

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT

LABORATOIRE ASTROPARTICULES & COSMOLOGIE

DOCTORAL THESIS

---

Corrélations entre lentillage  
gravitationnel du fonds diffus  
cosmologique et traceurs de matière

---

*Author :*

Julien TRÉGUER

*Supervisor :*

Dr. Eric AUBOURG

*A thesis submitted in fulfilment of the requirements  
for the degree of Doctor of Philosophy*

*in the*

Research Group Name

Department or School Name

26 août 2015

# Declaration of Authorship

I, Julien TRÉGUER, declare that this thesis titled, 'Corrélations entre lentillage gravitationnel du fonds diffus cosmologique et traceurs de matière' and the work presented in it are my own. I confirm that :

- This work was done wholly or mainly while in candidature for a research degree at this University.
- Where any part of this thesis has previously been submitted for a degree or any other qualification at this University or any other institution, this has been clearly stated.
- Where I have consulted the published work of others, this is always clearly attributed.
- Where I have quoted from the work of others, the source is always given. With the exception of such quotations, this thesis is entirely my own work.
- I have acknowledged all main sources of help.
- Where the thesis is based on work done by myself jointly with others, I have made clear exactly what was done by others and what I have contributed myself.

Signed :

---

Date :

---

*“Thanks to my solid academic training, today I can write hundreds of words on virtually any topic without possessing a shred of information, which is how I got a good job in journalism.”*

Dave Barry

UNIVERSITY NAME (IN BLOCK CAPITALS)

# *Abstract*

Faculty Name

Department or School Name

Doctor of Philosophy

**Corrélations entre lentillage gravitationnel du fonds diffus cosmologique et  
traceurs de matière**

by Julien TRÉGUER

The Thesis Abstract is written here (and usually kept to just this page). The page is kept centered vertically so can expand into the blank space above the title too...

# *Acknowledgements*

The acknowledgements and the people to thank go here, don't forget to include your project advisor...

# Table des matières

<b>Declaration of Authorship</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>iv</b>
<b>Contents</b>	<b>v</b>
<b>List of Figures</b>	<b>ix</b>
<b>List of Tables</b>	<b>x</b>
<b>Abbreviations</b>	<b>xi</b>
<b>Physical Constants</b>	<b>xii</b>
<b>Symbols</b>	<b>xiii</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Cosmologie moderne</b>	<b>2</b>
1.1 Historique . . . . .	2
1.1.1 Relativité générale . . . . .	2
1.1.2 Principe cosmologique . . . . .	2
1.1.3 Métrique FLRW . . . . .	2
1.1.4 Hubble et la récession des galaxies . . . . .	2
1.1.5 L’abondance des éléments . . . . .	2
1.1.6 Le fond diffus cosmologique . . . . .	2
1.1.7 Matière noire . . . . .	3
1.1.8 Energie noire . . . . .	3
1.2 Théorie du Big Bang et modèle $\Lambda$ -CDM . . . . .	3
1.2.1 Chronologie . . . . .	3
1.2.2 Contenu énergétique de l’univers . . . . .	3
1.2.2.1 Baryons . . . . .	3
1.2.2.2 Photons . . . . .	3

1.2.2.3	Matière noire . . . . .	3
1.2.2.4	Energie noire . . . . .	3
1.2.2.5	Neutrinos . . . . .	3
1.2.3	Limites du modèle $\Lambda$ -CDM . . . . .	3
1.2.3.1	Problème de l'horizon . . . . .	3
1.2.3.2	Problème de la courbure . . . . .	3
1.2.3.3	Problème des monopôles . . . . .	3
1.2.4	Paradigme de l'inflation . . . . .	3
1.2.4.1	Postulats . . . . .	3
1.2.4.2	Apports au modèle $\Lambda$ -CDM . . . . .	3
1.2.4.3	Conséquences observationnelles . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Lentillage gravitationnel du fonds diffus cosmologique</b>	<b>5</b>
2.1	Fond diffus cosmologique . . . . .	5
2.1.1	Spectre de puissance angulaire . . . . .	5
2.2	Lentillage gravitationnel . . . . .	5
2.2.1	Origine physique . . . . .	5
2.2.2	Théorie . . . . .	5
2.2.3	Applications . . . . .	5
2.3	Lentillage du CMB . . . . .	6
2.3.1	Théorie . . . . .	6
2.3.2	Effets observationnels . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Traceurs de matière</b>	<b>7</b>
3.1	Formation des structures . . . . .	7
3.2	Galaxies . . . . .	7
3.3	Quasars . . . . .	7
3.4	Amas de galaxies . . . . .	7
3.5	Nuages d'hydrogène neutre . . . . .	7
3.5.1	Forêt Lyman- $\alpha$ . . . . .	7
3.5.2	Raie à 21 cm . . . . .	7
	Emissions à hautes énergies . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Corrélations en cosmologie</b>	<b>8</b>
4.1	Définition . . . . .	8
4.1.1	Auto-corrélation . . . . .	8
4.1.2	Corrélation croisée . . . . .	8
4.2	Les mesures de corrélations en cosmologie . . . . .	8
4.2.1	Fonction à deux points . . . . .	8
4.2.2	Spectre de puissance . . . . .	8
4.2.3	Fonction de corrélation angulaire . . . . .	8
4.2.4	Spectre de puissance angulaire . . . . .	8
4.3	Calcul théorique . . . . .	8
4.3.1	Approximation de Limber . . . . .	8
4.3.2	Exemples de noyaux . . . . .	8
4.4	Avantages de la corrélation croisée . . . . .	9
4.4.1	Exemple théorique . . . . .	9

4.4.2	Quelques résultats récents en cosmologie . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Collaborations Planck et SDSS-III</b>	<b>10</b>
5.1	Mission Planck . . . . .	10
5.1.1	Technologies et déroulement de la mission . . . . .	10
5.1.2	Objectifs scientifiques . . . . .	10
5.1.3	Principaux résultats . . . . .	10
5.2	Collaboration SDSS-III . . . . .	10
5.2.1	BOSS . . . . .	10
5.2.2	Autres relevés . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Corrélation avec catalogues de galaxies et de quasars</b>	<b>11</b>
6.1	Données utilisées . . . . .	12
6.1.1	Lensing du CMB . . . . .	12
6.1.2	NVSS . . . . .	12
6.1.3	Lowz et CMASS . . . . .	12
6.1.4	Quasars de BOSS . . . . .	12
6.2	Méthodologie . . . . .	12
6.2.1	Stacking . . . . .	12
6.2.2	Spectres angulaires . . . . .	12
6.3	Validation . . . . .	12
6.3.1	Simulation . . . . .	12
6.3.2	Null test . . . . .	12
6.4	Résultats expérimentaux . . . . .	12
6.4.1	Lensing vs NVSS . . . . .	12
6.4.2	Lensing vs Lowz et CMASS . . . . .	12
6.4.3	Lensing vs Quasars de BOSS . . . . .	12
6.5	Estimation de paramètres . . . . .	12
6.5.1	Spectres angulaires théoriques . . . . .	12
6.5.2	Résultats . . . . .	12
<b>7</b>	<b>Corrélation avec les forêts Lyman-alpha</b>	<b>13</b>
7.1	Données utilisées . . . . .	13
7.1.1	Lensing du CMB . . . . .	13
7.1.2	Forêt Lyman-alpha . . . . .	13
7.2	Méthodologies . . . . .	13
7.2.1	Scatterplot . . . . .	13
7.2.2	Rotations de ciel . . . . .	13
7.2.3	Stacking . . . . .	14
7.2.3.1	Description . . . . .	14
7.2.3.2	Validation - Simulations . . . . .	14
7.2.3.3	Validation - Null test . . . . .	14
7.2.4	Spectres angulaires . . . . .	14
7.2.4.1	Description . . . . .	14
7.2.4.2	Validation - Simulations . . . . .	14
7.2.4.3	Validation - Null test . . . . .	14
7.3	Résultats expérimentaux . . . . .	14



7.3.1	Stacking . . . . .	14
7.3.2	Spectres angulaires . . . . .	14
7.4	Estimation de paramètres . . . . .	14
7.4.1	Fonction de corrélation angulaire théorique . . . . .	14
7.4.2	Spectres angulaires théoriques . . . . .	14
7.4.3	Résultats . . . . .	14
<b>8</b>	<b>Corrélations avec sources X (BONUS !)</b>	<b>15</b>
8.1	Données utilisées . . . . .	15
8.1.1	Sources X XMM-Chandra . . . . .	15
8.2	Méthodologies . . . . .	15
8.2.1	Scatterplot . . . . .	15
8.2.2	Rotations de ciel . . . . .	15
8.2.3	Stacking . . . . .	16
8.2.3.1	Description . . . . .	16
8.2.3.2	Validation - Simulations . . . . .	16
8.2.3.3	Validation - Null test . . . . .	16
8.2.4	Spectres angulaires . . . . .	16
8.2.4.1	Description . . . . .	16
8.2.4.2	Validation - Simulations . . . . .	16
8.2.4.3	Validation - Null test . . . . .	16
8.3	Résultats expérimentaux . . . . .	16
8.3.1	Stacking . . . . .	16
8.3.2	Spectres angulaires . . . . .	16
8.4	Estimation de paramètres . . . . .	16
8.4.1	Fonction de corrélation angulaire théorique . . . . .	16
8.4.2	Spectres angulaires théoriques . . . . .	16
8.4.3	Résultats . . . . .	16
<b>9</b>	<b>Conclusions</b>	<b>17</b>
9.1	Récapitulatif . . . . .	17
9.2	Prospective . . . . .	17
9.2.1	LSS . . . . .	17
9.2.2	Euclid . . . . .	17
9.2.3	SKA . . . . .	17
9.2.4	WEAVE . . . . .	17
9.2.5	Statistiques d'ordre supérieur . . . . .	17
<b>A</b>	<b>Appendix Title Here</b>	<b>18</b>

# Table des figures

# Liste des tableaux

# Abbreviations

**LAH** List Abbreviations **H**ere

**GR** General **R**elativity

# Physical Constants

$$\text{Speed of Light } c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ ms}^{-\text{s}} \text{ (exact)}$$

# Symbols

$a$	distance	m
$P$	power	W ( $\text{Js}^{-1}$ )
$\omega$	angular frequency	$\text{rads}^{-1}$

*For/Dedicated to/To my...*

# Introduction

History of religions, myths, works of arts offer countless examples of Humanity interrogations about the origin of the Universe.



# Chapitre 1

## Cosmologie moderne

*"Use the Force, Luke"*

— Master Yoda, *Star Wars*

### 1.1 Historique

#### 1.1.1 Relativité générale

#### 1.1.2 Principe cosmologique

#### 1.1.3 Métrique FLRW

#### 1.1.4 Hubble et la récession des galaxies

#### 1.1.5 L'abondance des éléments

Alpher et Gamow 1948

#### 1.1.6 Le fond diffus cosmologique

Harmoniques sphériques et SdPA

### 1.1.7 Matière noire

### 1.1.8 Energie noire

## 1.2 Théorie du Big Bang et modèle $\Lambda$ -CDM

### 1.2.1 Chronologie

Histoire de l'univers depuis le Big Bang, les différentes phases : Inflation Nucléosynthèse Baryosynthèse Ère de la radiation - $\gamma$  matière Recombinaison Âges sombres Réionisation Expansion

### 1.2.2 Contenu énergétique de l'univers

#### 1.2.2.1 Baryons

#### 1.2.2.2 Photons

#### 1.2.2.3 Matière noire

#### 1.2.2.4 Energie noire

#### 1.2.2.5 Neutrinos

### 1.2.3 Limites du modèle $\Lambda$ -CDM

#### 1.2.3.1 Problème de l'horizon

#### 1.2.3.2 Problème de la courbure

#### 1.2.3.3 Problème des monopôles

### 1.2.4 Paradigme de l'inflation

#### 1.2.4.1 Postulats

#### 1.2.4.2 Apports au modèle $\Lambda$ -CDM

Résolution des problèmes Fluctuations qui deviennent des anisotropies

### **1.2.4.3 Conséquences observationnelles**

## Chapitre 2

# Lentillage gravitationnel du fonds diffus cosmologique

### 2.1 Fond diffus cosmologique

#### 2.1.1 Spectre de puissance angulaire

### 2.2 Lentillage gravitationnel

Définition, observations astrophysiques

#### 2.2.1 Origine physique

#### 2.2.2 Théorie

Cisaillement et magnification

#### 2.2.3 Applications

Eddington et relativité générale Détermination de masses Détection de planètes

## 2.3 Lentillage du CMB

### 2.3.1 Théorie

Champ de déflexion Convergence  $\kappa$

### 2.3.2 Effets observationnels

Effet sur la carte du CMB Effet sur le spectre angulaire de température Effet sur la polarisation du CMB

## Chapitre 3

# Traceurs de matière

### 3.1 Formation des structures

### 3.2 Galaxies

### 3.3 Quasars

### 3.4 Amas de galaxies

### 3.5 Nuages d'hydrogène neutre

#### 3.5.1 Forêt Lyman- $\alpha$

#### 3.5.2 Raie à 21 cm

Emissions à hautes énergies    Gamma, X

## Chapitre 4

# Corrélations en cosmologie

### 4.1 Définition

#### 4.1.1 Auto-corrélation

#### 4.1.2 Corrélation croisée

### 4.2 Les mesures de corrélations en cosmologie

#### 4.2.1 Fonction à deux points

#### 4.2.2 Spectre de puissance

#### 4.2.3 Fonction de corrélation angulaire

#### 4.2.4 Spectre de puissance angulaire

### 4.3 Calcul théorique

#### 4.3.1 Approximation de Limber

#### 4.3.2 Exemples de noyaux

QSO-kappa QSO-Lyman QSO-kappa

## **4.4 Avantages de la corrélation croisée**

Elimination des bruits non corrélés Amplification du signal

### **4.4.1 Exemple théorique**

### **4.4.2 Quelques résultats récents en cosmologie**



## Chapitre 5

# Collaborations Planck et SDSS-III

### 5.1 Mission Planck

#### 5.1.1 Technologies et déroulement de la mission

#### 5.1.2 Objectifs scientifiques

#### 5.1.3 Principaux résultats

### 5.2 Collaboration SDSS-III

#### 5.2.1 BOSS

#### 5.2.2 Autres relevés

## Chapitre 6

# Corrélation avec catalogues de galaxies et de quasars

### 6.1 Données utilisées

Dans cette section, nous précisons les données utilisées pour les analyses et les éventuels pré-traitements appliqués.

#### 6.1.1 Lensing du CMB

Nous avons utilisé la carte du lensing de Planck version 2 (REF). Contrairement à la version 1 qui contenait le potentiel de lensing, la version 2 fournit directement la convergence  $\kappa$  sous forme d'une carte au format HEALPIX à haute résolution ( $n_{\text{side}} = 2056$ ).

La carte de lensing n'est pas une observation directe, elle est produite à partir de la carte de température du CMB de Planck. Il s'agit d'un estimateur du maximum de vraisemblance tenant compte des non-gaussianités induites par le champ de déflexion sur le champ de température.

PRECISER FRACTION DE CIEL, masque utilisé et en 2 mots la méthodologie AJOUTER FIGURE CARTE BRUTE + MASQUE et REFERENCE COMPLETER AVEC LES MODIFICATIONS EVENTUELS

#### 6.1.2 NVSS

Instrument, format, nombre d'échantillons, indicateurs de qualité

### 6.1.3 Lowz et CMASS

### 6.1.4 Quasars de BOSS

## 6.2 Méthodologie

### 6.2.1 Stacking

L

### 6.2.2 Spectres angulaires

## 6.3 Validation

### 6.3.1 Simulation

### 6.3.2 Null test

## 6.4 Résultats expérimentaux

### 6.4.1 Lensing vs NVSS

### 6.4.2 Lensing vs Lowz et CMASS

### 6.4.3 Lensing vs Quasars de BOSS

## 6.5 Estimation de paramètres

### 6.5.1 Spectres angulaires théoriques

### 6.5.2 Résultats

Biais par redshifts

## Chapitre 7

# Corrélation avec les forêts Lyman-alpha

### 7.1 Données utilisées

#### 7.1.1 Lensing du CMB

A GARDER SI PROCESSING DIFFERENT

#### 7.1.2 Forêt Lyman-alpha

### 7.2 Méthodologies

#### 7.2.1 Scatterplot

#### 7.2.2 Rotations de ciel

Fonction à un point

### **7.2.3 Stacking**

#### **7.2.3.1 Description**

#### **7.2.3.2 Validation - Simulations**

#### **7.2.3.3 Validation - Null test**

### **7.2.4 Spectres angulaires**

#### **7.2.4.1 Description**

#### **7.2.4.2 Validation - Simulations**

#### **7.2.4.3 Validation - Null test**

## **7.3 Résultats expérimentaux**

### **7.3.1 Stacking**

### **7.3.2 Spectres angulaires**

## **7.4 Estimation de paramètres**

### **7.4.1 Fonction de corrélation angulaire théorique**

Courbe théorique du stacking

### **7.4.2 Spectres angulaires théoriques**

### **7.4.3 Résultats**

Quels paramètres ? Faire un tableau comparant stacking et méthode harmonique

## Chapitre 8

# Corrélations avec sources X (BONUS !)

### 8.1 Données utilisées

#### 8.1.1 Sources X XMM-Chandra

### 8.2 Méthodologies

#### 8.2.1 Scatterplot

#### 8.2.2 Rotations de ciel

Fonction à un point

### 8.2.3 Stacking

#### 8.2.3.1 Description

#### 8.2.3.2 Validation - Simulations

#### 8.2.3.3 Validation - Null test

### 8.2.4 Spectres angulaires

#### 8.2.4.1 Description

#### 8.2.4.2 Validation - Simulations

#### 8.2.4.3 Validation - Null test

## 8.3 Résultats expérimentaux

### 8.3.1 Stacking

### 8.3.2 Spectres angulaires

## 8.4 Estimation de paramètres

### 8.4.1 Fonction de corrélation angulaire théorique

Courbe théorique du stacking

### 8.4.2 Spectres angulaires théoriques

### 8.4.3 Résultats

Quels paramètres ? Faire un tableau comparant stacking et méthode harmonique

## Chapitre 9

# Conclusions

### 9.1 Récapitulatif

### 9.2 Prospective

#### 9.2.1 LSS

#### 9.2.2 Euclid

#### 9.2.3 SKA

#### 9.2.4 WEAVE

#### 9.2.5 Statistiques d'ordre supérieur



## **Annexe A**

# **Appendix Title Here**

Write your Appendix content here.