nous obtenons de même pour  $t < 0$  :

$$\alpha - \Phi_t^* \alpha = d\beta_t$$

On a maintenant

$$|\beta|(r, \theta) \leq \frac{1}{r^{k-1}} \int_{\inf\{e^t r, 1\}}^r |\alpha|(s, \theta) s^{k-1} ds.$$

$\alpha$  et  $\Phi_t^* \alpha$  définissent donc la même classe dans  $\mathbb{H}^k(C_1(V), V_1)$ , mais pour  $k \geq d/2$ ,  $\Phi_t^* \alpha$  tend faiblement vers 0 dans  $L^2$  lorsque  $t \rightarrow -\infty$  (en même fortement si  $k > d/2$ ). Donc cette classe de cohomologie relative est nulle. Cela prouve la deuxième annulation. On obtient ici  $\alpha = dB^- \alpha$  avec

$$|B^- \alpha|(r, \theta) \leq \frac{1}{r^{k-1}} \int_1^r |\alpha|(s, \theta) s^{k-1} ds.$$

d'où d'après (4.3) :

$$\|r^{-1} B^- \alpha\| \leq C \|\alpha\|, \text{ lorsque } k > d/2$$

$$\text{et } \|(r \log r)^{-1} B^- \alpha\| \leq C \|\alpha\|, \text{ lorsque } k = d/2.$$

□

#### 4.3. $L^2$ cohomologie des cônes.

**Proposition 4.5.** *On suppose de plus que sur  $(V, h)$  l'image de  $d$  est fermée. Alors pour  $k > d/2$ , l'application de restriction  $r = \iota_{C_1(V) \setminus C_2(V), C_1(V)}$  induit un isomorphisme :*

$$r^* : \mathbb{H}^k(C_1(V)) \rightarrow \mathbb{H}^k(C_1(V) \setminus C_2(V)) \simeq \mathbb{H}^k(V).$$

Et pour  $k < d/2$  alors l'application d'extension par zéro est un isomorphisme :

$$\mathbb{H}^k(C_1(V) \setminus C_2(V), V_1 \cup V_2) \simeq \mathbb{H}^{k-1}(V) \rightarrow \mathbb{H}^k(C_1(V), V_1).$$

*Démonstration.* L'image de  $d$  est fermée sur  $C_1(V) \setminus C_2(V)$  car  $C_1(V) \setminus C_2(V)$  est quasi isométrique au produit  $]1, 2[ \times V$  et de plus  $\mathbb{H}^k(C_2(V), V_2) = \{0\}$  pour  $k \geq d/2$ , donc d'après (lemme 2.2 de [10]), on sait alors que  $r^*$  est injectif. De plus

$$\pi^* : L^2(\Lambda^k T^* V) \rightarrow L^2(\Lambda^k T^* C_1(V))$$

est justement continue pour  $k > d/2$  et puisque  $r^* \circ \pi^* = \text{Id}$ ,  $r^*$  est aussi surjectif.

On va maintenant démontrer le second isomorphisme : soit  $\alpha \in Z_2^k(C_1(V), V_1)$  où  $k < d/2$ . Nous avons obtenu :

$$\alpha = dB^+ \alpha$$

et si  $\rho$  est une fonction lisse sur  $C_1(V)$  valant 1 sur un voisinage de  $C_1(V) \setminus C_{3/2}(V)$  et nulle sur  $C_{7/4}(V)$  alors

$$\alpha = d(\rho B^+ \alpha) + d((1 - \rho) B^+ \alpha)$$

mais puisque grâce à l'estimée (4.1) et à (3.1), on sait que  $d(1 - \rho) B^+ \alpha$  est nul dans  $\mathbb{H}^k(C_1(V), V_1)$  et puisque  $r^* d\rho B^+ \alpha \in Z_2^k(C_1(V) \setminus C_2(V), V_1 \cup V_2)$ , on a bâti une application  $[\alpha] \mapsto [r^* d(\rho B^+ \alpha)]$  de  $\mathbb{H}^k(C_1(V), V_1)$  dans  $\mathbb{H}^k(C_1(V) \setminus C_2(V), V_1 \cup V_2) \simeq \mathbb{H}^{k-1}(C_1(V) \setminus C_2(V))$ . Cette application est un inverse de l'application d'extension par zéro. □

4.4. **Presque fermeture de l'image de  $d$ .** On suppose maintenant que  $V$  est une variété compacte à bord éventuellement non vide.

Pour  $k \neq d/2$ , nous notons  $w_k = r^{-2}$  et  $w_{d/2} = (r(1 + \log r))^{-2}$  alors ces poids sont évidemment à décroissance parabolique sur  $C_1(V)$  et nous avons montré que pour  $k \geq d/2$  on a

$$d\mathcal{C}_{w_k,1}^{k-1}(C_1(V), V_1) = B_1^k(C_1(V), V_1)$$

et pour  $k < d/2$  on a :

$$d\mathcal{C}_{w_k,1}^{k-1}(C_1(V)) = B_1^k(C_1(V))$$

En fait cette dernière identité est encore valable pour  $k \geq d/2$ . En effet soit  $\alpha \in B_1^k(C_1(V))$ , il existe donc  $\psi \in L_{loc}^2$  tel que  $\alpha = d\psi$ , on a alors pour la fonction  $\rho$  précédente :

$$\alpha = d\rho\psi + d(B^-(\alpha - d\rho\psi))$$

On a bien  $B^-(\alpha - d\rho\psi), \rho\psi \in \mathcal{C}_{w_k,1}^{k-1}(C_1(V))$ . La même preuve montre que si  $k < d/2$  alors  $d\mathcal{C}_{w_k,1}^{k-1}(C_1(V), V_1) = B_1^k(C_1(V), V_1)$ . Grâce au corollaire (3.3), on obtient donc

**Proposition 4.6.** *Si  $w = (r(1 + \log r))^{-2}$ , alors*

$$d\mathcal{C}_{w,1}^{k-1}(C_1(V), V_1) = B_1^k(C_1(V), V_1) \text{ et } d\mathcal{C}_{w,1}^{k-1}(C_1(V)) = B_1^k(C_1(V))$$

Notons que les arguments donnés ici ont une portée plus générale :

**Proposition 4.7.** *Si  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X, Y) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  a son image fermée et si*

- $Y \subset \partial\bar{X}$  est compact et a un voisinage dans  $\bar{X}$  quasi isométrique à  $Y \times [0, 1[$ .
- $\mathbb{H}_\mu^k(X, Y) = \{0\}$ ,

alors  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  a aussi son image fermée.

et vice versa :

**Proposition 4.8.** *Si  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  a son image fermée et si*

- $Y \subset \partial\bar{X}$  est compact et a un voisinage dans  $\bar{X}$  quasi isométrique à  $Y \times [0, 1[$
- $\mathbb{H}_\mu^k(X) = \{0\}$ ,

alors  $d : \mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(X, Y) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  a aussi son image fermée.

4.5.  **$L^2$  cohomologie à poids.** Les arguments présentés auparavant se généralisent aisément à la cohomologie à poids : soit  $a, b \in \mathbb{R}$ , on introduit  $L_{a,b}^2(\Lambda^k T^* C_1(V))$  l'espace des formes différentielles de carrés sommables pour la mesure  $r^{2a}(1 + \log r)^{2b} d \text{vol}_g$  et on notera

$$\mathcal{C}_{a,b}^{k-1}(C_1(V)) = \{\alpha \in L_{a-1,b-1}^2(\Lambda^{k-1} T^* C_1(V)), d\alpha \in L_{a,b}^2(\Lambda^k T^* C_1(V))\}$$

et on notera de la même façon :  $\mathcal{C}_{a,b}^{k-1}(C_1(V), V_1), \mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V)), \mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V), V_1) \dots$

La même preuve montre :

**Théorème 4.9.** *Lorsque  $V$  est une variété compacte à bord lisse et  $(k, \frac{1}{2}) \neq (\frac{d}{2} + a, b)$  alors*

$$d : \mathcal{C}_{a,b}^{k-1}(C_1(V)) \rightarrow B_{a,b}^k(C_1(V)) \text{ et } d : \mathcal{C}_{a,b}^{k-1}(C_1(V), V_1) \rightarrow B_{a,b}^k(C_1(V), V_1)$$

ont des images fermées.

De plus

- Si  $(k, -\frac{1}{2}) < (\frac{d}{2} + a, b)^4$ , alors  $\mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V)) = \{0\}$ .

<sup>4</sup>l'ordre est ici l'ordre lexicographique

- Si  $(k, -\frac{1}{2}) > (\frac{d}{2} + a, b)$ , alors  $\mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V)) = \mathbb{H}^k(V)$ .
- Si  $(k, \frac{1}{2}) > (\frac{d}{2} + a, b)$ , alors  $\mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V), V_1) = \{0\}$ .
- Si  $(k, \frac{1}{2}) < (\frac{d}{2} + a, b)$ , alors  $\mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V), V_1) = \mathbb{H}^{k-1}(V)$ .

*Démonstration.* Les mêmes arguments que précédemment montrent que pour  $(k, \frac{1}{2}) < (\frac{d}{2} + a, b)$ , alors  $dC_{a,b}^{k-1}(C_1(V)) = B_{a,b}^k(C_1(V))$  et pour  $(k, \frac{1}{2}) > (\frac{d}{2} + a, b)$ , alors  $dC_{a,b}^{k-1}(C_1(V), V_1) = B_{a,b}^k(C_1(V), V_1)$ . Grâce à (4.7,4.8), on conclut alors que pour  $(k, \frac{1}{2}) \neq (\frac{d}{2} + a, b)$  alors l'image de  $d$  est presque fermée en tout degré par rapport à  $w$ . On obtient de la même façon aux isomorphismes :

- si  $(k, -\frac{1}{2}) > (\frac{d}{2} + a, b)$ , alors  $\mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V)) = \mathbb{H}^k(V)$ ,
- si  $(k, \frac{1}{2}) < (\frac{d}{2} + a, b)$ , alors  $\mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V), V_1) = \mathbb{H}^{k-1}(V)$ .

Il reste donc à montrer que si  $k = \frac{d}{2} + a$  et  $b \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}[$ , alors  $\mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V)) = \{0\}$ . L'application de restriction  $r^* : \mathbb{H}_{a,b}^k(C_1(V)) \rightarrow \mathbb{H}^k(C_1(V) \setminus C_2(V)) \simeq \mathbb{H}^k(V)$  est comme précédemment injective. Il suffit donc de montrer que pour ces valeurs de  $k, a, b$ , cette application est nulle. Pour cela, on montre que si  $\alpha \in Z_{a,b}^k(C_1(V))$  et  $\beta \in Z^{d-1-k}(V_1, \partial V_1)$  alors

$$c = \int_{V_1} \iota_1^* \alpha \wedge \beta = 0,$$

où on note  $\iota_r : \{1\} \times V \rightarrow \{r\} \times V$ . Pour cela on procède comme dans la preuve de la proposition (3.7) de [10] : on a bien sur

$$\begin{aligned} c^2 &= \left( \int_{V_1} \iota_t^* \alpha \wedge \beta \right)^2 \\ &\leq \|\beta\|_{L^\infty}^2 t^{2k} \int_V |\alpha|^2(t, \theta) d \text{vol}_h; \end{aligned}$$

D'où :

$$c^2 \int_1^\infty t^{2a-2k} t^{d-1} (1 + \log t)^{2b} dt \leq \|\beta\|_{L^\infty}^2 \|\alpha\|_{L_{a,b}^2}^2.$$

Si  $k = \frac{d}{2} + a$  et  $b \geq -\frac{1}{2}$ , on obtient bien la nullité de  $c$ . □

**4.6. Cohomologie  $L^2$  des variétés à bouts coniques :** Nous pouvons grâce à ces calculs déterminer la cohomologie  $L^2$  à poids des variétés dont un voisinage de l'infini est un bout de cône.

**Théorème 4.10.** *Soit  $(X^d, g)$  une variété riemannienne dont un voisinage de l'infini est isométrique à un bout de cône  $C_1(V)$  sur une variété riemannienne compacte  $V^{d-1}$  et soit  $\mu, w$  des fonction lisses sur  $X$  telles que sur  $C_1(V)$*

$$\mu(r, \theta) = r^{2a} \quad \text{et} \quad w(r, \theta) = r^{-2}(1 + \log r)^{-2}.$$

Alors l'image de  $d : \mathcal{D}_\mu^k(d) \rightarrow L_\mu^2$  est presque fermée en tout degré par rapport à  $w$  et on a

$$\mathbb{H}_\mu^k(X) = \begin{cases} H_c^k(X) & \text{si } k < d/2 + a \\ \text{Im}(H_c^k(X) \rightarrow H^k(X)) & \text{si } k = d/2 + a \\ H^k(X) & \text{si } k > d/2 + a \end{cases}.$$

Ce résultat est en fait bien connu, une preuve différente est faite dans l'article de T. Hausel, E. Hunsicker et R. Mazzeo ([15]); on peut aussi en donner une preuve

avec les arguments de N. Yeganefar [39] et de [9]. Nous montrons ici comment utiliser nos résultats précédents pour prouver ce théorème :

*Démonstration.* Nos résultats précédents impliquent que les images des applications

$$d : \mathcal{C}_{w, w\mu}^{k-2}(C_1(V)) \rightarrow L_{w\mu}^2(\Lambda^{k-1}T^*(C_1(V)))$$

et de

$$d : \mathcal{C}_{w, w\mu}^{k-1}(C_1(V)) \rightarrow L_{w\mu}^2(\Lambda^{k-1}T^*(C_1(V)))$$

sont fermées ; de plus  $\mathbb{H}_{w\mu}^{k-1}(C_1(V))$  est bien de dimension finie. Grâce à (3.15), nous pouvons affirmer que l'image de  $d$  est presque fermée sur  $X$  en tout degré par rapport à  $w$ . Si  $K \subset X$  est le compact dont le complémentaire est  $C_1(V)$  alors on a la suite exacte de Mayer Vietoris :

(4.2)

$$\begin{aligned} \mathbb{H}^{k-1}(K) \oplus \mathbb{H}_{w\mu}^{k-1}(C_1(V)) &\xrightarrow{\delta} \mathbb{H}^{k-1}(\partial K) \\ &\xrightarrow{\mathbf{b}} \mathbb{H}_{\mu}^k(X) \xrightarrow{\mathbf{r}^*} \mathbb{H}^k(K) \oplus \mathbb{H}_{\mu}^k(C_1(V)) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}_{\mu}^k(\partial K). \end{aligned}$$

Lorsque  $k < d/2 + a$ , on sait que

$$\mathbb{H}_{w\mu}^{k-1}(C_1(V)) = \mathbb{H}_{\mu}^k(C_1(V)) = \{0\},$$

cette suite exacte se réduit donc à :

$$\mathbb{H}^{k-1}(K) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}^{k-1}(\partial K) \xrightarrow{\mathbf{b}} \mathbb{H}_{\mu}^k(X) \xrightarrow{\mathbf{r}^*} \mathbb{H}^k(K) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}^k(\partial K).$$

Puisqu'on a aussi la suite exacte :

$$\mathbb{H}^{k-1}(K) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}^{k-1}(\partial K) \xrightarrow{\mathbf{b}} \mathbb{H}^k(K, \partial K) \xrightarrow{\mathbf{r}^*} \mathbb{H}^k(K) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}^k(\partial K),$$

Le lemme des cinq flèches impliquent que l'application naturelle

$$\mathbb{H}^k(K, \partial K) \simeq H_c^k(X) \rightarrow \mathbb{H}_{\mu}^k(X)$$

est un isomorphisme.

Lorsque  $k > d/2 + a$ , on sait que

$$\mathbb{H}_{w\mu}^{k-1}(C_1(V)) = H^{k-1}(\partial K) \text{ et } \mathbb{H}_{\mu}^k(C_1(V)) = H^{k-1}(\partial K),$$

donc les premières et dernières flèches de la suite (4.2) sont surjectives. On en déduit que l'application de restriction

$$\mathbb{H}^k(X) \rightarrow H^k(K) \simeq H^k(X)$$

est un isomorphisme.

Lorsque  $k = d/2 + a$ , on a montré que

$$\mathbb{H}_{w\mu}^{k-1}(C_1(V)) = H^{k-1}(\partial K) \text{ et } \mathbb{H}_{\mu}^k(C_1(V)) = \{0\},$$

Dans la suite exacte (4.2) la troisième flèche est donc injective et donc

$$\mathbb{H}^k(X) \simeq \ker(H^k(K) \rightarrow H^k(\partial K)) = \text{Im}(H^k(K, \partial K) \rightarrow H^k(K)).$$

□

Nous utiliserons plus loin uniquement le cas où  $V$  est le quotient de la sphère  $\mathbb{S}^{d-1}$  par un sous groupe fini  $G \subset \text{SO}(d)$  ( $G$  agit donc sans point fixe sur  $\mathbb{S}^{d-1}$ ) on dit alors que  $X$  est une variété ALE (Asymptotiquement Localement Euclidienne) à un seul bout :

**Corollaire 4.11.** *Soit  $(X^d, g)$  une variété ALE à un seul bout alors on a pour la cohomologie  $L^2$  de  $X$  :*

$$\mathbb{H}^k(X) = \text{Im} (H_c^k(X) \rightarrow H^k(X)) = \begin{cases} H_c^k(X) & \text{si } k < d \\ H^k(X) & \text{si } k > 0 \end{cases} .$$

*En particulier, l'application  $\mathbb{H}^k(X) \rightarrow H^k(X)$  est toujours injective.*

**4.7. Une formule de Künneth.** On considère deux variétés riemanniennes  $(X_1, g_1)$  et  $(X_2, g_2)$  et la variété  $X = X_1 \times X_2$  équipée de la métrique produit. Un corollaire direct des arguments de S. Zucker ([40]) est le suivant :

**Proposition 4.12.** *Supposons que l'image de  $d : \mathcal{D}_{\mu_1}(X_1) \rightarrow L_{\mu_1}^2(\Lambda^\bullet T^* X_1)$  soit fermée et que l'image de  $d : \mathcal{C}_{w_2, \mu_2}(X_2) \rightarrow L_{\mu_2}^2(\Lambda^\bullet T^* X_2)$  soit fermée alors si  $\mu(x_1, x_2) = \mu_1(x_1)\mu_2(x_2)$  et  $w(x_1, x_2) = w_2(x_2)$  l'image de*

$$d : \mathcal{C}_{w, \mu}(X) \rightarrow L_\mu^2(\Lambda^\bullet T^* X)$$

*est fermée de plus*

$$\mathbb{H}_\mu^k(X) = \bigoplus_{p+q=k} \mathbb{H}_{\mu_1}^p(X_1) \otimes \mathbb{H}_{\mu_2}^q(X_2).$$

Il n'est néanmoins pas clair que si l'image de  $d$  est presque fermée sur chacun des facteurs alors elle est presque fermée sur le produit. Il est possible qu'en utilisant les techniques introduites par R. Mazzeo et A. Vasy ([30]), on puisse dans certains cas démontrer de tels résultats. En fait, nous aurons uniquement besoin d'une version très affaiblie :

**Proposition 4.13.** *On suppose que l'image de  $d : \mathcal{C}_{w_2, \mu_2}(X_2) \rightarrow L_{\mu_2}^2(\Lambda^\bullet T^* X_2)$  est fermée et que au dehors d'un compact  $K_1 \subset X_1$ ,  $X_1$  soit quasi isométrique à un bout de cône  $C_1(\partial K_1)$  et que sur  $X_1 \setminus K_1$  on ait  $\mu_1(x_1) = r^\alpha$ , où  $r$  est la variable radiale. On note  $\mu(x_1, x_2) = \mu_1(x_1)\mu_2(x_2)$  et on suppose que  $w_1$  une fonction lisse positive sur  $X_1$  égale à  $r^{-2}(1 + \log r)^{-2}$  à l'extérieur de  $K_1$ . Alors si  $\alpha \in B_\mu^k(X)$ , il y a  $\beta_2 \in L_{w_2\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X)$  et  $\beta_1 \in L_{w_1\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X)$  avec  $d\beta_1 \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  et  $d\beta_2 \in L_\mu^2(\Lambda^k T^* X)$  et*

$$\alpha = d\beta_1 + d\beta_2.$$

*De plus :*

$$\mathbb{H}_\mu^k(X) = \bigoplus_{p+q=k} \mathbb{H}_{\mu_1}^p(X_1) \otimes \mathbb{H}_{\mu_2}^q(X_2).$$

*Démonstration.* Sur  $X_1$  on dispose d'un opérateur  $P = d_{\mu_1}^* \Delta_{\mu_1}^{-1}$  qui n'est pas continue sur  $L_{\mu_1}^2$  mais qui est continue

$$P : L_{\mu_1}^2(\Lambda^k T^* X_1) \rightarrow L_{w_1\mu_1}^2(\Lambda^{k-1} T^* X_1),$$

et si  $\alpha \in L_{\mu_1}^2(\Lambda^k T^* X_1)$ , on a

$$\alpha = h_1(\alpha) + dP\alpha + Pd\alpha,$$

$h_1(\alpha)$  étant la projection orthogonal de  $\alpha$  sur  $\mathcal{H}_{\mu_1}^k(X_1)$ . Suivant S. Zucker (preuve du théorème 2.29 de [40]) , on en déduit un opérateur borné

$$\bar{P} : L_\mu^2(\Lambda^k T^* X) \rightarrow L_{w_1\mu}^2(\Lambda^{k-1} T^* X),$$

tel que si  $\alpha \in Z_\mu^k(X)$  alors

$$\alpha = \bar{h}_1(\alpha) + d\bar{P}\alpha.$$

Où  $\bar{h}_1(\alpha)$  est la projection orthogonal de  $\alpha$  sur les formes qui sont dans  $\mathcal{H}_{\mu_1}^\bullet(X_1) \otimes L_{\mu_2}^2(\Lambda^\bullet T^* X_2)$ . On sait que  $\mathcal{H}_{\mu_1}^\bullet(X_1)$  est de dimension finie, l'hypothèse que l'image de  $d$  est presque fermée sur  $X_2$  implique que l'image de

$$d : \mathcal{H}_{\mu_1}^\bullet(X_1) \otimes \mathcal{C}_{w_2, \mu_2}(X_2) \rightarrow \mathcal{H}_{\mu_1}^\bullet(X_1) \otimes L_{\mu_2}^2(\Lambda^\bullet T^* X_2)$$

est aussi fermée. En particulier si  $h$  est le projecteur orthogonal de  $L_\mu^2(\Lambda T^* X)$  sur  $\mathcal{H}_\mu(X) = \mathcal{H}_{\mu_1}(X_1) \otimes \mathcal{H}_{\mu_2}(X_2)$  alors on trouve

$$\beta_2 \in \mathcal{H}_{\mu_1}(X_1) \otimes \mathcal{C}_{w_2, \mu_2}(X_2)$$

tel que  $\bar{h}_1(\alpha) = h(\alpha) + d\beta_2$ , si alors on pose  $\beta_1 = \bar{P}\alpha$ , on obtient bien le résultat annoncé.  $\square$

## 5. LA GÉOMÉTRIE DES VARIÉTÉS QALE.

Dans le livre [22], D. Joyce construit non seulement de nouvelles variétés compactes à holonomie exceptionnelle, mais aussi il construit de nouveaux exemples de variétés complètes non compactes Kähler-Einstein à courbure scalaire nulle sur certaines résolutions de  $\mathbb{C}^n/G$ . Nous intéressons ici aux espaces de formes harmoniques  $L^2$  sur ces variétés, puisque la dimension de ces espaces est un invariant de quasi-isométrie, nous nous contentons de décrire la géométrie de ces variétés à quasi-isométries près et au dehors d'un compact. La construction part d'un sous-groupe fini de  $G \subset SU(n)$  et d'une résolution localement en produit  $\pi : X \rightarrow \mathbb{C}^n/G$  de la variété singulière. Rappelons d'abord ce qu'est une telle résolution :

**5.1. Résolution localement en produit.** On note  $V = \mathbb{C}^n$  et  $I$  une indexation des sous-espaces vectoriels de  $\mathbb{C}^n$  qui sont fixés par un sous groupe de  $G$

$$\{V_i, i \in I\} = \{V^H, H \text{ sous - groupe de } G\}.$$

On note aussi

$$A_i = C(V_i) = \{g \in G, gv = v \forall v \in V_i\},$$

$$N(V_i) = \{g \in G, g(V_i) = V_i\}, \text{ et } B_i = N(V_i)/A_i.$$

On suppose que  $0, \infty \in I$  et que  $V_0 = V$  et  $V_\infty = \{0\} = V^G$ . On met sur  $I$  l'ordre partiel suivant :

$$i \leq j \Leftrightarrow V_i \supset V_j$$

Si on note  $W_i = V_i^\perp$  alors

$$i \leq j \Leftrightarrow W_i \subset W_j.$$

On a donc  $V/A_i \simeq (W_i/A_i) \times V_i$ . On note aussi

$$\tilde{S} = (\cup_{i \in I \setminus \{0\}} V_i) / G$$

le lieu singulier de  $V/G$ . Et pour  $i \in I$  on définit

$$S_i = \left( \bigcup_{j \in I \setminus \{0\}, i \not\leq j} V_j \right) / A_i = \left( \bigcup_{j \in I \setminus \{0\}, V_i \not\subset V_j} V_j \right) / A_i.$$

et

$$T_i = \{x \in V/A_i, d(A_i x, S_i) \leq R\}.$$



*Définition 5.1.*  $\pi : X \rightarrow \mathbb{C}^n/G$  est une résolution localement produit si pour tout  $i \in I$ , il y a une résolution  $\pi_i : Y_i \rightarrow W_i/A_i$  (qui sera forcément aussi localement en produit) de  $W_i/A_i$  telle que si on note

$$U_i = (\text{Id} \times \pi_i)^{-1}(T_i) \subset Y_i \times V_i$$

alors il y a un biholomorphisme local  $\psi_i : (Y_i \times V_i) \setminus U_i \rightarrow X$  qui rendent le diagramme suivant commutatif :

$$\begin{array}{ccc} (Y_i \times V_i) \setminus U_i & \xrightarrow{\psi_i} & X \\ \downarrow \text{Id} \times \pi_i & & \downarrow \pi \\ (W_i/A_i) \times V_i \setminus T_i & \xrightarrow{\phi_i} & V/G \end{array}$$

où  $\phi_i$  est l'application naturelle  $\phi_i : (W_i/A_i) \times V_i \rightarrow V/G$ .

Le groupe  $G$  agit naturellement sur  $I, D$ . Joyce montre alors que lorsque  $(X, \pi)$  est une résolution localement en produit de  $V/G$  alors il existe un biholomorphisme  $g : Y_i \rightarrow Y_{g.i}$  qui rend le diagramme suivant commutatif

$$\begin{array}{ccc} Y_i & \xrightarrow{g} & Y_{g.i} \\ \downarrow \pi_i & & \downarrow \pi_{g.i} \\ W_i/A_i & \xrightarrow{g} & W_{g.i}/A_{g.i} \end{array}$$

On peut décrire ce qui se passe en dimension  $n = 3$ . Soit donc  $G \subset SU(3)$  un sous-groupe fini, si  $g \in G \setminus \{\text{Id}\}$  alors on a forcément  $\dim \ker(g - \text{Id}) \leq 1$ . En particulier, si  $I = \{0, 1, \dots, N, \infty\}$  alors on a  $V_i \cap V_j = \{0\}$  si  $i \neq j$  et  $i, j \in \{1, \dots, N\}$ . Ceci signifie exactement que  $\mathbb{S}^5/G$  n'a que des singularités isolées. Notons  $S = \bigcup_{i=1}^N V_i$  et  $S^\varepsilon$  le  $\varepsilon$ -voisinage de  $S$ . La topologie à l'infini de  $X$  est le produit d'une résolution de  $\mathbb{S}^5/G$  avec une demi-droite. Cette résolution de  $\mathbb{S}^5/G$  peut être décrite topologiquement de la façon suivante : notons  $B_i(\varepsilon)$  la boule de rayon  $\varepsilon$  dans  $W_i$  et  $Y_i(\varepsilon) = \pi_i^{-1}(B_i(\varepsilon))$ . Sur  $\mathbb{S}^5 \setminus S^\varepsilon$ , l'action de  $G$  est libre (pourvu que  $\varepsilon > 0$  soit choisi assez petit) et le quotient est difféomorphe à  $\Sigma_0 = (\mathbb{S}^5 \setminus S^\varepsilon)/G$

Supposons que l'action de  $G$  sur  $\{1, \dots, N\}$  ait  $l$  orbites  $GV_1, \dots, GV_l$ . Alors le bord de  $(\mathbb{S}^5 \setminus S^\varepsilon)/G$  a exactement  $l$  composantes connexes chacune difféomorphe à un

$$\begin{aligned} G.(\partial B_i(\varepsilon) \times (V_i \cap \mathbb{S}^5))/G &= (\partial B_i(\varepsilon) \times (V_i \cap \mathbb{S}^5))/N(V_i) \\ &= ((\partial B_i(\varepsilon)/A_i) \times (V_i \cap \mathbb{S}^5))/B_i. \end{aligned}$$

Pour  $i = 1, \dots, l$ , nous notons

$$\begin{aligned} \Sigma_i &= G.(Y_i(\varepsilon) \times (V_i \cap \mathbb{S}^5))/G \\ &= (Y_i(\varepsilon) \times (V_i \cap \mathbb{S}^5))/B_i. \end{aligned}$$

Alors cette résolution de  $\mathbb{S}^5/G$  est difféomorphe à

$$\Sigma_0 \# (\cup_{i \in \{1, \dots, l\}} \Sigma_i)$$

Ou on a recollé chaque  $(\partial B_i(\varepsilon) \times (V_i \cap \mathbb{S}^5))/B_i$  avec

$$(\partial Y_i(\varepsilon) \times (V_i \cap \mathbb{S}^5))/B_i \subset (Y_i(\varepsilon) \times (V_i \cap \mathbb{S}^5))/B_i.$$

### 5.2. Métrique Quasi-Asymptotiquement-Localement-Euclidienne (QALE).

Une métrique Quasi-Asymptotiquement-Localement-Euclidienne (QALE pour faire court) asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  sur une résolution localement en produit  $\pi : X \rightarrow \mathbb{C}^n/G$  est une métrique  $g$  sur  $X$  telle que dans le cadre de la définition précédente  $\psi_i^*g$  soit asymptote à la métrique produit  $g_i \oplus h_i$ , où  $h_i$  est une métrique QALE sur  $Y_i$  et  $h_i$  la métrique euclidienne sur  $V_i$ .

La vitesse à laquelle  $\psi_i^*g$  tend vers la métrique produit dépend des distances à  $S_i$  et à l'origine. Puisque nous intéressons qu'à la classe de quasi isométrie de ces variétés, nous ne retiendrons que  $\psi_i^*g$  est la métrique produit  $g_i \oplus h_i$ .

**5.3. Cas des groupes  $G$  de longueur 2.** Nous intéressons en fait à la classe la plus simple des variétés QALE (après celle où  $G$  agit sans point fixe sur  $\mathbb{S}^{2n-1}$ , la variété étant alors ALE).

*Définition 5.2.* Soit  $G$  un sous groupe de  $SU(n)$ , on appelle longueur de  $G$ ,

$$L(\mathbb{C}^n, G) = \max\{k, \text{ il y a } i_0 < i_1 \dots < i_k, i_j \in I\}.$$

Ainsi la longueur de  $G$  vaut 1 si et seulement si  $S = \{0\}$  i.e. si et seulement si  $G$  agit sans point fixe sur  $\mathbb{S}^{2n-1}$ . Et la longueur de  $G$  vaut 2 si et seulement si les singularités de  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  sont isolées ; par exemple lorsque  $G \subset SU(3)$  ou  $G \subset Sp(2)$ , on a forcément  $L(\mathbb{C}^3, G) \leq 2$ .

Lorsque la longueur de  $G$  vaut 1, une métrique ALE sur une résolution de  $\mathbb{C}^n/G$  est au dehors d'un compact quasi isométrique à une métrique plate sur  $(\mathbb{C}^n \setminus B(R))/G$ .

On peut aussi décrire la géométrie de variétés QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  lorsque la longueur de  $G$  est 2 :

On numérote  $G.V_1, \dots, G.V_l$ , les différentes orbites de  $I \setminus \{0, \infty\}$  sous l'action de  $G$ . Le sous groupe  $A_i$  agit sans point fixe sur  $W_i \setminus \{0\}$  et notons  $\pi_i : Y_i \rightarrow W_i/A_i$  une résolution localement en produit de  $W_i/A_i$ . Si  $y \in Y_i$  on note  $|y| = \|\pi_i(y)\|$  et  $\mathbb{B}$  la boule unité de  $\mathbb{C}^n$ . Chaque  $Y_i$  est donc muni une métrique  $g_i$  plate au dehors d'un compact. On équipe maintenant  $Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B})$  de la métrique produit et on définit

$$C_i = \{(y, v) \in Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B}), |y| \leq 2\varepsilon|v|\}$$

Lorsque  $g \in G$  on a donc une application  $g : C_i \rightarrow C_{g.i}$ , notons  $E_i$  le quotient  $G.C_i/G$ , on a aussi  $E_i = C_i/B_i$ . Soit maintenant

$$E_0 = \left( \mathbb{C}^n \setminus (\mathbb{B} \cup \{v \in \mathbb{C}^n, \exists i d(v, V_i) < \varepsilon d(v, W_i)\}) \right) / G$$

Si on note  $S_i^\varepsilon = \{v \in \mathbb{C}^n, d(v, V_i) \leq \varepsilon\}$  alors  $E_0$  est un bout de cône sur  $(\mathbb{S}^{2n-1} \setminus (\bigcup_{i>1} S_i^\varepsilon)) / G$ . Pour  $\varepsilon$  assez petit les  $S_i^{2\varepsilon}$  sont deux à deux disjoints et à quasi isométrie près nous identifions :

$$X \setminus \pi^{-1}(\mathbb{B}) = \cup_{i=0}^l E_i$$

où

$$E_i \cap E_j = \emptyset, \text{ lorsque } i \neq j \text{ et } i, j \neq 0$$

$$\text{et } E_i \cap E_0 = C_1((S_i^{2\varepsilon} \cap \mathbb{S}^{2n-1}) \setminus S_i^\varepsilon) / G$$

6.  $L^2$  COHOMOLOGIE DES VARIÉTÉS QALE DE RANG 2.

Nous allons maintenant déterminer la cohomologie  $L^2$  des variétés QALE asymptotes à  $\mathbb{C}^n/G$  où  $G \subset \mathrm{SU}(n)$  est tel que le quotient  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  n'a que des singularités isolées. Soit  $X$  une telle variété, rappelons qu'au dehors d'un compact  $K \subset X$ ,  $\mathcal{O} = X \setminus K$  est la réunion de  $E_0, E_1, \dots, E_l$ . Où pour  $\varepsilon > 0$  assez petit :

$E_0$  est un bout de cône sur  $(\mathbb{S}^{2n-1} \setminus S^\varepsilon)/G$  avec  $S = \{v \in \mathbb{C}^n, \exists g \in G \setminus \{\mathrm{Id}\}, gv = v\}$  et  $S^\varepsilon = \{v \in \mathbb{C}^n, d(v, S) < \varepsilon\}$ .

L'ensemble  $S$  est en fait une réunion de sous espace vectoriel de  $\mathbb{C}^n$  ne s'intersectant qu'en  $\{0\}$  et  $G$  agit sur cette famille de sous-espaces vectoriels. On suppose

$$S = \cup_{i=1}^l G.V_i$$

avec

$$G.V_i \cap G.V_j = \{0\} \text{ si } i \neq j.$$

Notons  $W_i = V_i^\perp$ ,  $A_i = \{g \in G, \forall v \in V_i, gv_i = v_i\}$ ,  $N(V_i) = \{g \in G, g(V_i) = V_i\}$  et  $B_i = N(V_i)/A_i$ . Soit  $\pi_i : Y_i \rightarrow W_i/A_i$  une résolution de  $W_i/A_i$  équipée d'une métrique ALE asymptote à  $W_i/A_i$  alors on suppose que  $B_i$  agit sur  $Y_i \times V_i$  et  $E_i = \widehat{E}_i/B_i$  où

$$\widehat{E}_i = \{(y, v) \in Y_i \times V_i, 2\varepsilon < |\pi_i(y)| < 2\varepsilon|v|\}.$$

alors  $E_i \cap E_0$  est quasi isométrique à un bout de cône sur  $(\mathbb{S}_{W_i/A_i} \times \mathbb{S}_{V_i} \times ]\varepsilon, 2\varepsilon]) / B_i$  où on note  $\mathbb{S}_V = \mathbb{S}^{2n-1} \cap V$  la sphère unité d'un sous espace vectoriel  $V \subset \mathbb{C}^n$ .

6.0.1. *La cohomologie de  $X \setminus K$ .* On commence par calculer la cohomologie de  $\mathcal{O} = X \setminus K$ . On sait que  $\mathcal{O}$  se rétracte sur  $\partial K$  et que  $\partial K = \cup_{i=0}^l \Sigma_i$  où  $\Sigma_0 = (\mathbb{S}^{2n-1} \setminus S^\varepsilon)/G$  et  $\Sigma_i = \{(y, v) \in Y_i \times \mathbb{S}_{V_i}, |y| < 2\varepsilon\} / B_i$ . Compte tenu du fait que la cohomologie de la sphère  $\mathbb{S}^{2n-1}$  est nulle en degré  $k \neq 0, 2n-1$ , on a pour les degrés  $k \in ]0, 2n-2[$  :

$$(6.1) \quad H^k(\Sigma_0) \oplus H^k(S)^G \simeq H^k(\partial \Sigma_0).$$

Et compte tenu du fait que  $H^{2n-2}(S) = \{0\}$ , nous obtenons aussi :

$$(6.2) \quad \{0\} \rightarrow H^{2n-2}(\Sigma_0) \rightarrow H^{2n-2}(\partial \Sigma_0) \simeq \mathbb{R}^l \rightarrow H^{2n-1}(\mathbb{S}^{2n-1})^G \simeq \mathbb{R} \rightarrow \{0\}.$$

où si un groupe  $G$  agit linéairement sur un espace vectoriel  $H$  on a noté  $H^G$ , le sous espaces des vecteurs  $G$ -invariants. On utilisera la suite exacte de Mayer-Vietoris :

$$(6.3) \quad \bigoplus_{i=0}^l H^{k-1}(\Sigma_i) \rightarrow H^{k-1}(\partial \Sigma_0) \rightarrow H^k(\partial K) \rightarrow \bigoplus_{i=0}^l H^k(\Sigma_i) \rightarrow H^k(\partial \Sigma_0).$$

Notons  $n_i = \dim V_i$ . Remarquons que  $B_i$  agit trivialement sur la cohomologie de  $\mathbb{S}_{V_i}$  ainsi

$$H^k(S)^G = \bigoplus_{i=1}^l H^k(\mathbb{S}_{V_i})$$

et

$$H^k(\Sigma_i) = H^k(Y_i)^{B_i} \oplus H^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i}.$$

En particulier, l'application  $H^k(\Sigma_i) \rightarrow H^k(\mathbb{S}_{V_i})$  est surjective. Avec (6.1), on en déduit que pour  $k \neq 0, 2n-2, 2n-1$  l'application

$$\bigoplus_{i=0}^l H^k(\Sigma_i) \rightarrow H^k(\partial \Sigma_0)$$

est surjective. Et donc pour  $k \neq 0, 1, 2n - 2, 2n - 1$ , la suite exacte (6.3) implique que

$$\{0\} \rightarrow H^k(\partial K) \rightarrow \bigoplus_{i=0}^l H^k(\Sigma_i) \rightarrow H^k(\partial \Sigma_0) \simeq H^k(\Sigma_0) \bigoplus H^k(S)^G \rightarrow \{0\};$$

ainsi  $H^k(\partial K)$  est isomorphe à

$$\bigoplus_{i=1}^l \ker(H^k(\Sigma_i) \rightarrow H^k(\mathbb{S}_{V_i})^{B_i}) = \bigoplus_{i,k > 2n_i - 1} H^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_i H^k(Y_i)^{B_i}.$$

Pour les degrés  $k = 1, 2n - 2$  : on obtient notamment grâce à (6.2) :

$$H^1(\partial K) \simeq \bigoplus_{i \geq 1} H^1(Y_i)^{B_i}$$

Mais, nous avons toujours  $2n_i - 1 \geq 1$ , en conséquence il est aussi vrai que :

$$H^1(\partial K) \simeq \bigoplus_{i, 1 > 2n_i - 1} H^{1-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_i H^1(Y_i)^{B_i}.$$

Nous obtenons aussi

$$H^{2n-2}(\partial K) \simeq \bigoplus H^{2 \dim Y_i - 1}(Y_i)^{B_i},$$

Mais puisqu'on a toujours  $4 \leq \dim Y_i = 2n - 2n_i \leq 2n - 2$ , il est aussi vrai que

$$H^{2n-2}(\partial K) \simeq \bigoplus_{i, 2n-2 > 2n_i - 1} H^{2n-2-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_i H^{2n-2}(Y_i)^{B_i}.$$

On obtient donc

**Proposition 6.1.** *Pour  $k \notin \{0, 2n - 1\}$*

$$H^k(\mathcal{O}) = H^k(\partial K) = \bigoplus_{i,k > 2n_i - 1} H^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_i H^k(Y_i)^{B_i}.$$

6.0.2. *Cohomologie à poids de  $E_i$ .* Soit  $a, b \in \mathbb{R}$  avec  $|b| \neq \frac{1}{2}$ , nous considérons sur  $\mathcal{O}$  le poids  $\mu(x) = |x|^{2a}(1 + |\log x|)^{2b}$  et  $w(x) = |x|^{-2}(1 + |\log x|)^{-2}$  où si  $\pi : \mathcal{O} \rightarrow \mathbb{C}^n/G$ , on note  $|x| = \|\pi(x)\|$ . Puisque  $E_0, E_0 \cap E_i$  sont des bouts de cônes on sait que l'image de  $d$  y est presque fermée en tout degré et par rapport au poids  $w$ , de plus on connaît leurs cohomologies  $L_\mu^2$ . On traite ici le cas de  $E_i$ . On sait que  $E_i = \widehat{E}_i/B_i$  et puisque  $\mu$  est  $B_i$ -invariant on a aussi :

$$\mathbb{H}_\mu^k(E_i) = \mathbb{H}_\mu^k(\widehat{E}_i)^{B_i}.$$

$\widehat{E}_i$  est une partie de  $Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B})$  (où on a noté  $\mathbb{B}$  la boule unité de  $\mathbb{C}^n$ ). Sur  $\widehat{E}_i$   $\mu$  est comparable à  $\nu(y, v) = \|v\|^{2a}(1 + |\log \|v\|)^{2b}$  et  $w$  à  $w'(y, v) = \|v\|^{-2}(1 + |\log \|v\|)^{-2}$ . Nous commençons par remarquer que (4.13)

$$\mathbb{H}_\nu^k(Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B})) \simeq \bigoplus_{p+q=k} \mathbb{H}^p(Y_i) \otimes \mathbb{H}_\nu^q(V_i \setminus \mathbb{B}).$$

De plus si  $Y_i^\varepsilon = \{y \in Y_i, |y| < \varepsilon\}$  alors puisque l'application  $\mathbb{H}^p(Y_i) \rightarrow \mathbb{H}^p(Y_i^\varepsilon) = H^p(Y_i^\varepsilon)$  est injective (cf. 4.11), il en est de même de l'application

$$\mathbb{H}_\nu^k(Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B})) \rightarrow \mathbb{H}_\nu^k(Y_i^\varepsilon \times (V_i \setminus \mathbb{B})).$$

Ainsi puisque  $Y_i^\varepsilon \times (V_i \setminus \mathbb{B}) \subset \widehat{E}_i \subset Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B})$ , l'application de restriction :

$$\mathbb{H}_\nu^k(Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B})) \rightarrow \mathbb{H}_\nu^k(\widehat{E}_i)$$

est aussi injective.

Soit  $m(y, v) = (|y| + 1)^{-2}(1 + |\log |y||)^{-2}$  alors grâce à (4.13), on sait que si  $\alpha \in B_\mu^k(Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B}))$  alors il y a  $\varphi \in \mathcal{C}_{m, \nu}^{k-1}(Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B}))$  et  $\psi \in \mathcal{C}_{w, \nu}^{k-1}(Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B}))$  tels que

$$\alpha = d\varphi + d\psi$$

On va maintenant utiliser la proposition (3.7) à  $U = \widehat{E}_i$ ,  $U \cup V = Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B})$  et  $U \cap V = \{(y, v) \in Y_i \times (V_i \setminus \mathbb{B}), \varepsilon \|v\| < |y| < 2\varepsilon \|v\|\}$ . Puisque l'image de  $d$  est presque fermée sur  $U \cap V$  et que sur  $\widehat{E}_i$  on a  $w \leq m$ , et que  $U \cap V$  est quasi-isométrique à un bout de cône, on peut grâce à (3.16) appliquer cette proposition (3.7) et la remarque (3.8) qui suit pour affirmer que l'image de  $d$  est presque fermée sur  $\widehat{E}_i$  :

$$d\mathcal{C}^{k-1}(\widehat{E}_i) = B_\mu^k(\widehat{E}_i).$$

De plus si  $(k, -\frac{1}{2}) < (n+a, b)$  alors  $\mathbb{H}_\mu^k(U \cap V) = \{0\}$  ainsi le corollaire (3.9) montre que

$$\mathbb{H}_\mu^k(\widehat{E}_i) = \mathbb{H}_\mu^k(Y_i \times V_i \setminus \mathbb{B}) = \bigoplus_{p+q=k} \mathbb{H}^p(Y_i) \otimes \mathbb{H}_\mu^q(V_i \setminus \mathbb{B}).$$

En prenant, les parties  $B_i$  invariantes de ces espaces et refaisant la même preuve en travaillant relativement à  $\partial\mathcal{O} = \partial K$  on obtient :

**Proposition 6.2.**  $- d\mathcal{C}_{w, \mu}^{k-1}(E_i) = B_\mu^k(E_i)$ , de plus si  $(k, -\frac{1}{2}) < (n+a, b)$  alors

$$\mathbb{H}_\mu^k(E_i) = \mathbb{H}_\mu^k(Y_i \times V_i \setminus \mathbb{B})^{B_i} = \bigoplus_{p+q=k} \mathbb{H}^p(Y_i)^{B_i} \otimes \mathbb{H}_\mu^q(V_i \setminus \mathbb{B})^{B_i}.$$

$$- d\mathcal{C}_{w, \mu}^{k-1}(E_i, \partial\mathcal{O}) = B_\mu^k(E_i, \partial\mathcal{O}), \text{ de plus si } (k, \frac{1}{2}) > (n+a, b) \text{ alors}$$

$$\mathbb{H}_\mu^k(E_i, \partial\mathcal{O}) = \mathbb{H}_\mu^k(Y_i \times V_i \setminus \mathbb{B}, Y_i \times \mathbb{S}_{V_i})^{B_i} = \bigoplus_{p+q=k} \mathbb{H}^p(Y_i)^{B_i} \otimes \mathbb{H}_\mu^q(V_i \setminus \mathbb{B}, \mathbb{S}_{V_i})^{B_i}.$$

**6.1. Cohomologie  $L^2$  de  $\mathcal{O}$ .** On va maintenant déterminer la cohomologie  $L_\mu^2$  de  $\mathcal{O}$ . Pour cela on commence par remarquer que si  $(k, -\frac{1}{2}) < (a, b)$  alors

- $\mathbb{H}_\mu^k(E_0 \cap E_i) = \mathbb{H}_\mu^k(E_0) = \{0\}$ ,
- l'image de  $d$  est presque fermée sur chaque  $E_i$  et sur chaque  $E_0 \cap E_i$ ,
- chaque  $E_0 \cap E_i$  est quasi-isométrique à un bout de cône,

grâce à la proposition (3.16) et la remarque (3.5,ii), on peut appliquer un bout de la suite exacte de Mayer-Vietoris et on obtient :

$$(6.4) \quad \mathbb{H}_\mu^k(\mathcal{O}) \rightarrow \bigoplus_{i=1}^l \mathbb{H}_\mu^k(E_i) \rightarrow \{0\}$$

De plus si  $(k-1, -\frac{1}{2}) < (n+a-1, b-1)$  on a aussi

$$\mathbb{H}_{w\mu}^{k-1}(E_0 \cap E_i) = \{0\}$$

et donc grâce à la proposition (3.6), on sait que l'image de  $d$  est presque fermée en degré  $k$  sur  $\mathcal{O}$  et que

$$\mathbb{H}_\mu^k(\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i=1}^l \mathbb{H}_\mu^k(E_i).$$

De plus lorsque  $(k, \frac{1}{2}) > (n+a, b)$ , alors on a aussi :  $\mathbb{H}_\mu^k(E_0 \cap E_i, \partial\mathcal{O}) = \mathbb{H}_\mu^k(E_0, \partial\mathcal{O}) = \{0\}$  mais dans ce cas là il est aussi vrai que  $(k-1, \frac{1}{2}) > (n+a-1, b-1)$

et donc que  $\mathbb{H}_{w,\mu}^{k-1}(E_0 \cap E_i, \partial\mathcal{O}) = \{0\}$  et la proposition (3.6) nous dit que l'image de  $d$  est presque fermée sur  $(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O})$  et donc

$$\mathbb{H}_{\mu}^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i=1}^l \mathbb{H}_{\mu}^k(E_i, \partial\mathcal{O}).$$

Nous avons donc montré :

**Proposition 6.3.** *i) Si  $(k, \frac{1}{2}) < (n+a, b)$ , alors  $d\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(\mathcal{O}) = B_{\mu}^k(\mathcal{O})$  et*

$$\mathbb{H}_{\mu}^k(\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i=1}^l \mathbb{H}_{\mu}^k(E_i).$$

*ii) Si  $(k, \frac{1}{2}) > (n+a, b)$ , alors  $d\mathcal{C}_{w,\mu}^{k-1}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) = B_{\mu}^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O})$  et*

$$\mathbb{H}_{\mu}^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i=1}^l \mathbb{H}_{\mu}^k(E_i, \partial\mathcal{O}).$$

On s'intéresse plus particulièrement à la cohomologie  $L^2$  de  $\mathcal{O}$  et à la cohomologie  $L_w^2$  de  $\mathcal{O}$ . Mais  $\mathbb{H}^k(V_i \setminus \mathbb{B}) = \{0\}$  sauf si  $k = 2n_i - 1$  et  $n_i = \dim V_i > 1$  auquel cas  $\mathbb{H}^{2n_i-1}(V_i \setminus \mathbb{B}) = \mathbb{R}$  et aussi  $\mathbb{H}^k(V_i \setminus \mathbb{B}, \mathbb{S}V_i) = \{0\}$  sauf si  $n_i = \dim V_i > 1$  et  $k = 1$  auquel cas  $\mathbb{H}^1(V_i \setminus \mathbb{B}) = \mathbb{R}$ . On obtient donc :

i) Pour  $k < n$ , on a  $d\mathcal{C}_{w,1}^{k-1}(\mathcal{O}) = B^k(\mathcal{O})$  et de plus :

$$(6.5) \quad \mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i, n_i > 1} \mathbb{H}^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i}.$$

ii) Pour  $k \geq n$ , on a  $d\mathcal{C}_{w,1}^{k-1}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) = B^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O})$  et

$$(6.6) \quad \mathbb{H}^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i, n_i > 1} \mathbb{H}^{k-1}(Y_i)^{B_i}.$$

Remarquons que l'on a aussi d'après (6.4) une application surjective de  $\mathbb{H}^n(\mathcal{O})$  dans  $\bigoplus_{i, n_i > 1} \mathbb{H}^{n-2n_i+1}(Y_i)^{B_i}$ . Mais par dualité  $\mathbb{H}^n(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O})$  et  $\mathbb{H}^n(\mathcal{O})$  ont même dimension, cette application est donc surjective et ainsi :

$$(6.7) \quad \mathbb{H}^n(\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i \geq 1, n_i > 1} \mathbb{H}^{n-2n_i+1}(Y_i)^{B_i}.$$

On obtient de la même façon :

i) Pour  $k < n$ , on a  $d\mathcal{C}_{w,w}^{k-2}(\mathcal{O}) = B_w^{k-1}(\mathcal{O})$  et

$$(6.8) \quad \mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i \geq 1} \mathbb{H}^{k-2n_i}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_{i, n_i=1} \mathbb{H}^{k-1}(Y_i)^{B_i}.$$

ii) Pour  $k \geq n$ , on a  $d\mathcal{C}_{w,w}^{k-2}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) = B_w^{k-1}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O})$  et

$$(6.9) \quad \mathbb{H}_w^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i \geq 1} \mathbb{H}^{k-2}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_{i, n_i=1} \mathbb{H}^{k-1}(Y_i)^{B_i}.$$

En conséquence pour  $k < n$ , les images de  $d : \mathcal{C}_{w,w}^{k-2}(\mathcal{O}) \rightarrow L_w^2(\Lambda^{k-1}T^*\mathcal{O})$  et de  $d : \mathcal{C}_{w,1}^{k-1}(\mathcal{O}) \rightarrow L^2(\Lambda^k T^*\mathcal{O})$  sont fermées et l'espace  $\mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O})$  est de dimension finie, grâce au théorème (3.15), il en est de même sur toute variété isométrique à  $\mathcal{O}$  au dehors d'un compact ; par exemple pour les degrés  $k < n$ , les images de  $d : \mathcal{C}_{w,1}^{k-1}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) \rightarrow L^2(\Lambda^k T^*\mathcal{O})$  et de  $d : \mathcal{C}_{w,1}^{k-1}(X) \rightarrow L^2(\Lambda^k T^*X)$  sont fermées.

Grâce à la version relative du même théorème, on peut affirmer que pour  $k \geq n$ , les images de  $d : \mathcal{C}_{w,1}^{k-1}(\mathcal{O}) \rightarrow L^2(\Lambda^k T^* \mathcal{O})$  et de  $d : \mathcal{C}_{w,1}^{k-1}(X) \rightarrow L^2(\Lambda^k T^* X)$  sont fermées.

Nous pouvons maintenant déterminer la cohomologie  $L^2$  de  $\mathcal{O}$  en degré  $k \geq n+1$ . En effet, on dispose maintenant de la suite exacte :

$$H^{k-1}(\partial\mathcal{O}) \longrightarrow \mathbb{H}^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) \longrightarrow \mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \longrightarrow H^k(\partial\mathcal{O}) \longrightarrow \mathbb{H}_{1/w}^{k+1}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}).$$

Nos calculs de la cohomologie de  $\partial K$  (6.1) et de la cohomologie  $L^2$  relative de  $\mathcal{O}$  (6.6) montre que la première flèche de cette suite exacte est surjective, nous obtenons donc

$$\mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \simeq \ker \left( H^k(\partial\mathcal{O}) \rightarrow \mathbb{H}_{1/w}^{k+1}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) \right).$$

Puisque pour  $k \in [n+1, 2n-2]$

$$H^k(\partial\mathcal{O}) = \bigoplus_i H^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_i H^k(Y_i)^{B_i}$$

et

$$\mathbb{H}_{1/w}^{k+1}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) = \bigoplus_{i, 2n_i \leq n_i+1} \mathbb{H}^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_{i, 1 < n_i+1} \mathbb{H}^k(Y_i)^{B_i},$$

nous obtenons également :

$$\mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i, n_i > 1} \mathbb{H}^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i}.$$

Pour  $k = 2n-1$ , nous avons alors  $\mathbb{H}_{1/w}^{2n}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) = \{0\}$  et donc

$$\mathbb{H}^{2n-1}(\mathcal{O}) \simeq H^{2n-1}(\mathcal{O}) \simeq \mathbb{R}.$$

On peut maintenant aussi déterminer la cohomologie  $L_w^2$  de  $\mathcal{O}$  pour en degré  $k-1 \geq n$  grâce à la suite exacte :

$$H^{k-2}(\partial\mathcal{O}) \longrightarrow \mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) \longrightarrow \mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}) \longrightarrow H^{k-1}(\partial\mathcal{O}) \longrightarrow \mathbb{H}^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}).$$

Comme précédemment la première flèche de cette suite est surjective et grâce à (6.6), on obtient également :

$$\mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i \geq 1} \mathbb{H}^{k-2n_i}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_{i, n_i=1} \mathbb{H}^{k-1}(Y_i)^{B_i}.$$

Nous avons donc obtenu :

**Proposition 6.4.** *Pour  $k \in [1, 2n-2]$ , la cohomologie  $L^2$  de  $\mathcal{O}$  est donnée par*

$$(6.10) \quad \mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \simeq \bigoplus_{i, n_i > 1} \mathbb{H}^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \simeq \bigoplus_{i, k > 2n_i-1, n_i > 1} H^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i}.$$

Et en degré  $(2n-1)$  :

$$\mathbb{H}^{2n-1}(\mathcal{O}) \simeq H^{2n-1}(\mathcal{O}) \simeq \mathbb{R}.$$

En degré  $k-1 \in [1, 2n-2]$ , la cohomologie  $L_w^2$  de  $\mathcal{O}$  est donnée par :

$$(6.11) \quad \begin{aligned} \mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}) &\simeq \bigoplus_{i \geq 1} \mathbb{H}^{k-2n_i}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_{i, n_i=1} \mathbb{H}^{k-1}(Y_i)^{B_i} \\ &\simeq \bigoplus_{i \geq 1, k > 2n_i-1} H^{k-2n_i}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_{i, n_i=1, k > 1} H^{k-1}(Y_i)^{B_i}. \end{aligned}$$

## 6.2. Cas des résolutions crépantes.

6.2.1. *Cas général.* Supposons que  $X \xrightarrow{\pi} \mathbb{C}^n/G$  soit une résolution crépante. Nous pouvons dans ce cas donner une description explicite de la cohomologie  $L^2$  de  $X$ . En effet, on connaît la cohomologie de  $X$  en fonction des classes de conjugaison de  $G$  : si  $g \in G$  on note  $\text{age}(g) = \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n$  où les valeurs propres de  $g$  sont  $(e^{i2\pi\theta_1}, e^{i2\pi\theta_2}, \dots, e^{i2\pi\theta_n})$  avec  $\theta_i \in [0, 1[$ , puisque  $\det g = 1$  on a forcément  $\text{age}(g) \in \mathbb{N} \cap [0, n[$ , il est aussi clair que  $\text{age}(g)$  ne dépend que de la classe de la conjugaison de  $g$   $[g] \in \mathcal{C}(G)$ . Les résultats de Y. Ito et M. Reid ( $n = 3$ ) et V. Batyrev et indépendamment J. Denef et F. Loeser sont les suivants ([20, 2, 13]) : la cohomologie de  $X$  est nulle en degré impair et en degré pair

$$\dim H^{2k}(X) = \text{card}\{[g] \in \mathcal{C}(G), \text{age}(g) = k\}.$$

Notre résultat est le suivant :

**Théorème 6.5.** *Soit  $G \subset \text{SU}(n)$  un sous groupe fini, on suppose que  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  le quotient de la sphère par  $G$  soit à singularités isolées. Si  $X \xrightarrow{\pi} \mathbb{C}^n/G$  une résolution crépante de  $\mathbb{C}^n/G$  équipée d'une métrique QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  alors*

$$\mathbb{H}^k(X) \simeq \text{Im} (H_c^k(X) \rightarrow H^k(X)).$$

*Démonstration.* Nous avons obtenu la suite exacte suivante :

(6.12)

$$H^{k-1}(K) \oplus \mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}^{k-1}(\partial K) \xrightarrow{b} \mathbb{H}^k(X) \xrightarrow{r^*} H^k(K) \oplus \mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \xrightarrow{\delta} H^k(\partial K).$$

**Si  $k$  est pair :** Alors puisque les  $Y_i$  sont des résolutions crépantes de  $W_i/A_i$ , elles n'ont de cohomologie qu'en degré pair ainsi d'après (6.10) et (4.11) on a forcément  $\mathbb{H}^k(\mathcal{O}) = \{0\}$ ; de plus d'après (6.11), on sait que

$$\mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}) = \bigoplus_{i \geq 1} \mathbb{H}^{k-2n_i}(Y_i)^{B_i}$$

et aussi (6.1) :

$$H^{k-1}(\partial K) \simeq \bigoplus_{i \geq 1, k > 2n_i} H^{k-2n_i}(Y_i)^{B_i}.$$

Or lorsque  $l > 0$ ,  $\mathbb{H}^l(Y_i) = H^l(Y_i)$ , on obtient donc l'isomorphisme :

$$\mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}) \simeq H^{k-1}(\partial K).$$

La suite exacte (6.12) se réduit à :

$$\{0\} \rightarrow \mathbb{H}^k(X) \rightarrow H^k(K) \rightarrow H^k(\partial K),$$

Donc  $\mathbb{H}^k(X)$  est isomorphe au noyau de  $H^k(K) \rightarrow H^k(\partial K)$  qui est exactement l'image de  $H^k(K, \partial K) \rightarrow H^k(K)$ . Puisque  $X$  se rétracte sur  $K$ , on a bien démontré le résultat.

**Si  $k$  est impair :** Dans ce cas on sait  $H^k(K) = \{0\}$  et  $H^k(K, \partial K) = \{0\}$  donc

$$H^{k-1}(K) \rightarrow H^{k-1}(\partial K) \rightarrow \{0\}$$

De la suite exacte (6.12), il ne reste que

$$\{0\} \rightarrow \mathbb{H}^k(X) \rightarrow \mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \rightarrow H^k(\partial K).$$

Or

$$\mathbb{H}^k(\mathcal{O}) = \bigoplus_{i \geq 1, n_i > 1} \mathbb{H}^{k-2n_i-1}(Y_i)^{B_i}$$



et

$$H^k(\partial K) = \bigoplus_{i \geq 1, k > 2n_i - 1} H^{k-2n_i-1}(Y_i)^{B_i},$$

Sauf pour  $k = 2n - 1$  où  $\mathbb{H}^{2n-1}(\mathcal{O}) \simeq \mathbb{H}^{2n-1}(\partial K)$ . La dernière flèche de cette suite est donc injective ; la cohomologie  $L^2$  de  $X$  est donc nulle.  $\square$

On peut étudier maintenant étudier deux cas particuliers :

6.2.2. *le cas particulier où  $G \subset \text{SU}(3)$ .* On suppose ici que  $G$  est un sous groupe fini de  $\text{SU}(3)$ , alors  $\mathbb{C}^3/G$  admet toujours des résolutions crépantes et soit  $X \xrightarrow{\pi} \mathbb{C}^3/G$  l'une d'entre elles. Lorsque  $g \in G$ , on a forcément

$$\dim \ker(g - \text{Id}) \in \{0, 1, 3\}$$

et donc le lieu singulier de  $\mathbb{S}^5/G$  est une réunion disjointes de cercles. En particulier, si  $K = \pi^{-1}(\mathbb{B})$  et  $\mathcal{O} = X \setminus K$  alors pour  $k \leq 3$  :  $\mathbb{H}^k(\mathcal{O}) = \{0\}$  et pour  $k \geq 3$   $\mathbb{H}^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) = \{0\}$ . Puisque  $d\mathcal{C}^{k-1}(\mathcal{O}) = Z^k(\mathcal{O})$  pour  $k \leq 3$ , on en déduit facilement que l'application naturelle  $H_c^k(X) \rightarrow \mathbb{H}^k(X)$  est surjective pour  $k \leq 3$ . Puisque  $\mathcal{O}$  est connexe et que  $H^1(\mathcal{O}) = \{0\}$ , le lemme (2.1) de [10] montre que cette application est aussi injective pour  $k \leq 2$ . De plus, puisque pour  $k \geq 3$   $\mathbb{H}^k(\mathcal{O}, \partial\mathcal{O}) = \{0\}$ , le lemme (2.2) de [10] implique que l'application  $\mathbb{H}^k(X) \rightarrow H^k(X)$  est injective pour  $k \geq 3$  ; on en déduit immédiatement :

**Théorème 6.6.** *Soit  $G \subset \text{SU}(3)$  un sous-groupe fini et  $\pi : X \rightarrow \mathbb{C}^3/G$  une résolution crépante, on équipe  $X$  d'une métrique QALE alors*

$$\mathbb{H}^k(X) = \begin{cases} \{0\} & \text{si } k \neq 2, 4 \\ H_c^2(X) \simeq \text{Im}(H_c^2(X) \rightarrow H^2(X)) & \text{si } k = 2 \\ H^4(X) \simeq \text{Im}(H_c^4(X) \rightarrow H^4(X)) & \text{si } k = 4 \end{cases}.$$

En général, pour toute variété  $(M, g)$  isométrique au dehors d'un compact avec  $X$  alors

$$\mathbb{H}^k(M) = \begin{cases} H_c^k(M) & \text{si } k \leq 2 \\ \text{Im}(H_c^3(M) \rightarrow H^3(M)) & \text{si } k = 3 \\ H^k(M) & \text{si } k \geq 4 \end{cases}.$$

On revient au cas de  $X$  une résolution crépante de  $\mathbb{C}^3/G$  :

$$\chi_{L^2}(X) = \sum_{l=0}^6 (-1)^l \dim \mathbb{H}^l(X) = 2 \dim \mathbb{H}^4(X) = 2 \text{card}\{[g] \in \mathcal{C}(G), \text{age}(g) = 2\}.$$

Mais on a toujours

$$\text{age}(g) + \text{age}(g^{-1}) = 3 - \dim \ker(g - \text{Id}),$$

ainsi

$$\ker(g - \text{Id}) \neq \{0\} \Leftrightarrow \text{age}(g) = \text{age}(g^{-1}) = 1$$

et

$$\ker(g - \text{Id}) = \{0\} \Leftrightarrow \{\text{age}(g), \text{age}(g^{-1})\} = \{1, 2\}.$$

On a donc montré le résultat suivant

**Corollaire 6.7.**

$$\chi_{L^2}(X) = \dim \mathbb{H}^2(X) + \dim \mathbb{H}^4(X) = \text{card}\{[g] \in \mathcal{C}(G), \ker(g - \text{Id}) = \{0\}\}.$$

Considérons l'exemple 9.3.5 du livre de D. Joyce :  $G \simeq \mathbb{Z}_4$  est le groupe engendré par  $(z_1, z_2, z_3) \mapsto (-z_1, iz_2, iz_3)$ . Si  $X$  est la résolution crépante de  $\mathbb{C}^3/G$  équipée d'une métrique QALE alors :

$$\dim \mathbb{H}^2(X) = \dim \mathbb{H}^4(X) = 1$$

Si on considère l'exemple 9.3.6 de ce même livre :  $G = \mathbb{Z}_2^2$  est le sous groupe de  $SU(3)$  formé par les matrices diagonales à entrée  $\pm 1$ . Dans ce cas tous les éléments de  $G$  fixe au moins une droite de  $\mathbb{C}^3$  et donc les résolutions crépantes de  $\mathbb{C}^3/G$  ne portent pas de formes harmoniques  $L^2$ .

6.2.3. *le cas particulier où  $G \subset Sp(2)$ .* Soit donc  $G$  un sous groupe fini de  $Sp(2)$  et  $X \xrightarrow{\pi} \mathbb{C}^n/G$  une résolution crépante<sup>5</sup>. Mais la dimension du noyau d'un élément de  $G$  est 0, 2 ou 4. Puisque que les variétés ALE hyperkählerienne de dimension complexe 2 ne portent des formes harmoniques  $L^2$  qu'en degré 2 et qu'en ce degré la cohomologie  $L^2$  est la cohomologie ordinaire, on obtient que pour

$$k \neq 5, 7 \quad \mathbb{H}^k(\mathcal{O}) = \mathbb{H}_w^k(\mathcal{O}) = \{0\} \quad \text{et} \quad \mathbb{H}^5(\mathcal{O}) = \mathbb{H}_w^5(\mathcal{O}) = \bigoplus_{i \geq 1} H^2(Y_i)^{B_i}.$$

Pour la cohomologie ordinaire de  $\mathcal{O}$  on sait que :  $H^k(\mathcal{O}) = \{0\}$  pour  $k = 3, 4, 6, 8$  et de plus  $H^5(\mathcal{O}) = \bigoplus_{i \geq 1} H^2(Y_i)^{B_i} \simeq \mathbb{H}^5(\mathcal{O})$  et aussi  $H^7(\mathcal{O}) \simeq \mathbb{H}^7(\mathcal{O})$ . Grâce à nos suites exactes de Mayer-Vietoris, on obtient alors facilement :  $\mathbb{H}^k(X) = H^k(X)$  dès que  $k \geq 4$ . En fait cette analyse est valide pour toute variété isométrique au dehors d'un compact avec  $X$ , on obtient donc :

**Théorème 6.8.** *Soit  $G \subset Sp(2)$  un sous-groupe fini et  $\pi : X \rightarrow \mathbb{C}^4/G$  une résolution crépante, on équipe  $X$  d'une métrique QALE alors*

$$\mathbb{H}^k(X) = \begin{cases} \{0\} & \text{si } k \neq 2, 4, 6 \\ H_c^2(X) \simeq \text{Im}(H_c^2(X) \rightarrow H^2(X)) & \text{si } k = 2 \\ H^4(X) \simeq H_c^4(X) \simeq H^4(X) & \text{si } k = 4 \\ H^6(X) \simeq \text{Im}(H_c^6(X) \rightarrow H^6(X)) & \text{si } k = 6 \end{cases}.$$

En général, pour toute variété  $(M, g)$  isométrique au dehors d'un compact avec  $X$  alors

$$\mathbb{H}^k(M) = \begin{cases} H_c^k(M) & \text{si } k \leq 4 \\ H^k(M) & \text{si } k \geq 4 \end{cases}.$$

Remarquons que si une résolution crépante de  $\mathbb{C}^4/G$  n'existe pas toujours, il existe toujours une résolution crépante de  $(\mathbb{C}^4 \setminus \mathbb{B})/G$ .

Revenons maintenant au cas d'une résolution crépante de  $\mathbb{C}^4/G$ . Lorsque  $g \in Sp(2)$  on a de même :

$$\text{age}(g) + \text{age}(g^{-1}) = 4 - \dim \ker(g - \text{Id}).$$

En conséquence on a aussi

$$\dim \ker(g - \text{Id}) = \{2\} \Leftrightarrow \text{age}(g) = \text{age}(g^{-1}) = 1.$$

Et puisque  $\dim \mathbb{H}^2(X) = \dim \mathbb{H}^6(X) = \text{card}\{[g] \in \mathcal{C}(D), \text{age}(g) = 3\}$  et  $\dim \mathbb{H}^4(X) = \dim H^4(X) = \text{card}\{[g] \in \mathcal{C}(D), \text{age}(g) = 2\}$  on obtient encore :

<sup>5</sup>Cela n'existe pas forcément.

**Corollaire 6.9.**

$$\begin{aligned}\chi_{L^2}(X) &= \dim \mathbb{H}^2(X) + \dim \mathbb{H}^4(X) + \dim \mathbb{H}^6(X) \\ &= \text{card}\{[g] \in \mathcal{C}(G), \ker(g - \text{Id}) = \{0\}\}.\end{aligned}$$

Étudions maintenant les exemples du livre de D. Joyce : le premier (exemple 9.3.9) est le schéma de Hilbert de 3 points sur  $\mathbb{C}^2$ . Dans ce cas  $G$  est le groupe  $S_3$  des permutations de  $\{1, 2, 3\}$  agissant sur  $\{(x, y, z) \in \mathbb{C}^3, x+y+z=0\} \simeq \mathbb{C}^4$ . Ce schéma de Hilbert de 3 points sur  $\mathbb{C}^2$  peut être muni d'une métrique hyperkählerienne QALE et alors la variété obtenue ne porte de formes harmoniques  $L^2$  qu'en degré 4 où cet espace est de dimension 1.

Le deuxième exemple est en fait le schéma de Hilbert de 2 points sur une surface hyperkählerienne ALE, le groupe  $G$  en question est le produit semi-direct de  $\mathbb{Z}_2$  avec le produit  $H \times H$  où  $H$  est un sous-groupe de  $\text{SU}(2) = \text{Sp}(1)$ . Dans ce cas si  $Y$  est la résolution crépante de  $\mathbb{C}^2/H$ , ce Schéma de Hilbert  $\text{Hilb}^2(Y)$  ne porte de formes harmoniques  $L^2$  qu'en degré 4 et

$$\dim \mathbb{H}^4(\text{Hilb}^2(Y)) = \frac{b_2(Y)(b_2(Y) + 1)}{2}.$$

**6.3. Le cas général.** Nous allons maintenant donner une interprétation topologique des espaces de formes harmoniques  $L^2$  des variétés QALE. La réponse est ici moins lisible que pour les résolutions crépantes car on ne connaît pas la cohomologie des résolutions localement en produit de  $\mathbb{C}^n/G$ . Soit donc  $X$  une variété QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  où  $G$  est un sous groupe de  $\text{SU}(n)$  tel que  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  soit à singularités isolés. Nos résultats précédents impliquent que la suite exacte courte suivante est valide :

$$H^{k-1}(K) \oplus \mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}) \xrightarrow{\delta} \mathbb{H}^{k-1}(\partial K) \xrightarrow{b} \mathbb{H}^k(X) \xrightarrow{r^*} H^k(K) \oplus \mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \xrightarrow{\delta} H^k(\partial K).$$

On peut déjà déterminer la cohomologie  $L^2$  de  $X$  en degré 1 : nous avons en effet  $\mathbb{H}_w^0(\mathcal{O}) = \{0\}$  et

$$\mathbb{H}^1(\mathcal{O}) = \bigoplus_{1 > 2n_i - 1, n_i > 1} \mathbb{H}^{2-2n_i}(Y_i) = \{0\};$$

On conclut comme dans la preuve du théorème (4.10) que

$$\mathbb{H}^1(X) \simeq H_c^1(X).$$

De la même façon, nous obtenons :

$$\mathbb{H}^{2n-1}(X) \simeq H^{2n-1}(X).$$

On va grâce à cette suite interpréter  $\mathbb{H}^k(X)$  à l'aide de la cohomologie d'un sous complexe de  $C^\infty(\Lambda^k T^*K)$ . Notons

$$Y = \bigcup_{i, n_i > 1} Y_i/B_i$$

et

$$Y_P = \bigcup_i Y_i/B_i \cup \bigcup_{i, n_i=1} (Y_i \times \mathbb{S}_{V_i})/B_i$$

on dispose d'applications

$$f : Y \rightarrow \partial K \subset K \quad \text{et} \quad f_P : Y_P \rightarrow \partial K \subset K.$$

On note  $H^\bullet(K, \ker f^*)$  (resp.  $H^\bullet(K, \ker f_P^*)$ ) la cohomologie du sous complexe de  $C^\infty(\Lambda^\bullet T^*K)$  formé par les formes nulles lorsqu'elle sont tirées en arrière par  $f$  (resp.  $f_P$ ). Notre résultat est le suivant :

**Proposition 6.10.** *Pour  $k \in [3, 2n - 2]$ , nous avons l'isomorphisme*

$$\mathbb{H}^k(X) \simeq \text{Im} (H^k(K, \ker f_P^*) \rightarrow H^k(K, \ker f^*)).$$

*Démonstration.* Soit  $U \simeq [0, 1[\times \partial K$  un voisinage tubulaire de  $\partial K$  dans  $\bar{\mathcal{O}}$ , le bord de  $U$  est constitué de deux copies de  $K$ , on suppose que le bord de  $D := K \cup U$  est  $\{1\} \times \partial K$ , on peut aussi considérer les applications  $f : Y \rightarrow \partial D$  et  $f_P : Y_P \rightarrow \partial D$  et on a évidemment :

$$H^k(D, \ker f^*) \simeq H^k(K, \ker f^*) \quad \text{et} \quad H^k(D, \ker f_P^*) \simeq H^k(K, \ker f_P^*).$$

On peut aussi calculer la cohomologie du complexe des formes différentielles sur  $U$  dont le tiré en arrière par  $f$  (ou par  $f_P$ ) de leur restriction à  $\{1\} \times \partial K$  est nulle. En effet, on dispose des suites exactes :

$$(6.13) \quad H^{k-1}(U) \rightarrow H^{k-1}(Y) \rightarrow H^k(U, \ker f^*) \rightarrow H^k(U) \rightarrow H^k(Y)$$

$$(6.14) \quad H^{k-1}(U) \rightarrow H^{k-1}(Y_P) \rightarrow H^k(U, \ker f_P^*) \rightarrow H^k(U) \rightarrow H^k(Y_P).$$

Notre calcul de la cohomologie de  $U$  (6.1) pour les degrés  $k \in [1, 2n - 2]$

$$H^k(U) \simeq \bigoplus_{i, k > 2n_i - 1} H^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_i H^k(Y_i)^{B_i}$$

et les isomorphismes

$$H^k(Y) = \bigoplus_{i, n_i > 1} H^k(Y_i)^{B_i} \quad \text{et} \quad H^k(Y_P) = \bigoplus_{i, n_i = 1} H^{k-1}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_i H^k(Y_i)^{B_i}$$

impliquent que la première flèches de la suite (6.13) est surjective dès que  $k \geq 2$  ainsi dans ces degrés :

$$(6.15) \quad \begin{aligned} H^k(U, \ker f^*) &\simeq \ker (H^k(U) \rightarrow H^k(Y)) \\ &\simeq \bigoplus_{i, k > 2n_i - 1} H^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \oplus \bigoplus_{i, n_i = 1} H^k(Y_i)^{B_i} \end{aligned}$$

De même pour  $k \geq 3$ , la première flèches de la suite (6.13) est surjective, on obtient donc pour  $k \in [3, 2n - 2]$  :

$$(6.16) \quad \begin{aligned} H^k(U, \ker f_P^*) &\simeq \ker (H^k(U) \rightarrow H^k(Y_P)) \\ &\simeq \bigoplus_{i, k > 2n_i - 1, n_i > 1} H^{k-2n_i+1}(Y_i)^{B_i} \end{aligned}$$

Mais on sait que pour  $k \neq 0$  alors  $\mathbb{H}^k(Y_i) = H^k(Y_i)$ . Ainsi si on compare (6.15) avec (6.10) on obtient pour  $k \in [3, 2n - 2]$  :

$$(6.17) \quad \mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \simeq H^k(U, \ker f_P^*)$$

et en comparant (6.16) avec (6.11), on obtient pour  $k \in [3, 2n - 2]$  :

$$(6.18) \quad \mathbb{H}_w^{k-1}(\mathcal{O}) \simeq H^{k-1}(U, \ker f^*).$$

Puisque  $Y \subset Y_P$  nos obtenons le diagramme commutatif suivant où les flèches horizontales sont exactes :

$$\begin{array}{ccccccc}
H^{k-1}(K) \oplus H^{k-1}(U, \ker f_P^*) & \longrightarrow & H^{k-1}(U) & \longrightarrow & & & \\
\downarrow & & \downarrow & & & & \\
H^{k-1}(K) \oplus H^{k-1}(U, \ker f^*) & \longrightarrow & H^{k-1}(U) & \longrightarrow & & & \\
\longrightarrow & H^k(D, \ker f_P^*) & \longrightarrow & H^k(K) \oplus H^k(U, \ker f_P^*) & \longrightarrow & H^k(U) & \\
\downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\
\longrightarrow & H^k(D, \ker f^*) & \longrightarrow & H^k(K) \oplus H^k(U, \ker f^*) & \longrightarrow & H^k(U) & 
\end{array}$$

De plus nos calculs montrent que les première et quatrième flèches verticales sont injectives et les deuxième et dernière flèches verticales sont des isomorphismes. Alors on se sert du lemme suivant qu'on montrera un peu plus loin :

**Lemme 6.11.** *Dans le diagramme commutatif suivant :*

$$\begin{array}{ccccccccc}
A & \longrightarrow & B & \longrightarrow & C & \longrightarrow & D & \longrightarrow & E \\
\downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
A' & \longrightarrow & B' & \longrightarrow & C' & \longrightarrow & D' & \longrightarrow & E'
\end{array}$$

on suppose que les flèches horizontales sont exactes, que les quatrième et dernière flèches verticales sont injectives et que la deuxième flèche verticale est surjective alors la suite suivante est exacte :

$$A' \rightarrow B' \simeq \text{Im}(B \rightarrow B') \rightarrow \text{Im}(C \rightarrow C') \rightarrow D \simeq \text{Im}(D \rightarrow D') \rightarrow E \simeq \text{Im}(E \rightarrow E').$$

Pour en déduire que la suite suivante est exacte :

$$\begin{aligned}
& H^{k-1}(K) \oplus H^{k-1}(U, \ker f^*) \rightarrow H^{k-1}(U) \rightarrow \\
& \rightarrow \text{Im} [H^k(D, \ker f_P^*) \rightarrow H^k(D, \ker f^*)] \rightarrow H^k(K) \oplus H^k(U, \ker f_P^*) \rightarrow H^k(U)
\end{aligned}$$

En comparant cette suite exacte à notre suite exacte :

$$H^{k-1}(D) \oplus H_w^{k-1}(\mathcal{O}) \rightarrow H^{k-1}(U) \rightarrow \mathbb{H}^k(X) \rightarrow H^k(D) \oplus \mathbb{H}^k(\mathcal{O}) \rightarrow H^k(U),$$

à l'aide des isomorphismes (6.17,6.18), on en déduit l'isomorphisme voulu.  $\square$

Prouvons maintenant le lemme (6.11).

*Démonstration.* Donnons des noms aux différentes flèches de ce diagramme commutatif :

$$\begin{array}{ccccccccc}
A & \xrightarrow{\varphi_1} & B & \xrightarrow{\varphi_2} & C & \xrightarrow{\varphi_3} & D & \xrightarrow{\varphi_4} & E \\
\downarrow f_0 & & \downarrow f_1 & & \downarrow f_2 & & \downarrow f_3 & & \downarrow f_4 \\
A' & \xrightarrow{\varphi'_1} & B' & \xrightarrow{\varphi'_2} & C' & \xrightarrow{\varphi'_3} & D' & \xrightarrow{\varphi'_4} & E'
\end{array}$$

Puisque  $f_4$  est injectif, nous avons :

$$\ker f_4 \circ \varphi_4 = \ker \varphi_4 = \ker \varphi'_4 \circ f_3$$

et donc

$$\ker \varphi'_4 \cap \text{Im } f_3 = f_3(\ker \varphi_4) = f_3(\text{Im } \varphi_3) = \text{Im } \varphi'_3 \circ f_2.$$

Ceci montre l'exactitude de la dernière flèche.

Remarquons que puisque  $f_1$  est surjectif, l'image de  $\varphi'_2$  est forcément incluse dans l'image de  $f_2$ , elle est en fait égale à l'image de  $f_2 \circ \varphi_2$ . Et donc de la suite exacte  $A' \rightarrow B' \rightarrow C'$ , on en extrait la suite exacte  $A' \rightarrow B' \rightarrow \text{Im } f_2$ .

Nous obtenons également :

$$\ker \varphi'_3 \cap \text{Im } f_2 = f_2(\ker \varphi_3) = f_2(\text{Im } \varphi_2) = \text{Im } \varphi'_2 \circ f_1 = \text{Im } \varphi'_2.$$

□

Il ne reste que le cas de degré 2. Dans ce cas, on sait aussi que

$$\mathbb{H}_w^1(\mathcal{O}) = \bigoplus_{i, n_i=1} \mathbb{H}^1(Y_i)^{B_i} \quad \text{et} \quad \mathbb{H}^2(\mathcal{O}) = \bigoplus_{i, 3-2n_i > 1, n_i > 1} \mathbb{H}^{3-2n_i}(Y_i)^{B_i} = \{0\}.$$

Un petit calcul montre que la cohomologie de  $U$  relative à  $Z = \partial K \setminus (\bigcup_{i, n_i=1} (Y_i \times \mathbb{S}_{V_i})/B_i)$  vaut en degré 1 :

$$H^1(U, Z) = \bigoplus_{i, n_i=1} H^1(Y_i)^{B_i}.$$

Les mêmes arguments montrent à l'aide du lemme (6.11) que

$$\mathbb{H}^2(X) \simeq \text{Im} [H^2(D, \partial K) \rightarrow H^2(D, Z)].$$

Ainsi nous avons obtenu :

**Théorème 6.12.** *Soit  $(X, g)$  une variété QALE asymptote à  $\mathbb{C}^n/G$  où  $G \subset \text{SU}(n)$  est telle que les singularités de  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  soient isolées alors*

$$\mathbb{H}^k(X) \simeq \begin{cases} H^k(K, \partial K) \simeq H_c^k(X) & \text{si } k \leq 1 \\ \text{Im} (H^2(D, \partial K) \rightarrow H^2(D, Z)) & \text{si } k = 2 \\ \text{Im} (H^k(K, \ker f_P^*) \rightarrow H^k(K, \ker f^*)) & \text{si } k \in [3, 2n-2] \\ H^k(K) \simeq H^k(X) & \text{si } k \geq 2n-1 \end{cases}$$

Si de plus la dimension des singularités est supérieure ou égale à 3 alors :

$$\mathbb{H}^k(X) \simeq \begin{cases} H^k(K, \partial K) \simeq H_c^k(X) & \text{si } k \leq 2 \\ H^k(K, \ker f^*) & \text{si } k \in [3, 2n-2] \\ H^k(K) \simeq H^k(X) & \text{si } k \geq 2n-2 \end{cases}$$

**6.4. Cohomologie  $L^2$  à poids.** En fait, nous pouvons pratiquement identifier la cohomologie  $L^2$  à poids des variétés QALE asymptotes à  $\mathbb{C}^n/G$  où les singularités de  $\mathbb{S}^{2n-1}/G$  sont isolés. En particuliers, on obtient lorsque  $a > n$

$$\mathbb{H}_\mu^k(X) \simeq H_c^k(X)$$

et pour  $a < -n$ ,

$$\mathbb{H}_\mu^k(X) \simeq H^k(X).$$

#### RÉFÉRENCES

- [1] M.F. Atiyah, V.K. Patodi, I.M. Singer, Spectral asymmetry and Riemannian geometry I, *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.* **77** (1975), 43–69.
- [2] V. Batyrev, Non-Archimedean integrals and stringy Euler numbers of log-terminal pairs, *J. Eur. Math. Soc.* **1** (1999), 5–33.
- [3] A. Borel,  $L^2$  cohomology and intersection cohomology of certain arithmetic varieties, *Emmy Noether in Bryn Mawr* (Bryn Mawr, Pa. 1982), Springer, New-York, 1983, 119–131.
- [4] A. Borel, W. Casselman, Cohomologie d'intersection et  $L^2$  cohomologie des variétés arithmétiques de rang rationnels 2, *C.R. Acad. Sci. Paris Sér. I Math.* **301** (1985) no 7, 369–373.

- [5] J.Brüning, M. Lesch, Hilbert complexes. *J. Funct. Anal.* **108** (1992), no. 1, 88–132.
- [6] J. Cao, F. Xavier, Kähler parabolicity and the Euler number of compact manifolds of non-positive sectional curvature. *Math. Ann.* **319** (2001), no. 3, 483–491.
- [7] G. Carron,  $L^2$ -cohomologie et inégalités de Sobolev, *Math. Ann.* **314** (1999), no. 4, 613–639.
- [8] G. Carron, Théorèmes de l'indice sur les variétés non-compactes, *J. Reine Angew. Math.*, **541** (2001), 81-115.
- [9] G. Carron,  $L^2$ -cohomology of manifolds with flat ends, *Geom. Funct. Anal.* **13** (2003), no. 2, 366–395.
- [10] G. Carron,  $L^2$  cohomologie et parabolicité prépublication 2004, ArXiv math.DG/0407163.
- [11] J. Cheeger, On the Hodge theory of Riemannian pseudomanifolds. Geometry of the Laplace operator (Proc. Sympos. Pure Math., Univ. Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1979), pp. 91–146, Proc. Sympos. Pure Math., XXXVI, Amer. Math. Soc., Providence, R.I., 1980.
- [12] E.B. Davies, A review of Hardy inequalities. The Maz'ya anniversary collection, Vol. 2 (Rostock, 1998), 55–67, *Oper. Theory Adv. Appl.*, **110**, Birkhäuser, Basel, 1999.
- [13] J. Denef, F. Loeser, Motivic integration, quotient singularities and the McKay correspondence. *Compositio Math.* **131** (2002), no. 3, 267–290.
- [14] M. Gromov, Kähler hyperbolicity and  $L_2$ -Hodge theory, *J. Differential Geom.*, **33** (1991), 263-292.
- [15] T. Hausel, E. Hunsicker, R. Mazzeo, Hodge cohomology of gravitational instantons, *Duke Math. J.* **122** (2004), no. 3, 485–548.
- [16] N. Hitchin,  $L^2$ -cohomology of hyperkähler Quotient, *Comm. Math. Phys.* **211** (2000), 153–165.
- [17] L. Hörmander,  $L^2$  estimates and existence theorems for the  $\bar{\partial}$  operator, *Acta Math.*, **113**(1965), 89-152.
- [18] L. Hörmander, An introduction to complex analysis in several variables. D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton, N.J.-Toronto, Ont.-London (1966).
- [19] L. Hörmander, the Analysis of linear partial differential operators. III. Springer-Verlag de Berlin (1994) Grundlehren der mathematischen wissenschaften 274.
- [20] Y.Ito, M. Reid, The McKay correspondence for finite subgroups of  $SL(3, \mathbb{C})$ . Higher-dimensional complex varieties (Trento, 1994), 221-240, de Gruyter, Berlin, 1996.
- [21] J.Jost, K. Zuo, Vanishing theorems for  $L^2$ -cohomology on infinite coverings of compact Kähler manifolds and applications in algebraic geometry, *Comm. Anal. Geom.* **8** (2000), no. 1, 1–30.
- [22] D. Joyce, Compact manifolds with special holonomy, Oxford University Press (2000) Oxford Mathematical Monographs.
- [23] P. Li, On the structure of complete Kähler manifolds with nonnegative curvature near infinity, *Invent. Math.* **99** (1990), no. 3, 579–600.
- [24] E. Looijenga,  $L^2$ -cohomology of locally symmetric varieties, *Compositio Math.* **67** (1998), 3–20.
- [25] J. Lott,  $L^2$ -cohomologie of geometrically infinite hyperbolic 3-Manifold, *Geom. Funct. Anal.* **7**(1997), 81–119.
- [26] J. McNeal,  $L^2$  harmonic forms on some complete Kähler manifolds, *Math. Ann.* **323** (2002), no. 2, 319–349.
- [27] R. Mazzeo, The Hodge cohomology of a conformally compact metric, *J. Differential Geom.*, **28** n°2 (1988), 309-339.
- [28] R. Mazzeo, R. Melrose, Pseudodifferential operators on manifolds with fibred boundaries, in "Mikio Sato : a great Japanese mathematician in the twentieth century", *Asian. J. Math.* **2**, (1998), n0 4,833-866.
- [29] R. Mazzeo, R. S. Phillips, Hodge theory on hyperbolic manifolds, *Duke Math. J.* **60** n°2 (1990), 509-559.

- [30] R. Mazzeo, A. Vasy, Resolvents and Martin boundaries of product spaces. *Geom. Funct. Anal.* **12** (2002), no. 5, 1018–1079.
- [31] R. Melrose, Spectral and scattering theory for the Laplacian on asymptotically Euclidean spaces. Ikawa, Mitsuru (ed.), Spectral and scattering theory. Proceedings of the Taniguchi international workshop, held at Sanda, Hyogo, Japan. Basel : Marcel Dekker. Lect. Notes Pure Appl. Math. **161** ,(1994), 85-130.
- [32] H. Nakajima, Lectures on Hilbert schemes of points on surfaces. American Mathematical Society, Providence, RI, 1999.
- [33] N. Nekrasov, A. Schwarz, Instantons on noncommutative  $\mathbb{R}^4$ , and  $(2, 0)$  superconformal six-dimensional theory. *Comm. Math. Phys.* **198** (1998), no. 3, 689–703.
- [34] B. Opic, A. Kufner, Hardy-type inequalities. Pitman Research Notes in Mathematics Series, 219. Longman Scientific & Technical, Harlow, 1990.
- [35] L. Saper, M. Stern,  $L_2$ -cohomology of arithmetic varieties, *Ann. Math.* **132** (1990) No.1, pp 1-69.
- [36] G. Segal, A. Selby, The cohomology of the space of magnetic monopoles. *Comm. Math. Phys.* **177** (1996), no. 3, 775–787.
- [37] A. Sen , Dyon-monopole bound states, selfdual harmonic forms on the multi-monopole moduli space and  $SU(2, \mathbb{Z})$ -invariance of string theory, *Phys. Lett.* **B. 329** (1994) 217–221.
- [38] N. Teleman, Combinatorial Hodge theory and signature operator. *Invent. Math.* **61** (1980), no. 3, 227–249.
- [39] N. Yeganefar, Sur la  $L^2$ -cohomologie des variétés à courbure négative, *Duke Math. J.* **122** (2004), no. 1, 145–180.
- [40] S. Zucker,  $L_2$  cohomology of Warped Products and Arithmetic Groups, *Inventiones Math.*, **70** (1982), 169-218.
- [41] S. Zucker,  $L_2$  cohomology and intersection homology of locally symmetric varieties, II, *Compositio Math.* **59** (1986], 339–398.

LABORATOIRE DE MATHÉMATIQUES JEAN LERAY (UMR 6629), UNIVERSITÉ DE NANTES, 2, RUE  
DE LA HOUSSINIÈRE, B.P. 92208, 44322 NANTES CEDEX 3, FRANCE  
*E-mail address:* Gilles.Carron@math.univ-nantes.fr