



**HAL**  
open science

## Contre-exemple dans le théorème limite central pour les champs aléatoires réels

Mohamed El Machkouri, Dalibor Volny

► **To cite this version:**

Mohamed El Machkouri, Dalibor Volny. Contre-exemple dans le théorème limite central pour les champs aléatoires réels. *Annales de l'Institut Henri Poincaré (B) Probabilités et Statistiques*, 2003, 39 (2), pp.325-337. hal-00488689

**HAL Id: hal-00488689**

**<https://hal.science/hal-00488689>**

Submitted on 2 Jun 2010

**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.

# Contre-exemple dans le théorème limite central pour les champs aléatoires réels

Mohamed EL MACHKOURI, Dalibor VOLNÝ  
Laboratoire de Mathématiques Raphaël Salem  
UMR CNRS 6085, Université de Rouen  
mohamed.elmachkouri@univ-rouen.fr  
dalibor.volny@univ-rouen.fr

11 Mai 2003

## Abstract

We consider the ergodic dynamical system  $(\Omega, \mathcal{F}, \mu, T)$  with positive entropy where  $\Omega$  is a Lebesgue space,  $\mu$  is a probability measure and  $T$  is a measure preserving  $\mathbb{Z}^d$ -action. We show that for any nonnegative real  $p$ , there is a real function  $f \in L^p(\Omega)$  and a collection  $\mathcal{A}$  of regular Borel sets of  $[0, 1]^d$  satisfying an entropy condition with inclusion such that  $(f \circ T^k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  is a stationary martingale difference random field but does not satisfy the functional central limit theorem (or invariance principle) with regard to the family  $\mathcal{A}$ .

*Key words* : martingale difference random field, metric entropy, functional central limit theorem, invariance principle.

## Résumé

Nous considérons le système dynamique ergodique d'entropie strictement positive  $(\Omega, \mathcal{F}, \mu, T)$  où  $\Omega$  est un espace de Lebesgue,  $\mu$  est une mesure de probabilité et  $T$  est une action de  $\mathbb{Z}^d$ . Nous montrons que pour tout réel  $p$  positif, il existe une application réelle  $f \in L^p(\Omega)$  et une famille  $\mathcal{A}$  de boréliens réguliers de  $[0, 1]^d$  vérifiant une condition d'entropie métrique avec inclusion telles que le champ aléatoire stationnaire  $(f \circ T^k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  soit de type accroissement d'une martingale mais ne satisfasse pas le théorème central limite fonctionnel (ou principe d'invariance) relativement à la classe  $\mathcal{A}$ .

*Mots clés* : champ aléatoire, accroissement d'une martingale, entropie métrique, théorème central limite fonctionnel, principe d'invariance.

## 1 Introduction

Considérons le système dynamique  $(\Omega, \mathcal{F}, \mu, T)$  où  $\Omega$  est un espace de Lebesgue,  $\mu$  est une mesure de probabilité et  $T$  est une action de  $\mathbb{Z}^d$  préservant la mesure  $\mu$  (i.e. pour tous éléments  $i$  et  $j$  dans  $\mathbb{Z}^d$ ,  $T^i$  et  $T^j$  sont des transformations mesurables préservant la mesure, définies de  $\Omega$  dans  $\Omega$  telles que  $T^i \circ T^j = T^{i+j}$ ). On appelle champ aléatoire réel toute famille  $(X_k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  de variables aléatoires réelles définies sur l'espace probabilisé  $(\Omega, \mathcal{F}, \mu)$  et on dit que  $(X_k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  est stationnaire si pour tout  $(k, n) \in \mathbb{Z}^d \times \mathbb{N}^*$  et tout  $(i_1, \dots, i_n) \in \mathbb{Z}^{nd}$ , les vecteurs  $(X_{i_1}, \dots, X_{i_n})$  et  $(X_{i_1+k}, \dots, X_{i_n+k})$  ont même loi. Un élément  $A$  de la tribu  $\mathcal{F}$  est dit invariant si pour tout élément  $k$  de  $\mathbb{Z}^d$ ,  $T^k(A) = A$  presque sûrement (p.s.). On note  $\mathcal{I}$  la tribu des éléments invariants de  $\mathcal{F}$  et on dit que  $\mu$  est ergodique si tout élément  $A$  de  $\mathcal{I}$  est de mesure 0 ou 1. On dit qu'une sous-tribu  $\mathcal{M}$  de  $\mathcal{F}$  est une tribu  $T$ -invariante si pour tout élément  $k$  de  $\mathbb{Z}^d$ , on a  $T^k \mathcal{M} = \mathcal{M}$ . Soit  $\mathcal{A} \subset \mathcal{B}([0, 1]^d)$  une collection de boréliens de  $[0, 1]^d$ , nous dirons qu'un élément  $A$  de  $\mathcal{A}$  est régulier si  $\lambda(\partial A) = 0$  où  $\lambda$  est la mesure de Lebesgue sur  $\mathbb{R}^d$ . On munit  $\mathcal{A}$  de la pseudo-métrique  $d$  définie pour tous éléments  $A$  et  $B$  de  $\mathcal{A}$  par  $d(A, B) = \lambda(A \Delta B)$ . On notera  $C(\mathcal{A})$  l'espace vectoriel des fonctions réelles continues sur  $\mathcal{A}$  que l'on munit de la norme maximale définie pour toute  $f \in C(\mathcal{A})$ , par

$$\|f\|_{\mathcal{A}} = \sup_{A \in \mathcal{A}} |f(A)|.$$

$(C(\mathcal{A}), \|\cdot\|_{\mathcal{A}})$  est alors un espace de Banach.

Soit  $X = (X_k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  un champ aléatoire réel stationnaire. Le processus de sommes partielles associé à  $X$  que l'on considère est défini pour tout  $A \in \mathcal{A}$  et tout entier  $n \geq 1$ , par

$$S_n(A) = \sum_{i \in \{1, \dots, n\}^d} \lambda(nA \cap R_i) X_i$$

où pour tout  $i = (i_1, \dots, i_d) \in \mathbb{Z}^d$ ,  $R_i = ]i_1 - 1, i_1] \times \dots \times ]i_d - 1, i_d]$ .

Pour contrôler la taille de la classe  $\mathcal{A}$ , on utilise classiquement l'entropie métrique : pour tout  $\epsilon > 0$ , on appelle entropie métrique de  $\mathcal{A}$  et on note  $H(\mathcal{A}, d, \epsilon)$ , le logarithme népérien du plus petit nombre de boules ouvertes (pour la pseudo-métrique  $d$ ) de rayon  $\epsilon$  nécessaires pour recouvrir  $\mathcal{A}$ .

Une notion plus stricte est celle d'entropie métrique avec inclusion : pour tout  $\epsilon > 0$ ,

on suppose qu'il existe une collection finie  $\mathcal{A}(\epsilon)$  de boréliens de  $[0, 1]^d$  telle que pour tout  $A \in \mathcal{A}$ , il existe  $A^-, A^+ \in \mathcal{A}(\epsilon)$  tels que  $A^- \subset A \subset A^+$  et  $d(A^-, A^+) \leq \epsilon$ . On appelle entropie métrique avec inclusion et on note  $\mathbb{H}(\mathcal{A}, d, \epsilon)$ , le logarithme népérien du plus petit cardinal d'une telle collection.

Notons que pour tout  $\epsilon > 0$ ,  $H(\mathcal{A}, d, \epsilon) \leq \mathbb{H}(\mathcal{A}, d, \epsilon)$ . D'autre part, si  $\rho$  désigne la pseudo-métrique définie pour tous éléments  $A$  et  $B$  de  $\mathcal{A}$ , par  $\rho(A, B) = \sqrt{\lambda(A \Delta B)}$  alors pour tout  $\epsilon > 0$ , on a

$$\mathbb{H}(\mathcal{A}, \rho, \epsilon) = \mathbb{H}(\mathcal{A}, d, \epsilon^2). \quad (1)$$

On appelle mouvement brownien standard indexé par  $\mathcal{A}$ , le processus Gaussien  $W$  de moyenne nulle, à trajectoires dans  $C(\mathcal{A})$  qui vérifie pour tous  $A$  et  $B$  dans  $\mathcal{A}$ , l'égalité  $\text{Cov}(W(A), W(B)) = \lambda(A \cap B)$ .

On sait d'après Dudley ([10], 1973) qu'un tel processus est bien défini dès que

$$\int_0^1 \sqrt{H(\mathcal{A}, \rho, \epsilon)} d\epsilon < +\infty. \quad (2)$$

A fortiori, si

$$\int_0^1 \left( \frac{\mathbb{H}(\mathcal{A}, d, \epsilon)}{\epsilon} \right)^{1/2} d\epsilon < +\infty, \quad (3)$$

alors le mouvement Brownien standard  $W$  indexé par  $\mathcal{A}$  est bien défini.

D'après (1), la condition (3) est équivalente à la condition suivante

$$\int_0^1 \sqrt{\mathbb{H}(\mathcal{A}, \rho, \epsilon)} d\epsilon < +\infty. \quad (4)$$

On dit que le théorème central limite fonctionnel (TCLF) (ou principe d'invariance) a lieu relativement à la classe  $\mathcal{A}$  si le processus  $\{n^{-d/2} S_n(A); A \in \mathcal{A}\}$  converge en loi dans  $(C(\mathcal{A}), \|\cdot\|_{\mathcal{A}})$  vers un mouvement Brownien standard indexé par  $\mathcal{A}$ .

Les premiers résultats de type TCLF pour de tels processus de sommes partielles ont été établis lorsque les champs aléatoires considérés sont indépendants et identiquement distribués (iid) et lorsque la classe  $\mathcal{A}$  coïncide avec la classe  $\mathcal{Q}_d$  des quadrants de  $[0, 1]^d$  (i.e. la classe  $\{[0, t_1] \times \dots \times [0, t_d]; t \in [0, 1]^d\}$ ). En effet, Wichura ([18], 1969) démontra ce résultat lorsque les champs aléatoires considérés sont de carré intégrable améliorant ainsi celui de Kuelbs ([13], 1968) dans lequel des conditions plus restrictives sont requises au niveau des moments. Ces résultats se réduisent en dimension 1 au principe d'invariance de Donsker ([9], 1951).

Pyke ([17], 1983) démontra un résultat similaire pour des classes d'ensembles plus larges

vérifiant la condition (3). Cependant, les moments requis dépendent de la classe  $\mathcal{A}$  considérée. Bass ([2], 1985) et simultanément Alexander et Pyke ([1], 1986) ont étendu le résultat de Pyke ([17], 1983) au cas où seuls les moments d'ordre 2 sont supposés finis. Goldie et Greenwood ([11], 1986) ont étendu la méthode de Bass ([2], 1985) au cas des champs aléatoires  $\phi$ -mélangeants et  $\beta$ -mélangeants pour des coefficients de mélange uniformes (c'est à dire que le supremum est pris sur une collection de couples de tribus  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  où chacune des tribus  $\mathcal{U}$  et  $\mathcal{V}$  peut être engendrée par une infinité de variables aléatoires).

Chen ([4], 1991) a démontré également un principe d'invariance lorsque le processus de sommes partielles est issu de champs aléatoires  $\phi$ -mélangeants où les coefficients de  $\phi$ -mélange considérés sont non uniformes (les coefficients de  $\phi$ -mélange non uniformes ont été introduit par Dobrushin et Nahapetian ([8], 1974)).

Enfin, Dedecker ([6], [7], 1998) a donné un critère projectif sous lequel une version non ergodique du principe d'invariance a lieu lorsque le processus de sommes partielles est issu de champs aléatoires stationnaires bornés et indexé par une classe d'ensembles  $\mathcal{A}$  dont la seule restriction est de vérifier la condition d'entropie métrique (2). En particulier, ce résultat est valable pour les champs aléatoires bornés de type accroissement d'une martingale. D'autre part, un article antérieur de Basu et Dorea ([3], 1979) montre que le principe d'invariance a lieu pour des champs aléatoires de carré intégrable de type accroissement d'une martingale, lorsque l'on considère la classe  $\mathcal{Q}_d$  des quadrants de  $[0, 1]^d$ .

Pour cette classe des quadrants, le critère projectif de Dedecker ([6], [7], 1998) entraîne le principe d'invariance pour les champs aléatoires réels stationnaires ayant des moments d'ordre  $2 + \epsilon$ ,  $\epsilon > 0$ . De plus, ce critère projectif fournit de nouveaux critères pour les champs aléatoires  $\phi$ -mélangeants bornés. Par ailleurs, sous l'hypothèse (4), en adaptant la méthode de Bass ([2], 1985) et en établissant des inégalités exponentielles de type Bernstein, Dedecker ([6], [7], 1998) donne des critères pour des champs aléatoires  $\phi$ -mélangeants non bornés ayant des moments d'ordre strictement supérieur à 2. Notre objectif dans ce travail est de construire pour tout réel  $p$  positif, un champ aléatoire réel stationnaire  $(X_k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  de type accroissement d'une martingale avec  $X_0 \in L^p(\Omega, \mathcal{F}, \mu)$  et une classe  $\mathcal{A}$  de boréliens réguliers de  $[0, 1]^d$  satisfaisant la condition (3) d'entropie métrique avec inclusion tels que le principe d'invariance n'ait pas lieu relativement à  $\mathcal{A}$ .

Autrement dit, nous mettons en évidence le fait que les hypothèses sur la classe  $\mathcal{A}$  garantissant le TCLF pour les champs aléatoires réels iid ([1], [2]) ou de type accroisse-

ment d'une martingale bornés ([6], [7]) ne suffisent plus si on considère des champs aléatoires réels non bornés de type accroissement d'une martingale.

Dorénavant, on suppose que  $\mu$  est ergodique et que l'entropie du système dynamique  $(\Omega, \mathcal{F}, \mu, T)$  est strictement positive.

Sur le réseau  $\mathbb{Z}^d$ , on définit la relation d'ordre lexicographique  $<_{lex}$  comme suit : si  $m = (m_1, \dots, m_d)$  et  $n = (n_1, \dots, n_d)$  sont deux éléments de  $\mathbb{Z}^d$  distincts, la notation  $m <_{lex} n$  signifie que, ou bien  $m_1 < n_1$ , ou bien il existe  $i \in \{2, \dots, d\}$  tel que  $m_i < n_i$  et  $m_j = n_j$  pour  $1 \leq j < i$ .

On définit également une autre relation d'ordre  $<$  sur  $\mathbb{Z}^d$  de la façon suivante : si  $m = (m_1, \dots, m_d)$  et  $n = (n_1, \dots, n_d)$  sont deux éléments de  $\mathbb{Z}^d$  distincts, la notation  $m < n$  signifie que pour tout  $i \in \{1, \dots, d\}$ ,  $m_i < n_i$ .

Il existe plusieurs façons de définir un champ aléatoire de type accroissement d'une martingale (AM). Soit  $X = (X_k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  un champ aléatoire réel. Nous dirons que  $X$  est un champ aléatoire de type AM si et seulement si (ssi) pour tout  $m \in \mathbb{Z}^d$ ,

$$E(X_m | \sigma(X_k; k <_{lex} m)) = 0 \quad \text{p.s.}$$

Ce type de champ aléatoire vérifie le critère projectif introduit par Dedecker ([6], [7], 1998).

Une définition plus stricte est celle utilisée par Basu et Dorea ([3], 1979) :  $X$  est un champ aléatoire de type AM ssi pour tous éléments  $m < n$  de  $\mathbb{Z}^d$ ,

$$E(X_n | \sigma(X_{(i_1, \dots, i_d)}; \exists 1 \leq s \leq d \ i_s \leq m_s)) = 0 \quad \text{p.s.}$$

En effet, Basu et Dorea ([3], 1979) ont démontré le principe d'invariance relativement à la classe des quadrants de  $[0, 1]^d$  pour ce type de champs aléatoires lorsque seuls les moments d'ordre 2 sont supposés finis.

Enfin, Nahapetian et Petrosian ([14], 1992) ont introduit une notion encore plus stricte :  $X$  est un champ aléatoire de type AM au sens fort (AMF) ssi pour tout  $m \in \mathbb{Z}^d$ ,

$$E(X_m | \sigma(X_k; k \neq m)) = 0 \quad \text{p.s.}$$

## 2 Résultat principal

Si  $n$  un entier strictement positif,  $A$  un borélien de  $[0, 1]^d$  et  $f$  une application réelle mesurable définie sur  $\Omega$ , on adopte la notation suivante

$$S_n(f, A) = \sum_{i \in \{1, \dots, n\}^d} \lambda(nA \cap R_i) f \circ T^i.$$

Le résultat principal de cet article est le suivant.

**Théorème** *Pour tout réel  $p$  positif, il existe une application réelle  $f \in L^p(\Omega)$  et une classe  $\mathcal{A}$  de boréliens réguliers de  $[0, 1]^d$  vérifiant la condition (3) d'entropie métrique avec inclusion telles que le champ aléatoire stationnaire  $(f \circ T^k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  soit de type AMF et telles que le principe d'invariance n'ait pas lieu relativement à  $\mathcal{A}$ .*

*Autrement dit, le processus de sommes partielles  $\{n^{-d/2} S_n(f, A); A \in \mathcal{A}\}$  ne converge pas en loi dans  $C(\mathcal{A})$ .*

Ce résultat montre que contrairement aux champs aléatoires iid de carré intégrable étudiés par Bass ([2], 1985) et simultanément Alexander et Pyke ([1], 1986), la condition (3) ne garantit pas le TCLF pour les champs aléatoires (non bornés) de type AM. Néanmoins, si  $\mathcal{A}$  est la classe  $\mathcal{Q}_d$  des quadrants de  $[0, 1]^d$  et si  $p$  est strictement supérieur à 2, le TCLF a lieu aussi bien pour les champs aléatoires iid que pour les champs aléatoires de type AM (voir Dedecker ([6], [7], 1998)).

Rappelons que sous la condition (4), le TCLF de Dedecker ([6], [7], 1998) entraîne le principe d'invariance pour les champs aléatoires bornés de type AM. Par conséquent, il est naturel de poser le problème de la validité du TCLF pour les champs aléatoires de type AM sous des hypothèses de moments exponentiels.

## 3 Démonstration

### 3.1 Construction de l'application $f$

On a besoin du lemme suivant.

**Lemma 1** *Il existe deux sous-tribus  $T$ -invariantes  $\mathcal{B}$  et  $\mathcal{C}$  de  $\mathcal{F}$  et une fonction  $\mathcal{B}$ -mesurable  $g$ , définie sur  $\Omega$  et à valeurs  $-1, 0$  ou  $1$  telles que les propriétés suivantes soient satisfaites :*

- 1) *les tribus  $\mathcal{B}$  et  $\mathcal{C}$  sont indépendantes,*
- 2) *le champ aléatoire  $(g \circ T^k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  est iid et de moyenne nulle,*
- 3) *le système dynamique  $(\Omega, \mathcal{C}, \mu, T)$  est apériodique (ie:  $\forall k \in (\mathbb{Z}^d)^* \mu(\{\omega \in \Omega \mid T^k \omega = \omega\}) = 0$ ).*

De plus, il existe  $0 < a \leq 1$  tel que  $\mu(g = -1) = \mu(g = 1) = a/2$  et  $\mu(g = 0) = 1 - a$  et si l'entropie  $h(T)$  du système  $(\Omega, \mathcal{F}, \mu, T)$  est strictement supérieure à 1, on peut choisir  $a = 1$ .

*Preuve du lemme 1.* Notons  $h$  l'entropie du système dynamique  $(\Omega, \mathcal{F}, \mu, T)$ . Soit  $a \in ]0, 1]$  tel que

$$h_1 = -(1 - a) \log_2(1 - a) - a \log_2(a/2) < h.$$

Posons  $\Omega_1 = \{-1, 0, 1\}$  et notons  $\nu$  la mesure produit  $(a/2, 1 - a, a/2)^{\otimes \mathbb{Z}^d}$ . Considérons le système dynamique  $S_1 = (\Omega_1^{\mathbb{Z}^d}, \nu, (\theta_k)_{k \in \mathbb{Z}^d})$  où pour tout  $k \in \mathbb{Z}^d$  et tout  $\omega \in \Omega_1^{\mathbb{Z}^d}$ ,  $(\theta_k(\omega))_i = \omega_{i+k}$ ,  $i \in \mathbb{Z}^d$ .  $S_1$  est un champ aléatoire de Bernouilli d'entropie  $h_1$  ([5], 1972, exemple 2, page 18). Considérons un autre Bernouilli  $S_2$  d'entropie inférieure ou égale à  $h - h_1$ .  $S_1 \times S_2$  est alors un Bernouilli d'entropie plus petite que  $h$ . D'après la version multidimensionnelle du théorème de Sinai ([15], 1987),  $S_1 \times S_2$  est un facteur du système  $(\Omega, \mathcal{F}, \mu, T)$ . Nous avons donc dans ce système une copie  $\tilde{S}_1$  de  $S_1$  et une copie  $\tilde{S}_2$  de  $S_2$  qui sont indépendantes. Ce qui fournit les sous-tribus  $\mathcal{B}$  et  $\mathcal{C}$ . Soit  $F : (\Omega, \mathcal{B}, \mu) \rightarrow S_1$  une bijection bimesurable et soit  $p_0 : S_1 \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ ,  $(\omega_i)_{i \in \mathbb{Z}^d} \mapsto \omega_0$ . On vérifie alors que  $g = p_0 \circ F$  satisfait les propriétés voulues.

Ce qui achève la démonstration du lemme 1.

Dorénavant, pour simplifier la construction, nous supposerons que  $h(T) > 1$ . On peut donc choisir  $g$  de sorte que  $\mu(g = -1) = \mu(g = 1) = 1/2$  (le cas  $h(T) > 0$  se traite de façon similaire). Fixons  $d \in \mathbb{N}^*$ . Sans perte de généralité, on peut supposer que  $p$  est un entier naturel arbitrairement grand.

Pour tout réel  $r \geq 1$ , on pose

$$\begin{aligned} n_r &= 4 \times 9^{8rp^2}, \\ L_r &= \frac{n_r^{d/2}}{9^{2(r-1)dp}} = 2^d \times 9^{2dp} \times 9^{2rdp(2p-1)}, \\ k_r &= \frac{n_r^d}{9^{4rdp^2}} = 4^d \times 9^{4rdp^2}, \\ K_r &= \frac{n_r}{k_r^{1/d}} = 9^{4rp^2}, \\ \epsilon_r &= \frac{L_r \times K_r^d}{n_r^d} = \frac{L_r}{k_r} = \frac{9^{2dp}}{2^d \times 9^{2rdp}}. \end{aligned}$$

Le lecteur pourra vérifier que si on pose  $\alpha = (2p + 1)^{-1} \in ]0, 1[$ , on a pour tout réel  $r \geq 1$ ,

$$\epsilon_r = \frac{L_{\alpha r}}{n_{\alpha r}^d}. \quad (5)$$



D'autre part, les suites  $(n_r)_{r \geq 1}$ ,  $(k_r)_{r \geq 1}$ ,  $(L_r)_{r \geq 1}$ ,  $(L_r/2)_{r \geq 1}$ ,  $(L_r^{1/d})_{r \geq 1}$  et  $(K_r)_{r \geq 1}$  sont des suites croissantes d'entiers positifs tandis que  $(\epsilon_r)_{r \geq 1}$  est une suite de réels strictement positifs qui décroît vers zéro.

De plus, on peut vérifier que pour tout entier  $r \geq 2$ ,

$$\frac{n_r^{d/2}}{L_r} \geq 2 \sum_{s=1}^{r-1} \frac{n_s^{d/2}}{L_s}. \quad (6)$$

Soit  $(\delta_r)_{r \geq 1}$  une suite de réels strictement positifs telle que

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} L_r \delta_r = 0. \quad (7)$$

Puisque  $(\Omega, \mathcal{C}, \mu, T)$  est apériodique, la version multidimensionnelle du lemme de Rokhlin ([5], [12], 1972) assure que pour tout entier  $r \geq 1$ , il existe  $F_r \in \mathcal{C}$  tel que les éléments de  $\{T^{-u} F_r\}_{u \in \{0, \dots, K_r-1\}^d}$  soient deux à deux disjoints et

$$\mu \left( \bigcup_{u_1=0}^{K_r-1} \dots \bigcup_{u_d=0}^{K_r-1} T^{-(u_1, \dots, u_d)} F_r \right) \geq 1 - \delta_r. \quad (8)$$

Pour tout entier  $r \geq 1$ , posons

$$f_r = \frac{n_r^{d/2}}{L_r} g \mathbb{1}_{F_r}.$$

Notons

$$f = \sum_{r=1}^{+\infty} f_r.$$

Ainsi,  $f$  est une application réelle non bornée définie sur  $\Omega$ .

De plus, pour tout entier  $r \geq 1$ ,

$$\|f_r\|_p^p \leq \mu(F_r) \times \left( \frac{n_r^{d/2}}{L_r} \right)^p \leq \frac{1}{K_r^d} \times \left( \frac{n_r^{d/2}}{L_r} \right)^p = 9^{-2(r+1)dp^2}.$$

On en déduit

$$\|f\|_p \leq \sum_{r=1}^{+\infty} 9^{-2(r+1)dp} < +\infty.$$

Par conséquent,  $f \in L^p(\Omega)$ .

Soit  $k \in \mathbb{Z}^d$ , on pose  $\mathcal{F}_k = \sigma(g \circ T^i; i \neq k) \vee \mathcal{C} \supset \sigma(f \circ T^i; i \neq k)$ . En utilisant l'indépendance des tribus  $\mathcal{B}$  et  $\mathcal{C}$ , on montre que  $E(f \circ T^k | \mathcal{F}_k) = 0$ . Autrement dit, le champ aléatoire réel  $(f \circ T^k)_{k \in \mathbb{Z}^d}$  est du type AMF.

### 3.2 Construction de la classe $\mathcal{A}$

Pour tout entier  $r \geq 1$ , on note  $\mathcal{A}_r$  l'ensemble des Boréliens  $A$  de  $[0, 1]^d$  satisfaisant la propriété suivante : il existe  $(u_1, \dots, u_d)$  dans  $\{0, \dots, K_r - 1\}^d$  tel que pour tout  $l$  dans  $\{1, \dots, L_r/2\}$ , il existe un vecteur  $(a_{l,s})_{s \in \{1, \dots, d\}}$  dans  $\{0, \dots, L_r^{1/d} - 1\}^d$  tel que

$$i_{l,s} = u_s + a_{l,s}K_r$$

et

$$A = \bigcup_{l=1}^{L_r/2} \left] \frac{i_{l,1} - 1}{n_r}, \frac{i_{l,1}}{n_r} \right] \times \dots \times \left] \frac{i_{l,d} - 1}{n_r}, \frac{i_{l,d}}{n_r} \right].$$

Notons

$$\mathcal{A} = \bigcup_{r=1}^{+\infty} \mathcal{A}_r.$$

Pour montrer que la collection  $\mathcal{A}$  satisfait la condition (3), on a besoin d'estimer pour tout entier  $r \geq 2$ , les nombres d'entropie métrique  $\mathbb{H}(\mathcal{A}, d, \epsilon_r)$ .

Soient  $r \geq 2$  et  $1 \leq j \leq r - 1$  deux entiers. Puisque le cardinal  $|\mathcal{A}_j|$  de  $\mathcal{A}_j$  est égal à  $K_j^d C_{L_j}^{L_j/2}$ , on a la grossière majoration suivante :

$$\exp(\mathbb{H}(\mathcal{A}_j, d, \epsilon_r)) \leq K_j^d C_{L_j}^{L_j/2}. \quad (9)$$

Cependant, si  $L_j \leq \epsilon_r n_j^d$ , on peut obtenir une estimation meilleure, à savoir,

$$\exp(\mathbb{H}(\mathcal{A}_j, d, \epsilon_r)) \leq K_j^d + 1. \quad (10)$$

De plus, puisque  $\cup_{j \geq r} \mathcal{A}_j$  est inclus dans le cube  $B_r = [0, \epsilon_r^{1/d}]^d$  de mesure  $\epsilon_r$ , on a

$$\exp(\mathbb{H}(\cup_{j \geq r} \mathcal{A}_j, d, \epsilon_r)) \leq 2. \quad (11)$$

D'autre part, d'après la définition de l'entropie métrique avec inclusion, on a

$$\exp(\mathbb{H}(\mathcal{A}, d, \epsilon_r)) \leq \sum_{j=1}^{r-1} \exp(\mathbb{H}(\mathcal{A}_j, d, \epsilon_r)) + \exp(\mathbb{H}(\cup_{j \geq r} \mathcal{A}_j, d, \epsilon_r)). \quad (12)$$

On déduit des inégalités (9), (10), (11) et (12), la majoration suivante :

$$\exp(\mathbb{H}(\mathcal{A}, d, \epsilon_r)) \leq 2 + \sum_{j=1}^{r-1} (K_j^d + 1) \mathbb{1}_{\{L_j \leq \epsilon_r n_j^d\}} + K_j^d C_{L_j}^{L_j/2} \mathbb{1}_{\{L_j > \epsilon_r n_j^d\}}. \quad (13)$$

Finalement, d'après (5), (13) et le fait que la suite  $(L_j/n_j^d)_{j \geq 1}$  soit décroissante, on obtient

$$\exp(\mathbb{H}(\mathcal{A}, d, \epsilon_r)) \leq 2 + \sum_{j=1}^{[\alpha r]} K_j^d C_{L_j}^{L_j/2} + \sum_{j=[\alpha r]+1}^{r-1} (K_j^d + 1) \quad (14)$$

où  $[\cdot]$  symbolise la fonction partie entière.

Pour montrer la condition (3) d'entropie métrique avec inclusion, il suffit de s'assurer de la convergence de la série

$$\Sigma = \sum_{r=2}^{+\infty} \epsilon_{r-1} \left( \frac{\mathbb{H}(\mathcal{A}, d, \epsilon_r)}{\epsilon_r} \right)^{1/2}.$$

Or

$$\begin{aligned} \Sigma &\leq \sum_{r=2}^{+\infty} \frac{\epsilon_{r-1}}{\sqrt{\epsilon_r}} \left( \log \left( 2 + \sum_{j=1}^{[\alpha r]} K_j^d C_{L_j}^{L_j/2} + \sum_{j=[\alpha r]+1}^{r-1} (K_j^d + 1) \right) \right)^{1/2} && \text{d'après (14)} \\ &\leq \sum_{r=2}^{+\infty} \frac{\epsilon_{r-1}}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\log(2 + L_{\alpha r}! [\alpha r] K_r^d + (r-1-[\alpha r])(K_r^d + 1))} \\ &\leq \sum_{r=2}^{+\infty} \frac{\epsilon_{r-1}}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\log(3r K_r^d (L_{\alpha r}!))} \\ &\leq \underbrace{\sum_{r=2}^{+\infty} \frac{\epsilon_{r-1}}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\log(3r)}}_{\Sigma_1} + \underbrace{\sum_{r=2}^{+\infty} \frac{\epsilon_{r-1}}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\log(K_r^d)}}_{\Sigma_2} + \underbrace{\sum_{r=2}^{+\infty} \frac{\epsilon_{r-1}}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{L_{\alpha r} \log(L_{\alpha r})}}_{\Sigma_3}. \end{aligned}$$

Le lecteur pourra vérifier que les séries  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$  sont convergentes. Vérifions que  $\Sigma_3$  converge également. En effet,

$$\begin{aligned} \Sigma_3 &\sim \sum_{r=2}^{+\infty} \epsilon_r^{1/2} \sqrt{L_{\alpha r} \log(L_{\alpha r})} \\ &= \sum_{r=2}^{+\infty} \frac{L_{\alpha r}}{n_{\alpha r}^{d/2}} \sqrt{\log(L_{\alpha r})} && \text{d'après (5)} \\ &\sim \sum_{r=2}^{+\infty} \frac{L_{\alpha r}}{n_{\alpha r}^{d/2}} \sqrt{r} \\ &= \sum_{r=2}^{+\infty} \frac{\sqrt{r}}{9^{2(\alpha r-1)d}} < +\infty. \end{aligned}$$

Finalement, la série  $\Sigma$  est convergente et par suite, la classe  $\mathcal{A}$  vérifie bien la condition (3).

### 3.3 Le processus de sommes partielles n'est pas tendu

À présent, montrons que le processus  $\{n^{-d/2}S_n(f, A); A \in \mathcal{A}\}$  ne peut pas être tendu dans  $C(\mathcal{A})$ .

Pour cela, il suffit (voir par exemple, [16], 1990) de montrer qu'il existe  $\beta > 0$  tel que

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \limsup_{n \rightarrow +\infty} \mu \left( \sup_{d(A,B) < \delta} n^{-d/2} \left| S_n(f, A) - S_n(f, B) \right| > \beta \right) > 0.$$

Soit  $r \geq 1$  fixé. Notons  $W_r$  l'ensemble des  $\omega \in \Omega$  satisfaisant la propriété suivante : il existe  $u = u(\omega) = (u_1, \dots, u_d) \in \{0, \dots, K_r - 1\}^d$  tel que pour tout  $l = (l_1, \dots, l_d) \in \{0, \dots, L_r^{1/d} - 1\}^d$  et tout  $s \geq r + 1$ , on ait  $T^{u+lK_r}\omega \in F_r$  et  $T^{u+lK_r}\omega \notin F_s$ .

Remarquons que

$$\mu \left( \bigcup_{s \geq r+1} \bigcup_{l \in \{0, \dots, L_r^{1/d} - 1\}^d} T^{-(u+lK_r)} F_s \right) \leq L_r \sum_{s \geq r+1} \frac{1}{K_s^d} \sim 9^{-2rdp}.$$

Par conséquent

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} \mu \left( \bigcap_{s \geq r+1} \bigcap_{l \in \{0, \dots, L_r^{1/d} - 1\}^d} T^{-(u+lK_r)} F_s^c \right) = 1. \quad (15)$$

De (7), (8) et (15), on déduit

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} \mu(W_r) = 1. \quad (16)$$

Soient  $\epsilon > 0$ ,  $u \in \{0, \dots, K_r - 1\}^d$  et  $\omega \in \Omega$ .

Notons

$$\Gamma_r^*(u) = \{u + lK_r \mid l \in \{0, \dots, L_r^{1/d} - 1\}^d\},$$

$$\Gamma_r^+(u, \omega) = \{k \in \Gamma_r^*(u) \mid g(T^k\omega) = 1\},$$

et

$$E_r^u = E_r^u(\epsilon) = \left\{ \omega \in \Omega \mid \left| \frac{|\Gamma_r^+(u, \omega)|}{L_r} - \frac{1}{2} \right| < \epsilon \right\}.$$

Comme  $\Gamma_r^*(u) = u + \Gamma_r^*(0)$ , on a

$$\begin{aligned} |\Gamma_r^+(u, \omega)| &= |u + \{k \in \Gamma_r^*(0) \mid g(T^{u+k}\omega) = 1\}| \\ &= |u + \Gamma_r^+(0, T^u\omega)| \\ &= |\Gamma_r^+(0, T^u\omega)|. \end{aligned}$$

Ainsi

$$\mu(E_r^u) = \mu(T^{-u}E_r^0) = \mu(E_r^0). \quad (17)$$

De plus, d'après la loi faible des grands nombres,

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} \mu(E_r^0) = 1. \quad (18)$$

On définit également  $\Gamma_r(u, \omega)$  comme étant le sous ensemble de  $\Gamma_r^*(u)$  vérifiant

a)  $|\Gamma_r(u, \omega)| = \frac{L_r}{2},$

b)  $\Gamma_r^+(u, \omega) \subset \Gamma_r(u, \omega)$  si  $|\Gamma_r^+(u, \omega)| \leq \frac{L_r}{2},$

c)  $\Gamma_r(u, \omega) \subset \Gamma_r^+(u, \omega)$  si  $|\Gamma_r^+(u, \omega)| > \frac{L_r}{2}.$

Enfin, pour  $\omega \in W_r$ , on pose

$$\Gamma_r(\omega) = \Gamma_r(u(\omega), \omega) \quad \text{et} \quad \Gamma_r^+(\omega) = \Gamma_r^+(u(\omega), \omega).$$

**Lemma 2** Soient  $r \geq 1$  et  $\epsilon > 0$ . Il existe un sous ensemble  $V_r = V_r(\epsilon)$  de  $W_r$  tel que pour tout  $\omega \in V_r$ ,

$$\left| \frac{1}{L_r} \sum_{i \in \Gamma_r(\omega)} g(T^i \omega) - \frac{1}{2} \right| < 2\epsilon \quad (19)$$

et

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} \mu(V_r) = 1. \quad (20)$$

*Preuve du lemme 2.* Il suffit de considérer l'ensemble

$$V_r = V_r(\epsilon) = \left\{ \omega \in W_r \mid \left| \frac{|\Gamma_r^+(\omega)|}{L_r} - \frac{1}{2} \right| < \epsilon \right\}.$$

Avec cette définition de  $V_r$ , on vérifie que l'inégalité (19) est satisfaite.

De plus, comme

$$V_r = \bigcup_{u \in \{0, \dots, K_r - 1\}^d} W_r \cap T^{-u} E_r \cap E_r^u,$$

on a

$$\begin{aligned}
\mu(V_r) &= \sum_{u \in \{0, \dots, K_r - 1\}^d} \mu(W_r \cap T^{-u} F_r \cap E_r^u) \\
&= \sum_{u \in \{0, \dots, K_r - 1\}^d} \mu(W_r \cap T^{-u} F_r) \mu(E_r^u) \quad (\text{car } \mathcal{B} \text{ et } \mathcal{C} \text{ sont indépendantes}) \\
&= \mu(E_r^0) \mu(W_r \cap \bigcup_{u \in \{0, \dots, K_r - 1\}^d} T^{-u} F_r) \quad \text{d'après (17)} \\
&= \mu(E_r^0) \mu(W_r).
\end{aligned}$$

Par conséquent, (16) et (18) entraînent (20).

Ce qui achève la démonstration du lemme 2.

Pour tout  $\omega \in W_r$ , on pose

$$A_r(\omega) = \bigcup_{(i_1, \dots, i_d) \in \Gamma_r(\omega)} \left] \frac{i_1 - 1}{n_r}, \frac{i_1}{n_r} \right] \times \dots \times \left] \frac{i_d - 1}{n_r}, \frac{i_d}{n_r} \right] \in \mathcal{A}_r \subset \mathcal{A}.$$

Remarquons que pour tout  $i$  dans  $\mathbb{Z}^d$  et tout  $\omega$  dans  $W_r$ , on a l'égalité  $\lambda(n_r A_r(\omega) \cap R_i) = \mathbb{1}_{\Gamma_r(\omega)}(i)$ . Dorénavant, on suppose  $0 < \epsilon < 1/16$  et  $r \geq 2$ . Si  $\omega \in W_r$ , on a

$$\begin{aligned}
\left| n_r^{-d/2} S_{n_r} \left( \sum_{s=1}^{r-1} f_s, A_r(\omega) \right) \right| &= \left| n_r^{-d/2} \sum_{i \in \{1, \dots, n_r\}^d} \lambda(n_r A_r(\omega) \cap R_i) \sum_{s=1}^{r-1} f_s(T^i \omega) \right| \\
&\leq \left| n_r^{-d/2} \sum_{i \in \Gamma_r(\omega)} \sum_{s=1}^{r-1} \frac{n_s^{d/2}}{L_s} g(T^i \omega) \mathbb{1}_{F_s}(T^i \omega) \right| \\
&\leq n_r^{-d/2} \sum_{i \in \Gamma_r(\omega)} \sum_{s=1}^{r-1} \frac{n_s^{d/2}}{L_s} \\
&\leq n_r^{-d/2} |\Gamma_r(\omega)| \frac{n_r^{d/2}}{2L_r} \quad \text{d'après (6)} \\
&= \frac{1}{4}.
\end{aligned}$$

D'autre part, si  $\omega \in V_r \subset W_r$ , on a

$$\begin{aligned}
\left| n_r^{-d/2} S_{n_r}(f_r, A_r(\omega)) \right| &= \left| n_r^{-d/2} \sum_{i \in \{1, \dots, n_r\}^d} \lambda(n_r A_r(\omega) \cap R_i) f_r(T^i \omega) \right| \\
&= \left| n_r^{-d/2} \sum_{i \in \Gamma_r(\omega)} \frac{n_r^{d/2}}{L_r} g(T^i \omega) \mathbf{1}_{F_r}(T^i \omega) \right| \\
&= \frac{1}{L_r} \left| \sum_{i \in \Gamma_r(\omega)} g(T^i \omega) \right| \\
&> \frac{1}{2} - 2\epsilon \quad \text{d'après (19)}.
\end{aligned}$$

Ainsi, pour tout  $\omega \in V_r \subset W_r$ , on a

$$\begin{aligned}
\left| n_r^{-d/2} S_{n_r}(f, A_r(\omega)) \right| &= \left| n_r^{-d/2} S_{n_r} \left( \sum_{s=1}^{r-1} f_s, A_r(\omega) \right) + n_r^{-d/2} S_{n_r}(f_r, A_r(\omega)) \right| \\
&> \left( \frac{1}{2} - 2\epsilon \right) - \frac{1}{4} \\
&= \frac{1}{4} - 2\epsilon > 0.
\end{aligned}$$

Où on a utilisé le fait que pour tout  $s \geq r+1$ , tout  $\omega$  dans  $W_r$  et tout  $i$  dans  $\Gamma_r(\omega)$ , on a  $f_s(T^i \omega) = 0$ . Notons  $\beta = 1/4 - 2\epsilon > 0$ . Pour tout  $r \geq 1$  et tout  $\omega$  dans  $V_r$ , on a  $\lambda(A_r(\omega)) = L_r/2n_r^d$ . Soit  $\delta > 0$  fixé. Il existe  $r_\delta \geq 1$  tel que pour tout  $r \geq r_\delta$ , on ait  $L_r/2n_r^d < \delta$ .

Par conséquent, pour tout  $r \geq r_\delta$ , on a

$$\begin{aligned}
&\mu \left( \sup_{d(A,B) < \delta} \left| n_r^{-d/2} S_{n_r}(f, A) - n_r^{-d/2} S_{n_r}(f, B) \right| > \beta \right) \\
&\geq \mu \left( \sup_{\lambda(A) < \delta} \left| n_r^{-d/2} S_{n_r}(f, A) \right| > \beta \right) \\
&\geq \mu \left( \left\{ \omega \in V_r \mid \left| n_r^{-d/2} S_{n_r}(f, A_r(\omega)) \right| > \beta \right\} \right) \\
&= \mu(V_r) \longrightarrow 1 \text{ quand } r \rightarrow +\infty.
\end{aligned}$$

On a donc montré que pour tout  $\delta > 0$ ,

$$\limsup_{n \rightarrow +\infty} \mu \left( \sup_{d(A,B) < \delta} \left| n^{-d/2} S_n(f, A) - n^{-d/2} S_n(f, B) \right| > \beta \right) = 1.$$

Ce qui achève la démonstration du théorème.

## References

- [1] K. S. Alexander and R. Pyke. A uniform central limit theorem for set-indexed partial-sum processes with finite variance. *Ann. Probab.*, 14:582–597, 1986.
- [2] R. F. Bass. Law of the iterated logarithm for set-indexed partial sum processes with finite variance. *Z. Wahrsch. verw. Gebiete*, 70:591–608, 1985.
- [3] A. K. Basu and C. C. Y. Dorea. On functional central limit theorem for stationary martingale random fields. *Acta. Math. Hung.*, 33:307–316, 1979.
- [4] D. Chen. A uniform central limit theorem for nonuniform  $\phi$ -mixing random fields. *Ann. Probab.*, 19:636–649, 1991.
- [5] J. P. Conze. Entropie d'un groupe abélien de transformations. *Z. Wahrsch. verw. Geb.*, 25:11–30, 1972.
- [6] J. Dedecker. *Principes d'invariances pour les champs aléatoires stationnaires*. PhD thesis, Université Paris XI Orsay, 1998.
- [7] J. Dedecker. Exponential inequalities and functional central limit theorems for random fields. *ESAIM: Probability and Statistics*, 5:77–104, 2001.
- [8] R. L. Dobrushin and B. S. Nahapetian. Strong convexity of pressure for lattice systems of classical statistical physics. *Teoret. Mat. Fiz*, 20:223–234, 1974.
- [9] M. D. Donsker. An invariance principle for certain probability limit theorems. *Mem. Amer. Math. Soc.*, 6:1–12, 1951.
- [10] R. M. Dudley. Sample functions of the Gaussian process. *Ann. Probab.*, 1:66–103, 1973.
- [11] C. M. Goldie and P. E. Greenwood. Variance of set-indexed sums of mixing random variables and weak convergence of set-indexed processes. *Ann. Probab.*, 14:817–839, 1986.
- [12] Y. Katznelson and B. Weiss. Commuting measure-preserving transformations. *Isr. J. Math.*, 12:161–173, 1972.
- [13] J. Kuelbs. The invariance principle for a lattice of random variables. *Ann. Math. Statist.*, 39:382–389, 1968.



- [14] B. Nahapetian and A. N. Petrosian. Martingale-difference Gibbs random fields and central limit theorem. *Ann. Acad. Sci. Fenn., Series A-I Math.*, 17:105–110, 1992.
- [15] D. S. Ornstein and B. Weiss. Entropy and isomorphism theorems for actions of amenable groups. *Journal d'analyse mathématique*, 48:1–141, 1987.
- [16] D. Pollard. *Empirical processes : theory and applications*. NSF-CBMS Regional Conference Series in Probability and Statistics. IMS-ASA, Hayward-Alexandria, 1990.
- [17] R. Pyke. A uniform central limit theorem for partial-sum processes indexed by sets. *London Math. Soc. Lect. Notes Series*, 79:219–240, 1983.
- [18] M. J. Wichura. Inequalities with applications to the weak convergence of random processes with multi-dimensional time parameters. *Ann. Math. Statist.*, 40:681–687, 1969.