

SORBONNE UNIVERSITÉ

TRAVAUX D'ÉTUDE ET DE RECHERCHE

Autour du théorème de Dvoretzky

"It soon became clear that an outstanding breakthrough in Geometric Functional Analysis had been achieved."

Vitali Milman à propos du théorème de Dvoretzky dans *Dvoretzky theorem - thirty years later*

Mathieu GALLO

Enseignant : Omer Friedland

date

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	2
1 Préliminaire	5
1.1 Mesures de Haar	5
1.2 Concentration de la mesure	6
1.3 Ellipsoïdes	7
1.4 Loi gaussienne	9
2 Démonstration du théorème de Dvoretzky	11
2.1 Lemmes d'approximations	11
2.2 Début de la démonstration du théorème de Dvoretzky	14
2.3 Estimation de M	15
3 Sections presque euclidiennes de ℓ_p^n	17
3.1 cas $1 \leq p < 2$	17
3.2 cas $2 \leq p < \infty$	17

INTRODUCTION

Le mémoire suivant suit la série de lectures de Gideon Schetchman , "Euclidean sections of convex bodies" [1].

Alexandre Grothendieck en 1956 dans son article "Sur certaines classes de suites dans les espaces de Banach et le théorème de Dvoretzky-Rogers" [2], inspiré par le lemme de Dvoretzky-Rogers (1950) propose une conjecture à laquelle Aryeh Dvoretzky répondra positivement en 1961, aboutissant au résultat suivant :

Théorème 1 (A. Dvoretzky, 1961). Il existe une fonction $k :]0, 1[\times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, tel que $\forall \varepsilon \in]0, 1[$, $k(\varepsilon, n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$ et pour tout $n \in \mathbb{N}$ et tout compact convexe symétrique $K \subset \mathbb{R}^n$, il existe $V \underset{\text{s.e.v}}{\subset} \mathbb{R}^n$ tels que :

- (i) $\dim V = k(\varepsilon, n)$
- (ii) $\exists r > 0$ tel que , $r.(V \cap B_2^n) \subset V \cap K \subset (1 + \varepsilon)r.(V \cap B_2^n)$

Dans le papier original de Dvoretzky l'estimation de k était :

$$k(\varepsilon, n) \geq c(\varepsilon) \sqrt{\frac{\log n}{\log \log n}} \quad \text{pour un } c(\varepsilon) > 0$$

Vitali Milman en 1971 donna une nouvelle preuve du théorème de Dvoretzky en utilisant le phénomène de concentration de la mesure [3], il a de plus amélioré le théorème en donnant l'estimation de la dépendance en n pour la dimension de V : $k(\varepsilon, n) \geq c(\varepsilon) \cdot \log(n)$.

Théorème 2 (V. Milman, 1971). Pour tout $\varepsilon > 0$, il existe une constante $c > 0$ tel que pour tout $n \in \mathbb{N}$ et pour tout compact convexe symétrique $K \subset \mathbb{R}^n$, il existe $V \underset{\text{s.e.v}}{\subset} \mathbb{R}^n$ tels que :

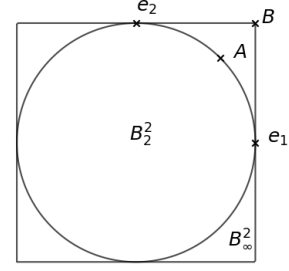
- (i) $\dim V \geq c \cdot \log(n)$
- (ii) $\exists r > 0$ tel que , $r.(V \cap B_2^n) \subset V \cap K \subset (1 + \varepsilon)r.(V \cap B_2^n)$

La dépendance de c par rapport à ε donné par V.Milman était $c \sim \frac{\varepsilon^2}{\log \frac{1}{\varepsilon}}$ [3], c'est cette dépendance qui sera démontrée dans ce mémoire. Y.Gordon a montré en 1988 l'on pouvait prendre $c \sim \varepsilon^2$ avec les mêmes outils que V.Milman dans [4], plus récemment en 2006, G.Schechtman a montré que l'on pouvait prouver le théorème de Dvoretzky avec la même preuve que V. Milman pour $c \sim \varepsilon^2$ en construisant de manière plus précise le θ -net [5] (voir preuve de **théorème 2.4**) .

Notation. Pour la suite on utilisera les notations :

- $|\cdot|_n$ la norme euclidienne sur \mathbb{R}^n , ou $|\cdot|$ si il n'y a pas d'ambiguïté sur la dimension.
- $S^{n-1} = \{x \in \mathbb{R}^n ; |x| = 1\}$, la $(n-1)$ -sphère euclidienne.

Commençons par donner une légère interprétation géométrique du théorème, prenons l'exemple de $K = B_{\|\cdot\|_\infty}$ dans le cas $n = 2$ la distance entre un point situé sur un quart du cercle et le coin le plus proche est $\sqrt{2} - 1$, nous pouvons facilement généraliser cela pour $n > 2$. Prenons par exemple les points $A = (\frac{1}{\sqrt{n}}, \dots, \frac{1}{\sqrt{n}}) \in S^{n-1}$ et $B = (1, \dots, 1) \in \partial B_\infty^n$ le coin de B_∞^n le plus proche de A , on peut joindre A aux points $e_j \in \partial B_\infty^n \cap S^{n-1}$ de la base canonique pour $1 \leq j \leq n$, et on a les distances suivantes :



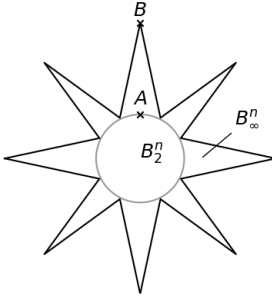
$$|A - e_j| = \sqrt{2(1 - \frac{1}{\sqrt{n}})} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \sqrt{2}$$

$$|e_i - e_j| = \sqrt{2} \quad \text{pour } i \neq j$$

$$|A - B| = \sqrt{n} - 1 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$$

$$|e_j - B| = \sqrt{n-1} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$$

Donc lorsque n est grand, si l'on se place sur la $(n-1)$ -sphère euclidienne, B_∞^n semble être formé de 2^n "piques" qui sont de plus en plus grands avec n . Mais le théorème de Dvoretzky nous affirme qu'il



existe une section C de B_∞^n de dimension supérieure à $c \log n$ où c ne dépendant pas de n , tel que C soit arbitrairement proche de la boule euclidienne, c'est-à-dire une section sur laquelle on ne voit pas ces "piques". En terme plus mathématique, pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $V \subset \mathbb{R}^n$ s.e.v de dimension plus grande que $c(\varepsilon) \log n$ tel que pour un certain $r > 0$:

$$r.(V \cap B_2^n) \subset V \cap B_\infty^n \subset (1 + \varepsilon)r.(V \cap B_2^n)$$

Nous allons maintenant donner une reformulation du théorème de Dvoretzky en terme de norme, en utilisant la relation entre un compact convexe symétrique K et la norme $\|y\|_K = \inf \{ \lambda ; \frac{y}{\lambda} \in K \}$.

Définition. Soit $(X, \|\cdot\|_X), (Y, \|\cdot\|_Y)$ deux espaces normés et $C > 0$, on dit que X s'injecte C -continûment dans Y , si il existe $T \in \mathcal{L}(X, Y)$ tel que pour tout $x \in X$

$$\|x\|_X \leq \|Tx\|_Y \leq C\|x\|_X$$

Théorème 3. Pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $c > 0$ tel que pour tout $n \in \mathbb{N}$ et pour toute normes $\|\cdot\|$ sur \mathbb{R}^n , ℓ_2^k s'injecte $(1 + \varepsilon)$ -continûment dans $(\mathbb{R}^n, \|\cdot\|)$ pour un $k \geq c \cdot \log(n)$.

Montrons que le **théorème 2** et le **théorème 3** sont équivalents.

(2) \Rightarrow (3)

Posons $K = \text{Adh}(B_{\|\cdot\|}(\mathbf{0}, 1)) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| \leq 1\}$ et appliquons le théorème 2, celui-ci nous procure un sous-espace V de \mathbb{R}^n , avec $\dim V := k \geq c \cdot \log(n)$ et $V \cap K$ est ε -euclidien. Donnons-nous une base orthonormée $\{v_j\}_{1 \leq j \leq k}$ de V et posons

$$T: \begin{array}{ccc} (\mathbb{R}^k, |\cdot|_k) & \mapsto & (V, \|\cdot\|) \\ \sum_{i=1}^k x_i e_i & \rightarrow & \sum_{i=1}^k x_i v_i \end{array}$$

Soit $x \in \mathbb{R}^k$ tel que $\|Tx\| = 1$, comme $K \cap V$ est ε -euclidien on a que

$$r \leq |Tx|_n \leq (1 + \varepsilon)r, \text{ pour un } r > 0$$

La borne supérieure est immédiate car $K \cap V \subset r(1 + \varepsilon) \cdot (V \cap B_2^n)$, pour la borne inférieure il suffit de remarquer que $(V \cap K)$ est un fermet de V qui contient l'ouvert $r \cdot (V \cap B_2^n)$ de V , comme Tx est dans la frontière de $K \cap V$ il n'est pas dans l'intérieur de $K \cap V$ et donc dans aucun ouvert contenu dans $V \cap K$. Remarquons que $|Tx|_n = |x|_k$, donc

$$r \leq |x|_k \leq (1 + \varepsilon)r$$

Il suffit d'appliqué cela à $\frac{x}{\|Tx\|}$ pour $x \neq 0$

$$\begin{aligned} r\|Tx\| &\leq |x|_k \leq (1 + \varepsilon)r\|Tx\| \\ \frac{1}{(1 + \varepsilon)r}|x|_k &\leq \|Tx\| \leq \frac{1}{r}|x|_k \\ r|x|_k &\leq \|\tilde{T}x\| \leq (1 + \varepsilon)r|x|_k \end{aligned}$$

avec $\tilde{T} = r(1 + \varepsilon)T$, remarquons que la quantité importante est $\|T\| \cdot \|T^{-1}\| = \|\tilde{T}\| \cdot \|\tilde{T}^{-1}\| \leq 1 + \varepsilon$.

(3) \Rightarrow (2)

Soit $\varepsilon > 0$, par le théorème 3 il existe $c > 0$ tel que pour tous $n \in \mathbb{N}$ il existe un $k > c \cdot \log(n)$ et ℓ_2^k s'injecte $(1 + \varepsilon)$ -continûment dans $(\mathbb{R}^n, \|\cdot\|)$ pour n'importe quelle norme $\|\cdot\|$ sur \mathbb{R}^n . Considérons un compact convexe symétrique $K \subset \mathbb{R}^n$ et $\|y\| = \inf\{\lambda > 0; \frac{y}{\lambda} \in K\}$, alors $\exists T: \ell_2^k \rightarrow (\mathbb{R}^n, \|\cdot\|)$ linéaire tel que :

$$\forall x \in \mathbb{R}^k, |x| \leq \|Tx\| \leq (1 + \varepsilon)|x|$$

ceci implique immédiatement que T est injective, notons $V = \text{Im}T$, alors la co-restriction à V de T est bijective. Soit $y \in \partial(K \cap V)$, c'est-à-dire $\|y\| = 1$, on sait qu'il existe un unique $x \in \mathbb{R}^k$ tel que $Tx = y$, on en déduit donc

$$|x| \leq 1 \leq (1 + \varepsilon)|x| \iff \frac{1}{1 + \varepsilon} \leq |x| \leq 1$$

la convexité et la symétrie centrale de $K \cap V$ implique :

$$\frac{1}{1 + \varepsilon} T(B_2^k) \subset K \cap V \subset T(B_2^k)$$

Pour conclure nous nous référençons au **lemme 1.5** qui sera démontré par la suite qui dit que toutes ellipsoïdes de dimension k admet une section de dimension $\lfloor k/2 \rfloor$ qui soit un multiple d'une boule euclidienne.

1 PRÉLIMINAIRE

1.1. MESURES DE HAAR

Définition & Théorème (Mesures de Haar). Soit (X, d) un espace métrique, G un groupe topologique localement compact qui agit sur X et tel que :

$$\forall x, y \in X \quad \forall g \in G, \quad d(gx, gy) = d(x, y) \quad (\star)$$

alors il existe une unique mesure à un coefficient multiplicatif près, régulière définie sur les boréliens de X qui est invariante sous l'action de G , cette mesure est appelée mesure de Haar de X (où G est sous-entendu).

Les 2 exemples suivant d'espace métrique vérifie (\star) pour $G = O(n)$,

- (i) $X = S^{n-1}$ muni de la distance euclidienne
- (ii) $X = O(n)$ avec la norme $\|T\| = \sup_{|x|=1} |Tx|$

Notation. Par le théorème précédent on peut définir sans ambiguïté μ et ν les mesures de Haar normalisés respectivement sur S^{n-1} et $O(n)$.

Montrons quelques propriétés qui seront utiles par la suite.

Lemme 1.1. Soit $f \in C(S^{n-1})$ et $Y = (g_1, \dots, g_n)$ où les $\{g_i\}_{1 \leq i \leq n}$ sont i.i.d suivant une loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$, alors

$$\int_{S^{n-1}} f d\mu = \mathbb{E} \left[f \left(\frac{Y}{|Y|} \right) \right]$$

Démonstration. Par unicité de la mesure de Haar, il nous suffit de montrer que pour tous $M \in O(n)$ et $f \in C(S^{n-1})$:

$$\mathbb{E} \left[f \left(\frac{MY}{|MY|} \right) \right] = \mathbb{E} \left[f \left(\frac{Y}{|Y|} \right) \right]$$

$$\mathbb{E} \left[f \left(\frac{MY}{|MY|} \right) \right] = \int_{\mathbb{R}^n \setminus \{0\}} f \left(\frac{My}{|y|} \right) \exp \left\{ -\frac{1}{2} |y|^2 \right\} dy_1 \dots dy_n = \int_{\mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \frac{1}{|\det M|} f \left(\frac{y}{|y|} \right) \exp \left\{ -\frac{1}{2} |M^{-1}y|^2 \right\} dy_1 \dots dy_n$$

comme $|\det M| = 1$ et $|M^{-1}y| = |y|$, on a :

$$\mathbb{E} \left[f \left(\frac{MY}{|MY|} \right) \right] = \mathbb{E} \left[f \left(\frac{Y}{|Y|} \right) \right]$$

□

Lemme 1.2. Soit $A \subset S^{n-1}$ un borélien alors pour tous $x \in S^{n-1}$

$$\nu \left(T \in O(n) ; Tx \in A \right) = \mu(A)$$

Démonstration. Soit $M \in O(n)$ et $x \in S^{n-1}$ alors la mesure définie par

$$\omega_x(A) = \nu(T \in O(n); Tx \in A)$$

ω_x vérifie les propriétés suivantes :

$$\omega_x(MA) = \nu(T \in O(n); M^T Tx \in A) = \nu(T \in O(n); Tx \in A) = \omega_x(A)$$

$$\omega_x(\emptyset) = 0$$

$$\begin{aligned} \omega_x\left(\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} A_i\right) &= \nu\left(T \in O(n); Tx \in \bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} A_i\right) = \nu\left(\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} \{T \in O(n); Tx \in A_i\}\right) \\ &= \sum_{i \in \mathbb{N}} \nu\left(T \in O(n); Tx \in A_i\right) = \sum_{i \in \mathbb{N}} \omega_x(A_i) \end{aligned}$$

L'unicité de la mesure de Haar nous permet de conclure que $\omega_x = \mu$, en particulier ω_x ne dépend pas de x . □

1.2. CONCENTRATION DE LA MESURE

Le phénomène de concentration de la mesure a été mis en avant par V.Milman étendant les travaux de P.Lévy et son inégalité isopérimétrique. On peut formuler la question que cherche à résoudre le théorème comme cela : étant donné (X, d) un espace métrique muni d'une mesure de probabilité P , on cherche à regarder où les fonctions 1-Lipschitziennes sont essentiellement constantes. Considérons f une fonctions 1-Lipschitzienne de X dans \mathbb{R} et notons m_f sa médiane, c'est à dire le réel tel que

$$P(f \geq m_f) \geq \frac{1}{2} \quad \& \quad P(f \leq m_f) \geq \frac{1}{2}$$

L'assertion f est essentiellement constante se traduit par le faite que l'on puisse donner une borne supérieur à

$$P(|f - m_f| \geq t)$$

pour $t \geq 0$.

Posons $A = \{f \leq m_f\}$, il est assez naturelle de s'intéresser à l'ensemble suivant

$$A_t = \{x \in X; d(x, A) \leq t\} \tag{★}$$

On appelle A_t le t -élargissement de A , il suit cela :

$$x \in A_t \Rightarrow f(x) \leq t + m_f \quad \Longleftrightarrow \quad A_t \subset \left\{x \in S^{n-1}; f(x) \leq t + m_f\right\}$$

$$\begin{aligned} P(f > t + m_f) &= 1 - P(f \leq t + m_f) \\ &\leq 1 - P(A_t) \end{aligned}$$

Cette observation a permis a Milman et Gromov de se ramener a une étude ensembliste du problème, Il introduisent α une fonction dite de concentration, définit comme le plus petit réel tel que :

$$\forall A \subset X, P(A) \geq \frac{1}{2} \Rightarrow 1 - P(A_t) \leq \alpha(t, P)$$

Appliquant ceci au ensemble $\{f \geq m_f\}$ et $\{f \leq m_f\}$, on trouve facilement :

$$P(|f - m_f| > t) \leq 2\alpha(t, P)$$

Considérons maintenant que f est L -Lipschitzienne, alors la médiane de $\frac{f}{L}$ est $\frac{m_f}{L}$, donc par homogénéité

$$P(|f - m_f| > t) \leq 2\alpha\left(\frac{t}{L}, P\right)$$

L'utilité de cette formulation est que dans certains cas α décroît très vite vers 0 lorsque t devient grand. Pour certains espace X il est possible de remplacer la médiane par l'espérance qui est en générale plus simple a calculer, dans le cas ou X est la $(n-1)$ -sphère euclidienne on dispose du théorème suivant qui seras admis (voir [6] ou [9]) .

Théorème 1.3 (Concentration de la mesure sur la sphère). Soit $f : S^{n-1} \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction Lipschitzienne de constante $L > 0$, alors

$$\mu\left\{x \in S^{n-1} ; |f(x) - \mathbb{E}[f]| > \varepsilon\right\} \leq 2e^{-\frac{\varepsilon^2 n}{2L^2}}$$

Où $\mathbb{E}[f] =: \int_{S^{n-1}} f d\mu$

1.3. ELLIPSOÏDES

Dans cette partie nous montrons plusieurs propriétés sur les ellipsoïdes, commençons par les définir :

Définition. On appelle ellipsoïde de \mathbb{R}^n l'image de la boule unité euclidienne par un élément de $GL(n)$.

Donnons une définition alternative d'un l'ellipsoïde.

Proposition 1.4. Pour toute ellipsoïde \mathcal{E} il existe $\alpha_1, \dots, \alpha_n > 0$ et v_1, \dots, v_n une base orthonormé tel que :

$$\mathcal{E} = \left\{x \in \mathbb{R}^n ; \sum_{i=1}^n \frac{\langle x, v_i \rangle^2}{\alpha_i^2} < 1\right\}$$

Démonstration. Donnons nous $A \in GL(n)$ tel que $AB_2^n = \mathcal{E}$

$$|Ax|^2 = x^T A^T A x$$

$A^T A$ est symétrique, soit λ une de ses valeur propre et v un vecteur propre associé, alors

$$0 < |Av|^2 = v^T \lambda v = \lambda |v|^2$$

Donc les valeurs propre $A^T A$ sont strictement positive, Comme elle est symétrique, elle est donc diagonalisable dans une base orthonormé, donnons nous $(\lambda_i)_{i \leq n}$ et $(v_i)_{i \leq n}$ une base orthonormé tel que $A^T A v_i = \lambda_i^2 v_i$ pour tous $1 \leq i \leq n$ et définissons les quantités suivante :

- P la matrice définie par $P v_j = \lambda_j v_j$
- $u_j = \lambda_j^{-1} A v_j$

Montrons que les u_j forment une base orthonormée :

$$\begin{aligned} \langle u_i, u_j \rangle &= \lambda_j^{-1} v_j^T A^T \lambda_i^{-1} A v_i \\ &= \lambda_j^{-1} \lambda_i^{-1} v_j^T (A^T A v_i) \\ &= \lambda_j^{-1} \lambda_i^{-1} v_j^T \lambda_i^2 v_i \\ &= \frac{\lambda_i}{\lambda_j} \langle v_j, v_i \rangle = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

Soit $x = \sum_{i=1}^n x_i v_i \in S^{n-1}$

$$\begin{aligned} y &=: Ax = x_1 A v_1 + \dots + x_n A v_n \\ &= x_1 \lambda_1 u_1 + \dots + x_n \lambda_n u_n \end{aligned}$$

Les composante de y dans la base $\{u_j\}_{j \leq n}$ sont $\langle y, u_j \rangle = x_j \lambda_j$, donc :

$$\frac{\langle y, u_1 \rangle^2}{\lambda_1^2} + \dots + \frac{\langle y, u_n \rangle^2}{\lambda_n^2} = x_1^2 + \dots + x_n^2 = 1$$

Et finalement $\partial \mathcal{E} = \{y \in \mathbb{R}^n ; \frac{\langle y, u_1 \rangle^2}{\lambda_1^2} + \dots + \frac{\langle y, u_n \rangle^2}{\lambda_n^2} = 1\}$. □

Démontrons maintenant le lemme que nous avons utiliser dans l'introduction :

Lemme 1.5. Soit \mathcal{E} un ellipsoïde de \mathbb{R}^n , alors $\exists \lambda > 0$ et $V \underset{\text{s.e.v}}{\subset} \mathbb{R}^n$ de dimension $\lceil \frac{n}{2} \rceil$ tel que :

$$\mathcal{E} \cap V = \lambda B_2^n \cap V$$

Démonstration. Quitte a effectuer une rotation on peut supposer que $\mathcal{E} = \{x \in \mathbb{R}^n ; \sum_{i=1}^n a_i x_i^2 < 1\}$ pour $0 \leq a_1 \leq \dots \leq a_n$. Posons $\lambda = \text{Mediane}(a_1, \dots, a_n)$ et

$$F = \{x \in \mathbb{R}^n ; \forall i \leq \lfloor \frac{n}{2} \rfloor, \sqrt{\lambda - a_i} x_i = \sqrt{a_{n+1-i} - \lambda} x_{n+1-i}\}$$

Alors pour tous $x \in F$ nous avons $\forall i \leq \lfloor \frac{n}{2} \rfloor$:

$$a_i x_i^2 + a_{n+1-i} x_{n+1-i}^2 = \lambda (x_i^2 + x_{n+1-i}^2)$$

d'où

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i^2 = \lambda \sum_{i=1}^n x_i^2$$

□

Nous admettons le résultat de F. John :

Définition & Théorème (Ellipsoïde de John). Tous compact convexe symétrique d'intérieur non vide contient un unique ellipsoïde de volume maximale, elle est appelée ellipsoïde de John.

Remarque 1.6. Soit $K \subset \mathbb{R}^n$ un compact convexe symétrique et $D = u(B_2^n)$ (avec $u \in GL(n)$) son ellipsoïde de John, notons alors $C =: u^{-1}(K)$ dont l'ellipsoïde de John est B_2^n , supposons que

$$r(B_2^n \cap W) \subset C \cap W \subset r(1 + \varepsilon)(B_2^n \cap W)$$

alors

$$u^{-1}(r(D \cap uW)) \subset u^{-1}(K \cap uW) \subset u^{-1}(r(1 + \varepsilon)(D \cap uW))$$

$$r(D \cap uW) \subset K \cap uW \subset r(1 + \varepsilon)(D \cap uW)$$

Le **lemme 1.5** nous permet de conclure que quitte à diviser la dimension du sous-espace W par deux, on peut se restreindre à montrer le théorème de Dvoretzky pour des compacts dont la boule euclidienne est l'ellipsoïde de John sans perte de généralité.

1.4. LOI GAUSSIENNE

Pour la preuve du théorème de Dvoretzky nous aurons besoins de deux résultat sur les variables aléatoires gaussiennes, ce premier combiner avec **lemme 1.2** nous seras utile pour calculer des intégrales par rapport à la mesure de Haar sur la $(n - 1)$ -sphère.

Lemme 1.7. Soit $g = (g_1, \dots, g_n)$ des variables aléatoire i.i.d suivant une loi gaussienne, alors $\frac{g}{|g|}$ et $|g|$ sont indépendants.

Démonstration. Posons $Y = \frac{g}{|g|}$ et $R = |g|$ alors

$$\mathbb{E}[f(Y)g(R)] = \int_{\mathbb{R}^n} f\left(\frac{x_1}{|x|}, \dots, \frac{x_n}{|x|}\right) g(|x|) \exp\left(-\frac{|x|^2}{2}\right) dx_1 \dots dx_n$$

en passant en coordonnées sphériques

$$\begin{aligned}
x_1 &= r \sin \theta_1 \dots \sin \theta_{n-1} \\
x_2 &= r \sin \theta_1 \dots \sin \theta_{n-2} \cos \theta_{n-1} \\
x_3 &= r \sin \theta_1 \dots \sin \theta_{n-3} \cos \theta_{n-2} \\
&\vdots \\
x_n &= r \cos \theta_1
\end{aligned}$$

On a le déterminant suivant :

$$dx_1 \dots dx_n = r^{n-1} \sin^{n-2} \theta_1 \sin^{n-3} \theta_2 \dots \sin \theta_{n-2} dr d\theta_1 \dots d\theta_{n-1}$$

d'où :

$$\mathbb{E}[f(Y)g(R)] = \int_{\mathbb{R}^n} f \circ \varphi(\theta) g(r) \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) r^{n-1} \prod_{1 \leq i \leq n-1} (\sin \theta_i)^{n-1-i} dr d\theta_1 \dots d\theta_{n-1}$$

$$\mathbb{E}[f(Y)g(R)] = \int_{\mathbb{R}} g(r) \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) r^{n-1} dr \int_{\mathbb{R}^{n-1}} f \circ \varphi(\theta) \prod_{1 \leq i \leq n-1} (\sin \theta_i)^{n-1-i} d\theta_1 \dots d\theta_{n-1}$$

où $\varphi(\theta) = (\sin \theta_1 \dots \sin \theta_{n-1}, \sin \theta_1 \dots \sin \theta_{n-2} \cos \theta_{n-1}, \sin \theta_1 \dots \sin \theta_{n-3} \cos \theta_{n-2}, \dots, \cos \theta_1)$. \square

Nous aurons besoins de trouver un minorant pour $\int_{\mathbb{S}^{n-1}} \|x\| d\mu(x)$ pour une norme $\|\cdot\|$ sur \mathbb{R}^n et pour cela nous aurons besoin du lemme suivant :

Lemme 1.8. il existe $c > 0$ tel que $\forall N > 1$ et $\{g_i\}_{1 \leq i \leq N}$ des variables aléatoire i.i.d suivant une loi $\mathcal{N}(0, 1)$ on ait :

$$c\sqrt{\log N} \leq \mathbb{E}\left[\max_{1 \leq i \leq N} |g_i|\right]$$

où $\tilde{N} = \left\lceil \frac{N}{2} \right\rceil$ est la partie entière supérieure de $\frac{N}{2}$.

Démonstration. Commençons par montrer que pour $n > 1$, $\mathbb{P}(|g_1| > \sqrt{\log n}) \geq \frac{1}{n}$, on a :

$$\mathbb{P}(|g_1| > \sqrt{\log n}) = 2 \int_{\sqrt{\log n}}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \geq \int_{\sqrt{\log n}}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} \left(1 + \frac{1}{x^2}\right) dx \quad \text{pour } x > \sqrt{\log(2)}$$

$$\int_{\sqrt{\log n}}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} \left(1 + \frac{1}{x^2}\right) dx = \left[-\frac{e^{-\frac{t^2}{2}}}{t} \right]_{\sqrt{\log n}}^{+\infty} = \frac{1}{\sqrt{n \log n}} > \frac{1}{n}$$

Donc

$$\mathbb{P}\left(\max_{1 \leq i \leq \tilde{N}} |g_i| \leq \sqrt{\log N}\right) = \mathbb{P}\left(|g_1| \leq \sqrt{\log N}\right)^{\tilde{N}} = \left(1 - \mathbb{P}\left(|g_1| > \sqrt{\log N}\right)\right)^{\tilde{N}}$$

$$\mathbb{P}\left(\max_{1 \leq i \leq \tilde{N}} |g_i| \leq \sqrt{\log N}\right) \leq \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{\tilde{N}} \leq e^{-\frac{\tilde{N}}{N}} \leq e^{-\frac{1}{2}}$$

Ce qui équivaut a

$$\mathbb{P}\left(\max_{1 \leq i \leq N} |g_i| > \sqrt{\log N}\right) \geq 1 - e^{-\frac{1}{2}}$$

Par l'inégalité de Markov on a finalement :

$$\mathbb{E}\left[\max_{1 \leq i \leq N} |g_i|\right] \geq \mathbb{P}\left(\max_{1 \leq i \leq N} |g_i| > \sqrt{\log N}\right) \sqrt{\log N} \geq (1 - e^{-\frac{1}{2}}) \sqrt{\log N}$$

avec $c =: 1 - e^{-\frac{1}{2}}$

□

2 DÉMONSTRATION DU THÉORÈME DE DVORETZKY

2.1. LEMMES D'APPROXIMATIONS

Avant de débiter la démonstration du théorème de Dvoretzky, nous allons avoir besoins de plusieurs lemmes, et de la définition suivante :

Définition. Soit (X, d) un espace métrique et $\theta > 0$, on dit que $A \subset X$ est un θ -net si

- (i) A est de cardinal fini.
- (ii) $\forall x \in X, \exists y \in A$ tel que $d(x, y) \leq \theta$

Le petit lemme qui suit nous permet d'approcher les points de la $(n-1)$ -sphère par des points tous situé sur un θ -net.

Lemme 2.1. Soient $x \in S^{n-1}$, A un θ -net pour un $1 > \theta > 0$, alors il existe $(y_i)_{i \in \mathbb{N}} \subset A$ et $(\beta_i)_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}^+$ tel que

$$x = \sum_{i=0}^{+\infty} y_i \beta_i \quad \text{et} \quad \forall i \in \mathbb{N}, \beta_i \leq \theta^i$$

Démonstration. Comme A est un θ -net alors il existe $y_0 \in A$ tel que $|x - y_0| < \theta$, et donc

$$x = y_0 + \lambda_1 x'$$

avec $\lambda_1 = |x - y_0| \leq \theta$ et $x' = \frac{x - y_0}{\lambda_1} \in S^{n-1}$, on peut donc itéré le même procédé sur x' et réitéré indéfiniment :

$$\begin{array}{lll} x = y_0 + \lambda_1(y_1 + \lambda_2 x'') = y_0 + \lambda_1 y_1 + \lambda_1 \lambda_2 x'' & \text{avec} & \lambda_2 \leq \theta, y_1 \in A \text{ et } x'' \in S^{n-1} \\ \vdots & & \vdots \\ x = y_0 + \sum_{i=1}^N y_i \left(\prod_{1 \leq k \leq i} \lambda_k \right) + \tilde{x} \prod_{1 \leq k \leq N+1} \lambda_k & \text{avec} & \forall i \leq N+1 \lambda_i \leq \theta, y_i \in A \text{ et } \tilde{x} \in S^{n-1} \\ \vdots & & \vdots \end{array}$$

Si l'on pose $S_N = y_0 + \sum_{i=1}^N y_i \left(\prod_{1 \leq k \leq i} \lambda_k \right)$, alors :

$$|x - S_N| \leq |\lambda_1 \dots \lambda_N| |\tilde{x}| \leq \theta^N \rightarrow 0 \quad \text{avec } N \rightarrow \infty$$

il ne reste plus qu'à poser $\beta_0 = 1$ et pour $i > 0$, $\beta_i = \prod_{1 \leq k \leq i} \lambda_k \leq \theta^i$ et l'on a :

$$x = \sum_{i=0}^{+\infty} \beta_i y_i$$

□

Le **lemme 2.2** va nous permettre de passer d'un ensemble de grande μ -mesure à un grand sous-espace au sens des dimensions.

Lemme 2.2. $\forall \varepsilon > 0$, il existe $1 > \theta > 0$ tel que pour tous $n \in \mathbb{N}$, si l'on a A un θ -net sur $V \cap S^{n-1}$ pour $V \subset \mathbb{R}^n$ de dimension k , $\|\cdot\|$ une norme sur \mathbb{R}^n et $T \in GL(n)$, tel que :

$$\forall x \in A, \quad (1 - \theta) \leq \|Tx\| \leq (1 + \theta)$$

alors ,

$$\forall x \in V, \quad \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon}} |x| \leq \|Tx\| \leq \sqrt{1 + \varepsilon} |x|$$

de plus si $\varepsilon \leq \frac{1}{9}$, on peut prendre $\theta = \frac{\varepsilon}{9}$

Démonstration. Soient $1 > \theta > 0$, A un θ -net sur $S(V) = \{x \in V; |x| = 1\}$ et $x \in S(V)$ par le **lemme 2.1**, il existe $(y_i)_{i \in \mathbb{N}} \subset A$ et $(\beta_i)_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}^+$ tel que

$$x = \sum_{i=0}^{+\infty} y_i \beta_i \quad \text{et} \quad \forall i \in \mathbb{N}, \quad \beta_i \leq \theta^i$$

Notons $T = (a_1, \dots, a_n)$

$$\begin{aligned} \|Tx\| &= \left\| T \sum_{i=0}^{+\infty} y_i \beta_i \right\| \\ &= \left\| \sum_{i=0}^{+\infty} \beta_i \sum_{p=1}^n y_{i,p} a_p \right\| \\ &\leq \sum_{i=0}^{+\infty} \theta^i \left\| \sum_{p=1}^n y_{i,p} a_p \right\| \\ &\leq \sum_{i=0}^{+\infty} \theta^i \|Ty_i\| \\ &\leq \sum_{i=0}^{+\infty} \theta^i (1 + \theta) = \frac{1 + \theta}{1 - \theta} \end{aligned}$$

de même :

$$\begin{aligned} \|Tx\| &\geq \|Ty_0\| - \|Tx - Ty_0\| \\ &= (1 - \theta) - \left\| \sum_{p=1}^n a_p \sum_{i=1}^{+\infty} \beta_i y_{i,p} \right\| \\ &\geq (1 - \theta) - \sum_{i=1}^{+\infty} \theta^i \|Ty_i\| \\ &\geq \left((1 - \theta) - \theta \frac{1 + \theta}{1 - \theta} \right) = \frac{1 - 3\theta}{1 - \theta} \end{aligned}$$

Il suffit donc de prendre θ tel que

$$\begin{aligned}\sqrt{1+\varepsilon} &\geq \frac{1+\theta}{1-\theta} \\ \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon}} &\leq \frac{1-3\theta}{1-\theta}\end{aligned}$$

et pour tous $x \in V \setminus \{0\}$ on a

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon}} &\leq \|T \frac{x}{|x|}\| \leq \sqrt{1+\varepsilon} \\ \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon}} |x| &\leq \|Tx\| \leq |x| \sqrt{1+\varepsilon}\end{aligned}$$

Ce qui fini la première partie de la preuve, dans la suite on suppose $\varepsilon \leq \frac{1}{9}$. On cherche $\theta =: \theta(\varepsilon) \in]0, 1[$, tel que $\sqrt{1+\varepsilon} \geq \max(\frac{1-\theta}{1-3\theta}, \frac{1+\theta}{1-\theta})$, supposons $\theta \leq \frac{1}{3}$ alors

$$\frac{1-\theta}{1-3\theta} - \frac{1+\theta}{1-\theta} = \frac{4\theta^2}{(1-3\theta)(1-\theta)} > 0$$

Donc $\sqrt{1+\varepsilon} \geq \frac{1-\theta}{1-3\theta}$

$$\begin{aligned}1+\varepsilon &\geq \left(\frac{1-\theta}{1-3\theta}\right)^2 \\ (9\varepsilon+8)\theta^2 - 2(3\varepsilon+2)\theta + \varepsilon &\geq 0\end{aligned}$$

les deux racines de ce polynôme sont $0 < \frac{3\varepsilon+2-2\sqrt{1+\varepsilon}}{8+9\varepsilon} < \frac{3\varepsilon+2+2\sqrt{1+\varepsilon}}{8+9\varepsilon}$, on cherche donc un θ dans $]0, \frac{3\varepsilon+2-2\sqrt{1+\varepsilon}}{8+9\varepsilon}]$. Pour finir

$$\begin{aligned}\frac{3\varepsilon+2-2\sqrt{1+\varepsilon}}{8+9\varepsilon} &\geq \frac{3\varepsilon+2-2-2\varepsilon}{8+9\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{8+9\varepsilon} \\ &\geq \frac{\varepsilon}{9}\end{aligned}$$

donc pour $\varepsilon \in]0, 9^{-1}[$ on peu prendre $\theta(\varepsilon) = \frac{\varepsilon}{9}$. □

Lemme 2.3. Pour tous $0 < \theta < 1$, $V \underset{\text{s.e.v}}{\subset} \mathbb{R}^n$ de dimension $k > 0$, alors il existe un θ -net sur $V \cap S^{n-1}$ de cardinal inférieur à $\left(\frac{3}{\theta}\right)^k$.

Démonstration. Notons $B_V(x, r) = \{y \in V ; |x - y| < r\}$ la boule de centre $x \in V$ et de rayon $r \geq 0$, soit $N = \{x_i\}_{i=1, \dots, m}$ un sous-ensemble de $V \cap S^{n-1}$ maximal pour la propriété : $x, y \in N$, $|x - y| \geq \theta$, c'est-à-dire pour tous $x \in V \cap S^{n-1} \setminus N$ il existe $i \leq m$ tel que $|x - x_i| < \theta$, donc N est un θ -net et les $\{B_V(x_i, \theta/2)\}_{i=1, \dots, m}$ sont donc disjoints deux à deux et toutes contenues dans $B_V(0, 1 + \frac{\theta}{2})$ d'ou :

$$\begin{aligned}m \text{Vol}(B_V(x_1, \frac{\theta}{2})) &= \sum_{i=1}^m \text{Vol}(B_V(x_i, \frac{\theta}{2})) = \text{Vol}(\cup_{1 \leq i \leq m} B_V(x_i, \frac{\theta}{2})) \leq \text{Vol}(B_V(0, 1 + \frac{\theta}{2})) \\ m &\leq \frac{\text{Vol}(B_V(0, 1 + \frac{\theta}{2}))}{\text{Vol}(B_V(x_1, \frac{\theta}{2}))}\end{aligned}$$

Par homogénéité de la mesure de Lebesgue :

$$m \leq \left(\frac{1 + \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}}\right)^k = \left(1 + \frac{2}{\theta}\right)^k < \left(\frac{3}{\theta}\right)^k$$

□

2.2. DÉBUT DE LA DÉMONSTRATION DU THÉORÈME DE DVORETZKY

Dans cette partie nous allons montrer un théorème qui sera l'outil principal de la démonstration du théorème de Dvoretzky.

Théorème 2.4. Pour tous $\varepsilon > 0$ il existe $c(\varepsilon) > 0$ tel que pour tout $n \in \mathbb{N}^*$ et pour toute norme $\|\cdot\|$ sur \mathbb{R}^n , ℓ_2^k s'injecte $(1 + \varepsilon)$ -continûment dans $(\mathbb{R}^n, \|\cdot\|)$, pour un $k \geq c(\varepsilon) \cdot \left(\frac{M}{b}\right)^2 n$.
Où $M = \int_{S^{n-1}} \|x\| d\mu(x)$ et $b > 0$ le plus petit réel tel que $\|\cdot\| \leq b|\cdot|$.

Démonstration. Soit $\varepsilon > 0$ et $1 > \theta(\varepsilon) =: \theta > 0$ donné par le **lemme 2.2** nous allons montrer que le $c(\varepsilon)$ recherché est $c(\theta(\varepsilon)) =: \frac{\theta^2}{8 \log(\frac{3}{\theta})}$, pour alléger les notations on note

- $\eta =: \frac{\theta M}{b}$
- $\kappa(\theta) =: c(\theta) \left(\frac{M}{b}\right)^2 n$

Évacuons un cas trivial, si $\kappa(\theta) < 1$ alors $k = 1$ convient car toute 1-section est euclidienne, pour la suite on suppose donc $\kappa(\theta) \geq 1 \iff \frac{\eta^2 n}{8} \geq \log(\frac{3}{\theta})$.

Fixons un k entier tel que $\kappa(\theta) \leq k < 2\kappa(\theta)$ possible car $\kappa(\theta) \geq 1$ et on se donne A un θ -net sur $\text{Vect}(e_1, \dots, e_k) \cap S^{n-1}$, avec $|A| \leq \left(\frac{3}{\theta}\right)^k$. On alors :

$$\begin{aligned} \nu\left(\bigcap_{x \in A} \{T \in O(n) ; |\|Tx\| - M| \leq b\eta\}\right) &= 1 - \nu\left(\bigcup_{x \in A} \{T \in O(n) ; |\|Tx\| - M| > b\eta\}\right) \\ &\geq 1 - |A| \nu\left(\{T \in O(n) ; |\|Ty\| - M| > b\eta\}\right) \quad \text{pour un } y \in A \\ &\geq 1 - |A| \mu\left(y \in S^{n-1} ; |\|y\| - M| > b\eta\right) \quad \text{par le lemme 1.2} \end{aligned}$$

En appliquant la concentration de la mesure

$$\begin{aligned} \nu\left(\bigcap_{x \in A} \{T \in O(n) ; |\|Tx\| - M| \leq b\eta\}\right) &\geq 1 - |A| 2e^{-\frac{\eta^2 n}{2}} \\ &> 1 - 2\left(\frac{3}{\theta}\right)^k e^{-\frac{\eta^2 n}{2}} \\ &> 1 - 2 \exp\left(2\kappa(\theta) \log\left(\frac{3}{\theta}\right) - \frac{\eta^2 n}{2}\right) \\ &> 1 - 2e^{-\frac{\eta^2 n}{4}} \\ &> 1 - \frac{2}{3^2} \theta^2 > 0 \quad \text{car } \frac{\eta^2 n}{4} \geq 2 \log\left(\frac{3}{\theta}\right) \end{aligned}$$

Donc il existe $T \in O(n)$ tel que pour tous $x \in A$ on ait $|\|Tx\| - M| \leq b\eta$, c'est à dire

$$M(1 - \theta) = M - b\eta \leq \|Tx\| \leq M + b\eta = M(1 + \theta)$$

Par le **lemme 2.2** pour tous $x \in \text{Vect}(e_1, \dots, e_k)$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon}} |x| M \leq \|Tx\| \leq \sqrt{1 + \varepsilon} |x| M$$

et pour $\varepsilon < 9^{-1}$ on peut prendre $\theta(\varepsilon) = \frac{\varepsilon}{9}$ et donc $c(\varepsilon) = c_0 \frac{\varepsilon^2}{\log(\frac{c_1}{\varepsilon})}$ pour $c_0, c_1 > 0$.

□

2.3. ESTIMATION DE M

Dans cette partie nous allons donner une estimation de $M =: \int_{S^{n-1}} \|x\| d\mu(x)$, mais avant cela nous avons besoin du lemme suivant :

Lemme 2.5 (Dvoretzky-Rogers). Soit $\|\cdot\|$ une norme sur \mathbb{R}^n tel que B_2^n est l'ellipsoïde de John de $B_{\|\cdot\|}$, alors il existe une base orthonormée $\{x_i\}_{i=1,\dots,n}$ tel que $\forall 1 \leq i \leq n$

$$e^{-1} \left(1 - \frac{i-1}{n}\right) \leq \|x_i\| \leq 1$$

Démonstration. S^{n-1} est compact et $\|\cdot\|$ continue, on peut donc prendre un $x_1 \in S^{n-1}$ qui maximise $\|\cdot\|$ c'est à dire $\|x_1\| = 1$, supposons que l'on ai x_1, \dots, x_{k-1} avec $k \leq n$ tel que pour tous $1 \leq i \leq k-1$, x_i maximise $\|\cdot\|$ sur $S^{n-1} \setminus \text{Vect}(x_1, \dots, x_{k-1}) \neq \emptyset$ car les $\{x_i\}_{i=1,\dots,k-1}$ sont orthogonaux deux à deux. On peut donc répéter le procédé pour trouver x_k qui maximise $S^{n-1} \setminus \text{Vect}(x_1, \dots, x_{k-1})$, par récurrence on peut donc avoir n vecteurs avec ses propriétés. Fixons $1 \leq k \leq n$, $a, b \in \mathbb{R}^*$ et définissons :

$$\mathcal{E} = \left\{ \sum_{i=1}^n a_i x_i ; \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{a_i}{a}\right)^2 + \sum_{i=k}^n \left(\frac{b_i}{b}\right)^2 \leq 1 \right\}$$

Supposons $\sum_{i=1}^n a_i x_i \in \mathcal{E}$, alors $\sum_{i=1}^{k-1} a_i x_i \in aB_2^n$ et donc $\|\sum_{i=1}^{k-1} a_i x_i\| \leq a$. Si $x \in \text{Vect}(x_k, \dots, x_n) \cap B_2^n$ on a $\|x\| \leq \|x_k\|$ par construction, et donc $\sum_{i=k}^n a_i x_i \in bB_2^n \Rightarrow \|\sum_{i=k}^n a_i x_i\| \leq b\|x_k\|$, ce qui nous donne la majoration suivante

$$\left\| \sum_{i=1}^n a_i x_i \right\| \leq \left\| \sum_{i=1}^{k-1} a_i x_i \right\| + \left\| \sum_{i=k}^n a_i x_i \right\| \leq a + b\|x_k\|$$

Posons $\phi \in GL(n)$ définit par $\phi(\sum_{i=1}^n a_i x_i) = \sum_{i=1}^{k-1} a a_i x_i + \sum_{i=k}^n b a_i x_i$ on a $\phi = \text{diag}(\overbrace{a, \dots, a}^{(k-1) \times}, \overbrace{b, \dots, b}^{(n-k+1) \times})$ et donc $\det \phi = a^{k-1} b^{n-k+1}$ d'où :

$$\int_{\mathcal{E}} dx_1 \dots dx_n = \int_{B_2^n} \det \phi dx_1 \dots dx_n = a^{k-1} b^{n-k+1} \int_{B_2^n} dx_1 \dots dx_n$$

On prend $a + b\|x_k\| = 1$ de sorte que $\mathcal{E} \subset K$, comme B_2^n est l'ellipsoïde de volume maximale incluse dans K , on a que

$$1 \geq \frac{\int_{\mathcal{E}} dx_1 \dots dx_n}{\int_{B_2^n} dx_1 \dots dx_n} = a^{k-1} b^{n-k+1}$$

Fixons donc pour $k \geq 2$, $b = \frac{1-a}{\|x_k\|}$ et $a = \frac{k-1}{n}$, en remplaçant dans l'inégalité on obtient :

$$1 \geq a^{k-1} \left(\frac{1-a}{\|x_k\|} \right)^{n-k+1} \iff \|x_k\| \geq a^{\frac{k-1}{n-k+1}} (1-a) = \left(\frac{k-1}{n} \right)^{\frac{k-1}{n-k+1}} \left(1 - \frac{k-1}{n} \right)$$

et $\log a^{\frac{k-1}{n-k+1}} = \frac{k-1}{n-k+1} \log \left(\frac{k-1}{n} \right) > -1$.

□

Proposition 2.6. Soit $\|\cdot\|$ une norme sur \mathbb{R}^n tel que B_2^n est l'ellipsoïde de John de $B_{\|\cdot\|}$, alors il existe $c > 0$ tel que

$$M =: \int_{S^{n-1}} \|x\| d\mu(x) \geq c \sqrt{\frac{\log n}{n}}$$

Démonstration. Par le lemme de Dvoretzky-Rogers il existe une base orthonormée x_1, \dots, x_n tel que pour $1 \leq i \leq \tilde{n} =: \lceil \frac{n}{2} \rceil$ la partie entière supérieure de $\frac{n}{2}$, $\|x_i\| \geq e^{-1} \left(1 - \frac{\tilde{n}-1}{n}\right) \geq e^{-1} \left(1 - \frac{\frac{n}{2}+1-1}{n}\right) = (2e)^{-1}$. Comme μ est invariante par composition par une transformation orthogonale on a que

$$M =: \int_{S^{n-1}} \left\| \sum_{i=1}^n a_i x_i \right\| d\mu(a) = \int_{S^{n-1}} \left\| \sum_{i=1}^{n-1} a_i x_i - a_n x_n \right\| d\mu(a)$$

et donc

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{2} \int_{S^{n-1}} \left\| \sum_{i=1}^n a_i x_i \right\| d\mu(a) + \frac{1}{2} \int_{S^{n-1}} \left\| \sum_{i=1}^{n-1} a_i x_i - a_n x_n \right\| d\mu(a) \\ &\geq \frac{1}{2} \int_{S^{n-1}} 2 \max \left\{ \left\| \sum_{i=1}^{n-1} a_i x_i \right\|, \|a_n x_n\| \right\} d\mu(a) \geq \dots \geq \int_{S^{n-1}} \max_{1 \leq i \leq \tilde{n}} \left\{ |a_i| \|x_i\| \right\} d\mu(a) \\ &\geq \int_{S^{n-1}} \max_{1 \leq i \leq \tilde{n}} \left\{ |a_i| \|x_i\| \right\} d\mu(a) \geq (2e)^{-1} \int_{S^{n-1}} \max_{1 \leq i \leq \tilde{n}} |a_i| d\mu(a) \end{aligned}$$

Soit (g_1, \dots, g_n) , des variables aléatoire i.i.d de loi $\mathcal{N}(0, 1)$ alors

$$\int_{S^{n-1}} \max_{1 \leq i \leq \tilde{n}} |a_i| d\mu(a) = \mathbb{E} \left[\left(\sum_{i=1}^n g_i^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \max_{1 \leq i \leq \tilde{n}} |g_i| \right]$$

Par le **lemme 1.7** $(\sum_{i=1}^n g_i^2)^{-\frac{1}{2}}(g_1, \dots, g_n)$ et $(\sum_{i=1}^n g_i^2)^{\frac{1}{2}}$ sont des variables aléatoires indépendantes, on a donc

$$\mathbb{E} \left[\left(\sum_{i=1}^n g_i^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \max_{1 \leq i \leq \tilde{n}} |g_i| \right] \cdot \mathbb{E} \left[\left(\sum_{i=1}^n g_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] = \mathbb{E} \left[\max_{1 \leq i \leq \tilde{n}} |g_i| \right]$$

la fonction racine carré est concave, par l'inégalité de Jensen on a donc :

$$\mathbb{E} \left[\left(\sum_{i=1}^n g_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \leq \mathbb{E} \left[\sum_{i=1}^n g_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{n} \mathbb{E}[g_1^2]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{n}$$

Et finalement par le **lemme 1.8**, il existe $K > 0$ tel que :

$$M \geq \frac{1}{2e\sqrt{n}} \mathbb{E} \left[\max_{1 \leq i \leq \tilde{n}} |g_i| \right] \geq \frac{K}{2e} \sqrt{\frac{\log n}{n}}$$

□

On peut donc réunir la **proposition 2.6** et le **théorème 2.4** pour obtenir $k \geq c(\epsilon) \log n$ lorsque B_2^n est l'ellipsoïde de John pour $B_{\|\cdot\|}$, en utilisant la **remarque 1.6** quitte à diviser k par 2, on peut généralisé à toutes les normes et donc conclure la démonstration du théorème de Dvoretzky.

3 SECTIONS PRESQUE EUCLIDIENNES DE ℓ_p^N

3.1. CAS $1 \leq p < 2$

Proposition 3.1. Soit $1 \leq p < 2$, pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $c(\varepsilon) > 0$ tel que pour tous $n \geq 2$, ℓ_2^k s'injecte $(1 + \varepsilon)$ -continûment dans ℓ_p^n pour un $k \geq c(\varepsilon)n$.

Démonstration. Par l'inégalité de Hölder $\|x\|_p \leq n^{\frac{1}{p}-\frac{1}{2}}|x|$, c'est-à-dire $b \leq n^{\frac{1}{p}-\frac{1}{2}}$. Comme les normes sont des applications convexes, par l'inégalité de Jensen :

$$\mathbb{E}\left[\left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p\right)^{\frac{1}{p}}\right] \geq \left(\sum_{i=1}^n \mathbb{E}[|x_i|^p]\right)^{\frac{1}{p}} = n^{\frac{1}{p}} \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

Et donc

$$\begin{aligned} M &:= \int_{S^{n-1}} \|x\|_p d\mu(x) \\ &= \mathbb{E}\left[\frac{\|x\|_p}{|x|}\right] \\ &= \frac{\mathbb{E}[|x|_p]}{\mathbb{E}[|x|]} \geq n^{\frac{1}{p}-\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \end{aligned}$$

Par le **théorème 2.4** ℓ_2^k s'injecte $(1 + \varepsilon)$ -continûment dans ℓ_p^n pour un $k \geq c(\varepsilon)(\frac{E}{b})^2 n = \tilde{c}(\varepsilon)n$. \square

3.2. CAS $2 \leq p < \infty$

Proposition 3.2. Soit $2 \leq p < \infty$, pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $c(\varepsilon) > 0$ tel que pour tous $n \geq 2$, ℓ_2^k s'injecte $(1 + \varepsilon)$ -continûment dans ℓ_p^n pour un $k \geq c(\varepsilon)n^{\frac{2}{p}}$.

Démonstration. Par l'inégalité de Hölder $\|x\|_p \leq |x|$, c'est-à-dire $b \leq 1$. Comme pour la proposition qui précède :

$$\mathbb{E}\left[\left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p\right)^{\frac{1}{p}}\right] \geq \left(\sum_{i=1}^n \mathbb{E}[|x_i|^p]\right)^{\frac{1}{p}} = n^{\frac{1}{p}} \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

Et donc

$$\begin{aligned} M &:= \int_{S^{n-1}} \|x\|_p d\mu(x) \\ &= \mathbb{E}\left[\frac{\|x\|_p}{|x|}\right] \\ &= \frac{\mathbb{E}[|x|_p]}{\mathbb{E}[|x|]} \geq n^{\frac{1}{p}-\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \end{aligned}$$

Par le **théorème 2.4** ℓ_2^k s'injecte $(1+\varepsilon)$ -continûment dans ℓ_p^n pour un $k \geq c(\varepsilon)(\frac{M}{b})^2 n = \tilde{c}(\varepsilon)n^{\frac{2}{p}}$. \square

Si p n'est pas trop grand par rapport à n on peut améliorer la proposition précédente, en remplaçant $c(\varepsilon)$ par une fonction $c_p(\varepsilon) \underset{p \rightarrow \infty}{\sim} \tilde{c}(\varepsilon)p$.

Proposition 3.3. Soit $2 \leq p$, pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $c_p(\varepsilon) > 0$ tel que pour tout $n \in \mathbb{N}$ avec $p < \log n$, ℓ_2^k s'injecte $(1+\varepsilon)$ -continûment dans ℓ_p^n , pour $k \geq c_p(\varepsilon)n^{\frac{2}{p}}$.

Démonstration.

$$M =: \int_{S^{n-1}} \|x\|^p d\mu(x) = \mathbb{E} \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}}{\left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right] = \frac{\mathbb{E} \left[\left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \right]}{\mathbb{E} \left[\left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]}$$

Par l'inégalité de Hölder on a $\|x\|_p \leq \|x\|_2$, donc $b \leq 1$. Posons $m =: \lfloor e^p \rfloor$ et divisons $\{1, \dots, n\}$ en $N = \lceil \frac{n}{m} \rceil$ parties disjointes I_1, \dots, I_N tel que pour $j < N$, $\text{card}(I_j) = m$, on a

$$\begin{aligned} \mathbb{E} \left[\left(\sum_{i=1}^n |g_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \right] &= \mathbb{E} \left[\left(\sum_{j \leq N} \sum_{i \in I_j} |g_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \right] \\ &\geq \mathbb{E} \left[\left(\sum_{j \leq N} (\max_{i \in I_j} |g_i|)^p \right)^{\frac{1}{p}} \right] \\ &\geq \left(\sum_{j \leq N} (\mathbb{E}[\max_{i \in I_j} |g_i|])^p \right)^{\frac{1}{p}} \\ &\geq (N-1)^{\frac{1}{p}} c \sqrt{\log m} \text{ par le lemme 1.8} \end{aligned}$$

Où $c > 0$ est une constante universelle, de plus :

$$\begin{aligned} \frac{(N-1)^{\frac{1}{p}}}{N^{\frac{1}{p}}} &= \left(\frac{N-1}{N} \right)^{\frac{1}{p}} \\ &= \left(1 - \frac{1}{N} \right)^{\frac{1}{p}} \\ &\geq \left(1 - \frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{p}} = 2^{-\frac{1}{p}} \end{aligned}$$

Car $N \geq 2$ par hypothèse, et finalement :

$$\begin{aligned} M &\geq N^{\frac{1}{p}} 2^{-\frac{1}{p}} c \sqrt{\log \lfloor e^p \rfloor} n^{-\frac{1}{2}} \\ &\geq n^{\frac{1}{p} - \frac{1}{2}} C_p \end{aligned}$$

Où $C_p = 2^{-\frac{1}{p}} c \sqrt{\log \lfloor e^p \rfloor} \underset{p \rightarrow \infty}{\sim} c \sqrt{p}$.

Par le **théorème 2.4** ℓ_2^k s'injecte $(1+\varepsilon)$ -continûment dans ℓ_p^n , pour

$$\begin{aligned} k &\geq c(\varepsilon) \left(\frac{E}{b} \right)^2 n \\ &\geq c_p(\varepsilon) n^{\frac{2}{p}}, \text{ avec } c_p(\varepsilon) = c(\varepsilon) C_p^2 \underset{p \rightarrow \infty}{\sim} \tilde{c}(\varepsilon) p \end{aligned}$$

\square

Remarque 3.4. Dans le cas contraire si $p \geq \log n$, alors $n^{\frac{2}{p}} \leq e^2$ donc dans ce cas la meilleur estimation est celle donné par le théorème de Dvoretzky.

RÉFÉRENCES

- [1] G. SCHECHTMAN, “Euclidean sections of convex bodies,” 2008.
- [2] A. GROTHENDIECK, “Sur certains classes de suites dans les espaces de Banach, et le théorème de Dvoretzky-Rogers,” 1956.
- [3] V. MILMAN, “New proof of the theorem of A. Dvoretzky on intersections of convex bodies,” 1971.
- [4] Y. GORDON, “On Milman’s inequality and random subspaces which escape through a mesh in \mathbb{R}^n ,” 1988.
- [5] G. SCHECHTMAN, “A remark concerning the dependence on ε in dvoretzky’s theorem,” 1989.
- [6] G. SCHECHTMAN, “Concentration results and applications,” 2003.
- [7] G. PISIER, *The volume of convex bodies and Banach space geometry*. Cambridge University Press, 1989.
- [8] V. MILMAN, “Dvoretzky theorem - thirty years later,” 1992.
- [9] V. MILMAN et G. SCHECHTMAN, *Asymptotic theory of finite dimensional normed space*. Springer, 1986.