

Large Synoptic Survey Telescope : distorsions électrostatiques dans les CCD

Rémy Le Breton

LPNHE

2017/09/25

- ① LSST : un grand plan focal pour la cosmologie d'aujourd'hui
- ② CCD et distorsions électrostatiques
- ③ Le banc optique du LPNHE
- ④ Reconstruction des distorsions statiques
- ⑤ Étude détaillée de l'effet brighter-fatter

- ① LSST : un grand plan focal pour la cosmologie d'aujourd'hui
 - Le Large Synoptic Survey Telescope
 - La cosmologie avec LSST
- ② CCD et distorsions électrostatiques
- ③ Le banc optique du LPNHE
- ④ Reconstruction des distorsions statiques
- ⑤ Étude détaillée de l'effet brighter-fatter

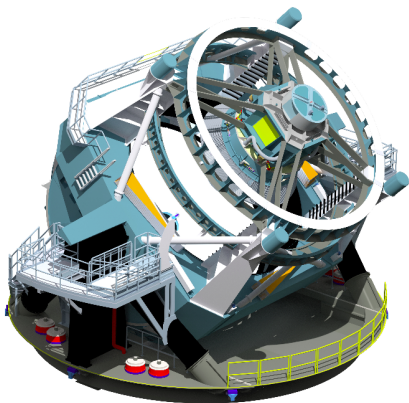
Le Large Synoptic Survey Telescope

Télescope :

- Première lumière en 2019.
- Miroir primaire de 6.4 m de diamètre effectif.
- Étendue $319 \text{ m}^2 \text{ deg}^2$.

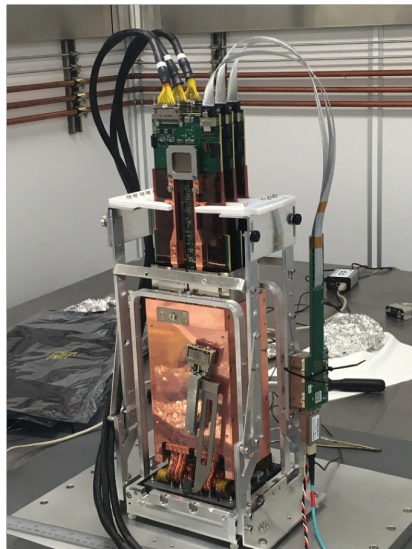
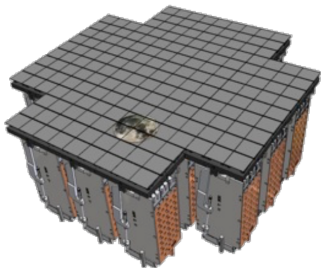
Programme :

- Programme d'observation sur 10 ans.
- Base de données de $5.5 \cdot 10^6$ images.
- Observation de tout le ciel en 4 jours.



Le plan focal de LSST

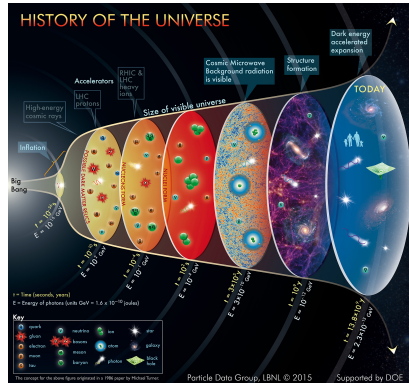
- Plan focal de 3.2 Gpix.
- Champ de vue de 9.6 deg^2 .
- 189 CCD haute résistivité.
- Raft : 3x3 CCD, 16 canaux par CCD, 144 canaux vidéos.
- Lecture : ASPIC.
- Senseurs : E2V et ITL.



Λ CDM : le modèle standard de la cosmologie

Une description remarquable de l'Univers

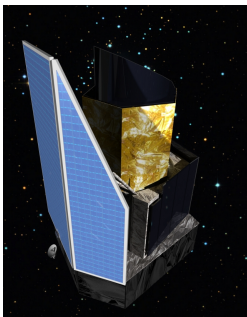
- Univers plat en expansion depuis le Big-Bang.
- Densité d'énergie totale : *matière noire* et *énergie noire* ?
- Énergie noire :
 - Nouveau "fluide", caractérisé par son équation d'état ?
 - Déviations à la Relativité Générale ?



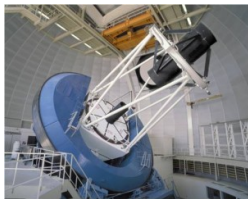
Âge d'or de la cosmologie avec LSST

L'âge d'or de la cosmologie :

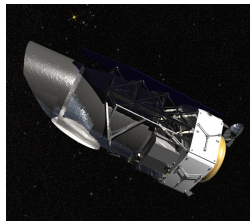
- Quatre expériences majeures lancées dans la prochaine décennie :
 - Sur Terre : LSST et DESI.
 - Satellites : Euclid et WFIRST.
- Expériences complémentaires.



Euclid



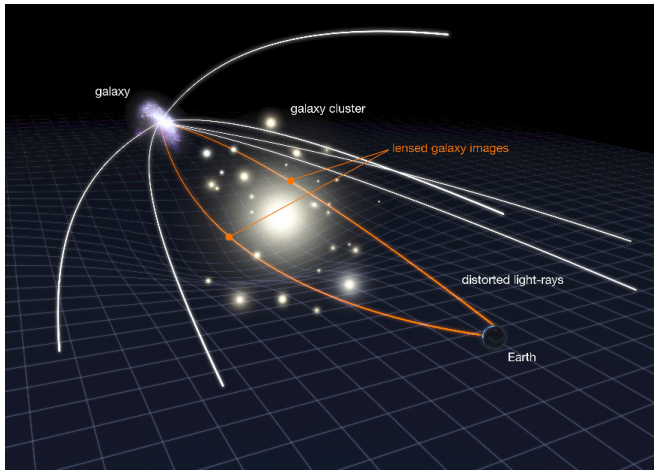
DESI



WFIRST

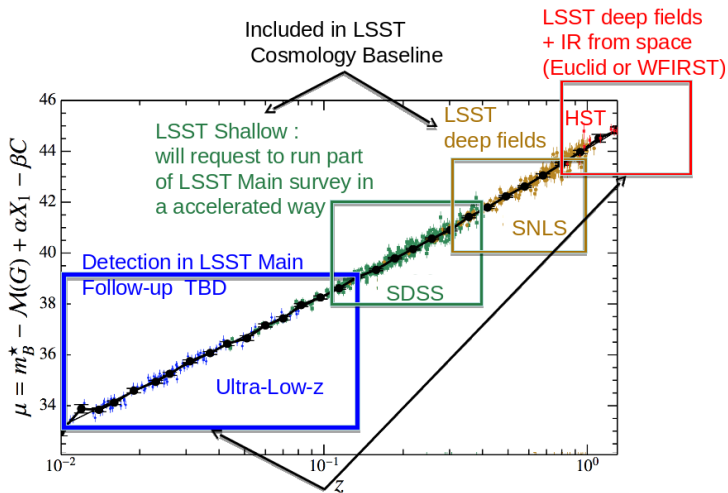
Le lentillage gravitationnel faible

- Histoire de l'expansion de l'univers.
- Difficile à mesurer en régime faible.
- Tomographie de l'Univers.
- Histoire de la formation des structures.



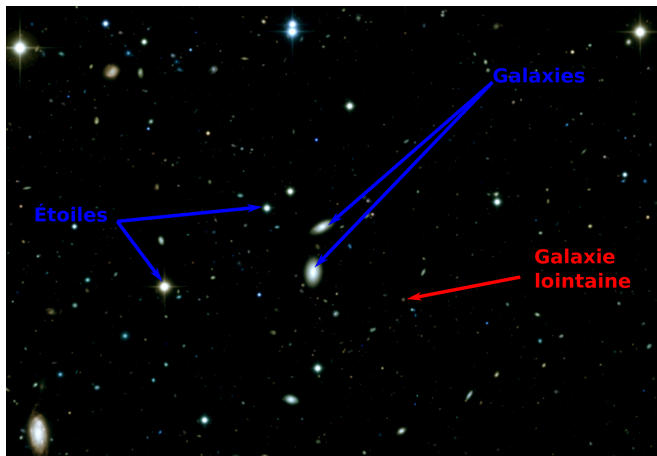
Les Supernovae de Type Ia (SNIa)

- Mesure de distance.
- Diagramme de Hubble.
- Identification spectrale.
- Histoire de l'expansion.



Deux sondes cosmologiques exigeantes

- Mesure de flux (SNIa) et de formes (lentillage gravitationnel faible) :
 - ⇒ Calibration par la Point Spread Function (PSF).
- Problème : PSF calibrée sur des objets lumineux.
 - ⇒ Sondes : en pratique, objets beaucoup moins lumineux.



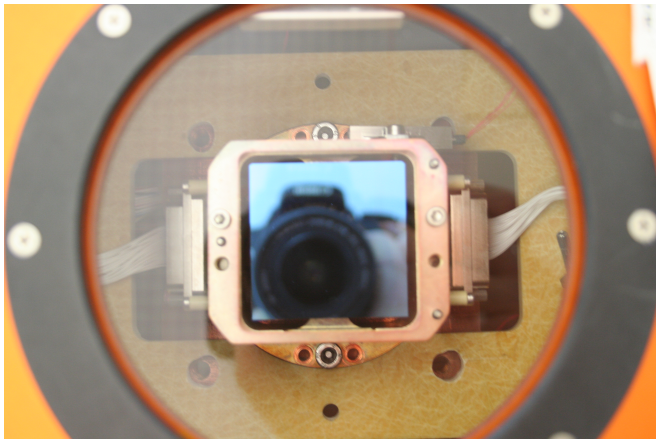
- Distorsions électrostatiques dans les CCD qui déforment la PSF en fonction du flux.
- Lentillage gravitationnel faible :
 - ⇒ Même ordre de grandeur (%) que certaines distorsions électrostatiques.
- SNIa :
 - ⇒ Erreur de \sim % sur PSF \rightarrow erreur de \sim % sur mesure de flux.

La correction des images de science est critique.

- ① LSST : un grand plan focal pour la cosmologie d'aujourd'hui
- ② CCD et distorsions électrostatiques
 - Fonctions de base
 - Distorsions électrostatiques
- ③ Le banc optique du LPNHE
- ④ Reconstruction des distorsions statiques
- ⑤ Étude détaillée de l'effet brighter-fatter

CCD : Charge Coupled Device

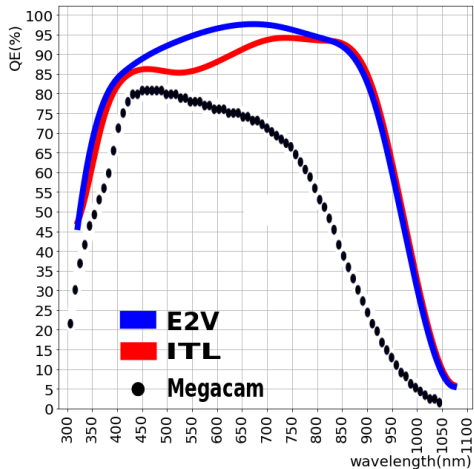
- Étude de précision des CCD candidats de LSST.
- CCD : mon principal outil de travail.
- CCD **épais** à haute résistivité : nouveaux enjeux.



LSST : CCD E2V

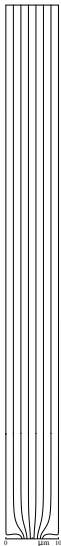
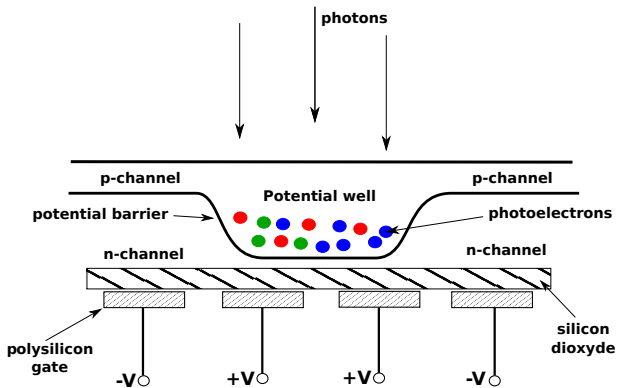
La génération de charge : l'efficacité quantique

- Effet photoélectrique : énergie minimale du *band-gap*.
- Entre 300nm et 1070nm.



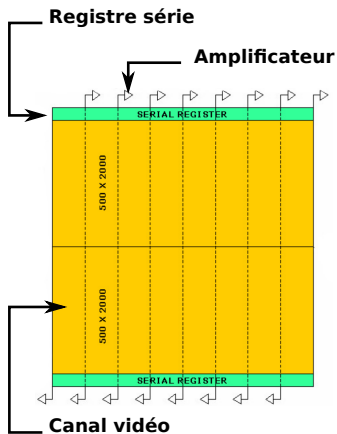
La collecte de charge

- Polarisation du détecteur : lignes de champ.
- Pixels \simeq puits de potentiels.
- Effets de diffusion possibles.
- Capacité maximale de stockage.



Les CCD à plusieurs canaux

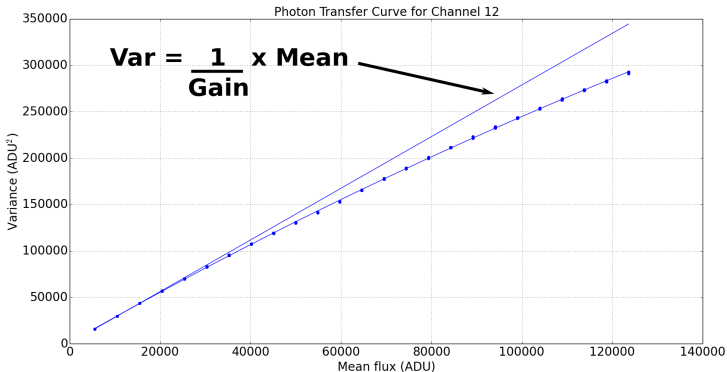
- Grande segmentation.
- 16 canaux vidéos.
- Lecture parallèle à 550 kHz.
- Temps de lecture réduit à **2s**.
- Fabrication difficile.



CCD de LSST

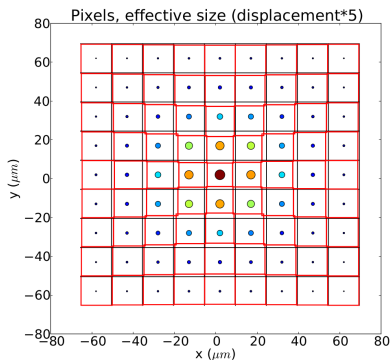
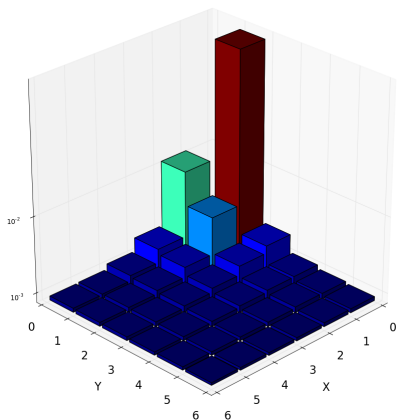
Mesure du gain : Photon Transfer Curve

- Variance en fonction du flux sur des illuminations uniformes.
- Loi de Poisson : $V \propto F(e^-)$
- Ce n'est pas ce qui est mesuré.
- Gain en $e^- \cdot ADU^{-1} \rightarrow$ charges converties par un ADC.



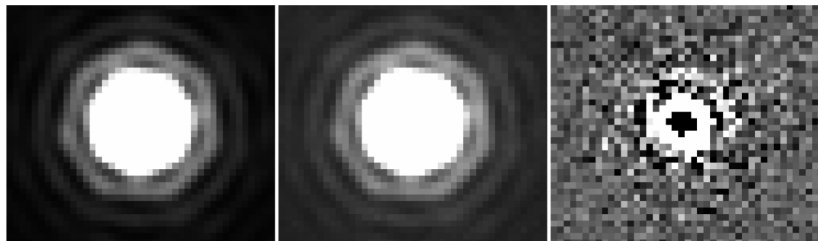
Corrélations dans les illuminations uniformes

- La mesure des corrélations est difficile : banc optique stable.
- La réponse d'un pixel dépend du contenu de ses voisins.
- Variation de la taille des pixels en fonction du contenu flux.



Déformation des pixels.

Étalement de spots lumineux en fonction du flux



(a) 200-s exposures (b) 20-s exposures (c) subtraction (a)-(b)

- Corrélations et étalement des spots :
 - ⇒ Deux manifestations d'un même effet.
 - ⇒ Distorsions de la forme des pixels.
 - ⇒ **L'effet brighter-fatter**
 - ⇒ Modèle développé au LPNHE : *Guyonnet et al.*, [1501.01577](#)

Nouveau champ d'étude des CCD : les distorsions électrostatiques

Impacts :

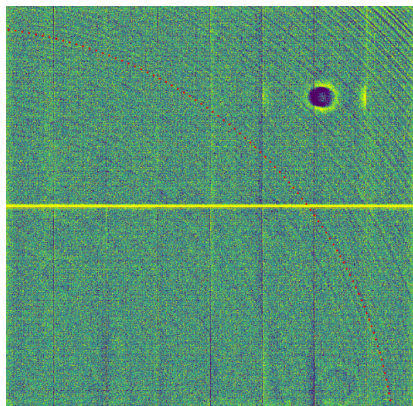
- Astrométrie.
- Photométrie.

Distorsions dynamiques :

- Dépendantes du flux.
- L'effet brighter-fatter.

Distorsions statiques :

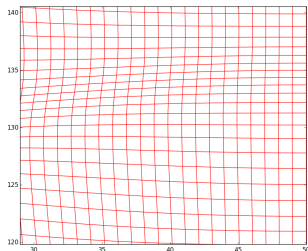
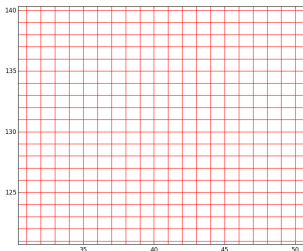
- Indépendantes du flux.
- Tree-rings :
 - $\pm 1\%$ sur des illuminations uniformes normalisées.
 - Variation de concentration de dopant dans le substrat du CCD.



Tree-rings dans un CCD E2V.

Objectif : correction des distorsions.

- Rétrospectivement : effets observés sur des CCD *fins*.
- Distorsions amplifiées par l'épaisseur du détecteur.
- La grille de pixel n'est plus parfaite.
⇒ Développement de méthodes de correction.



- Correction → mesure et caractérisation des effets.
⇒ Nécessité d'un banc optique stable.

- ① LSST : un grand plan focal pour la cosmologie d'aujourd'hui
- ② CCD et distorsions électrostatiques
- ③ Le banc optique du LPNHE
 - Le banc optique
 - Le projecteur de franges
- ④ Reconstruction des distorsions statiques
- ⑤ Étude détaillée de l'effet brighter-fatter

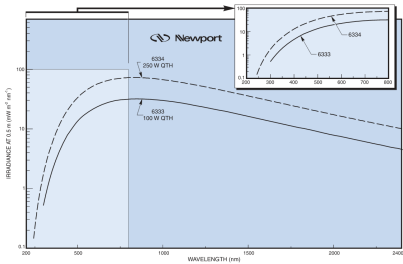
Banc optique et salle blanche

- Élaboration d'un banc pour l'étude fine des distorsions électrostatiques.
- Salle blanche ISO7, ISO6 et hotte aspirante à flux laminaire ISO5.

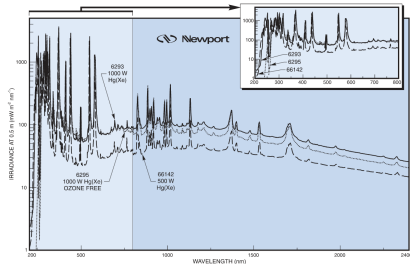


Les sources de lumière

- Lampe Xenon Mercure de 500 Watts, spectre à raies.
- Lampe Quartz Tungsten Halogen de 250 Watts, spectre continu.



300nm 1070nm

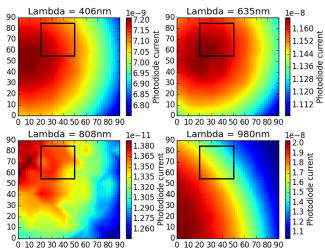
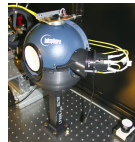


300nm 1070nm

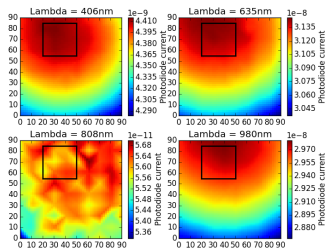
Étude du système d'illumination

La sphère intégrante :

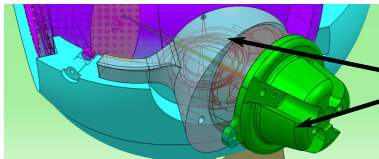
- Illumination quasi-uniforme sur une grande surface.
- Résolution d'un problème de centrage (pour les lasers).
- Optimisation de l'uniformité.



Avant



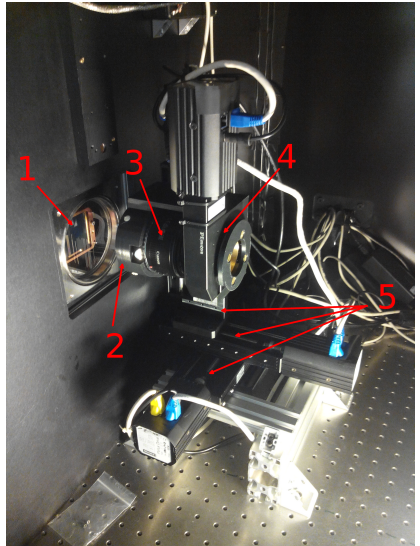
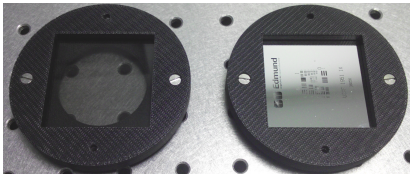
Après



**Pièces imprimées
en 3D**

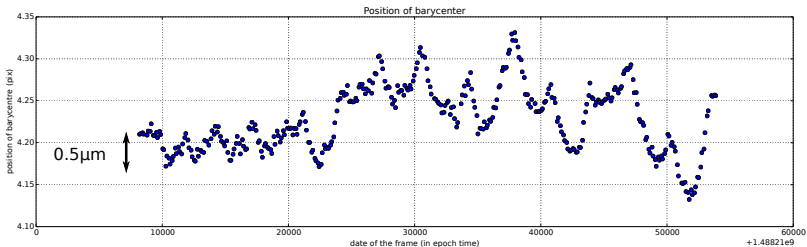
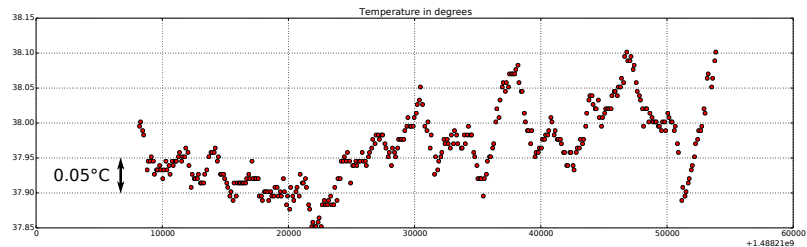
Projecteur de franges

- Dans la boîte noire.
- Potence 3D.
- Moteur rotatif.
- Mires (plaques de verre).
- Objectif photographique.
- Pièces imprimées en 3D.



Stabilité du banc

- Stabilité du banc importante pour études de précision.
- Salle blanche climatisée, température régulée.
- Variation de 0.02°C → mouvement de $0.2\mu\text{m}$ du CCD.



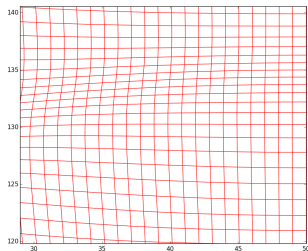
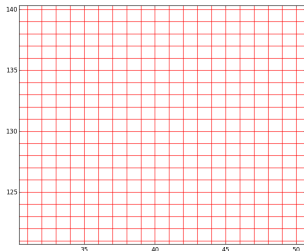
- ① LSST : un grand plan focal pour la cosmologie d'aujourd'hui
- ② CCD et distorsions électrostatiques
- ③ Le banc optique du LPNHE
- ④ Reconstruction des distorsions statiques
 - Méthode de reconstruction
 - Validation de la méthode sur des simulations
 - Modélisation de l'illumination
- ⑤ Étude détaillée de l'effet brighter-fatter

Reconstruction des tree-rings

- Premier travail d'analyse, en parallèle du développement du banc.

Systemes de coordonnées et champ de déplacement

$$\vec{X}' = \vec{X} + \vec{\delta} \quad (1)$$



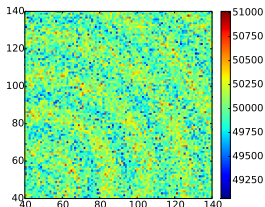
Modèle : conservation de la charge \rightarrow développement de Taylor

$$I'(\vec{X}) = I(\vec{X})(1 - \text{div } \vec{\delta}) - \vec{\nabla} I \cdot \vec{\delta} \quad (2)$$

Test de la méthode sur des simulations

Les données :

- Illuminations uniformes.
- Illumination fortement modulées.
- Déformées par un champ associé au tree-rings.



Illumination supposée connue

$$I = A \cdot \sin(\vec{K} \cdot \vec{X} + \varphi) + B \quad (3)$$

$$\vec{\delta} = \begin{pmatrix} \sum_p \theta_p^X B_p(\vec{X}) \\ \sum_q \theta_q^Y B_q(\vec{X}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

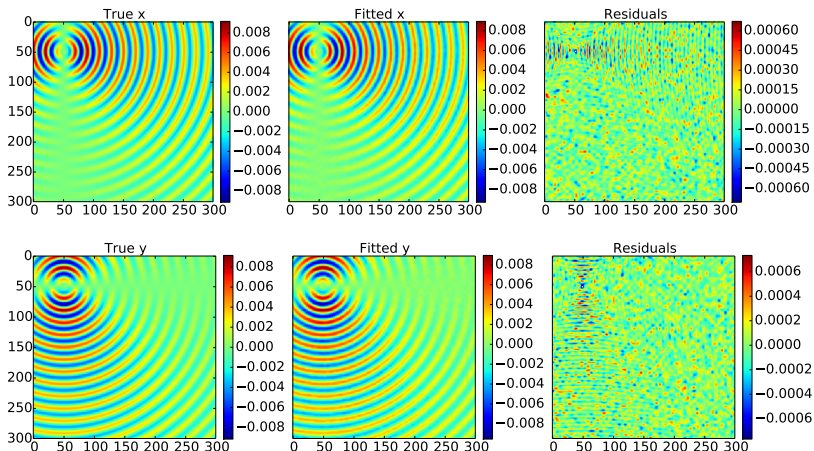
$$\vec{\delta} = \vec{\nabla} \sum_p \theta_p B_p(\vec{X}) \quad (5)$$

Deux modèles :

- Équation (4) : modèle général.
- Équation (5) : modèle où le champ dérive d'un potentiel.

Résultats

- 170 images : 75 sinus à deux phases, 20 illuminations uniformes.
- Nœuds de spline tout les 5 pixels : 3600 paramètres (300×300 pixels).



Perspectives :

- Implémentation de la méthode sur des vraies données.
- Impact de la qualité de la reconstruction sur la science.

Cependant :

- Amplitude des tree-rings faible sur les CCD E2V ($\sim 0.01\%$).
- Beaucoup de distorsions optiques (difficile à modéliser).
- Étude estimée plus importante : l'effet brighter-fatter.

- 1 LSST : un grand plan focal pour la cosmologie d'aujourd'hui
- 2 CCD et distorsions électrostatiques
- 3 Le banc optique du LPNHE
- 4 Reconstruction des distorsions statiques
- 5 Étude détaillée de l'effet brighter-fatter
 - Mesure des corrélations
 - Méthode de correction : le descrambling
 - Méthode d'analyse des profils de Ronchi
 - Propriétés de l'effet brighter-fatter

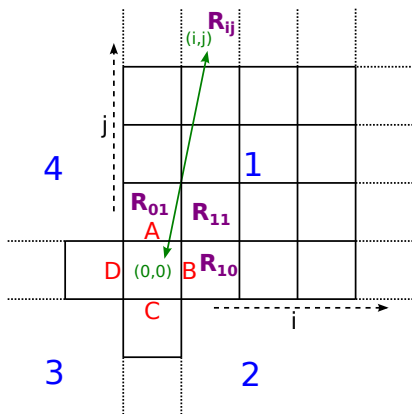
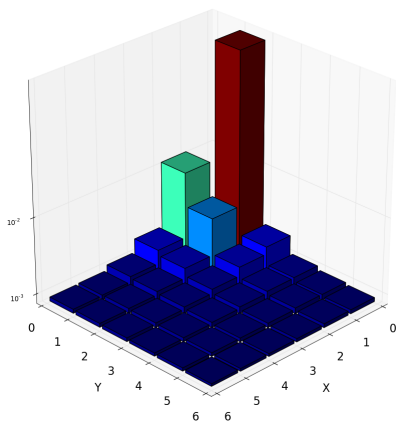
Correction → modélisation des déplacements de frontières.

Plusieurs approches dans la collaboration LSST-DESC :

- Simulations électrostatiques :
 - [Lage et al. 2017](#)
 - [Rasmussen et al. 2016](#)
- Modèle expérimental :
 - Modèle développé au LPNHE : [Guyonnet et al. 2015](#)
 - Mesure de coefficients de corrélations.
 - Paires d'illuminations uniformes.
 - Sur un grand nombre d'images.
 - Adoptée par DES et HSC.
 - ⇒ **Contexte de ce travail de thèse.**

Mesure des corrélations

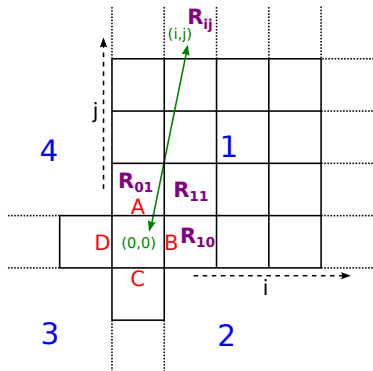
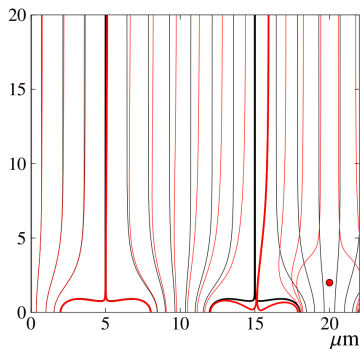
- Sur un grand nombre de paires d'illuminations uniformes.
⇒ Au même flux élevé (effet brighter-fatter plus intense).
- Corrélations : $R_{ij} = C_{ij}/Var$



Déplacement de frontières : paramètres du modèle

- Coefficients du modèle → déplacement des frontières :

$$a_{i,j}^X \quad (6)$$



$$C_{ij} = V\mu \sum_X a_{i,j}^X \quad (7)$$

- L'effet brighter-fatter augmente au cours de l'intégration des images. (Astier *et al.*, *In Prep.*)

$$k = \sum_{ij \neq 00} \sum_X a_{i,j}^X \quad (8)$$

$$C_{00} = \frac{V}{2\mu k} [1 - e^{-2k\mu}] \quad (9)$$

$$C_{ij} = V\mu \sum_X a_{i,j}^X [1 - \frac{2}{3}k\mu + O[(k\mu)^2]] \quad (10)$$

Covariances en fonction du flux

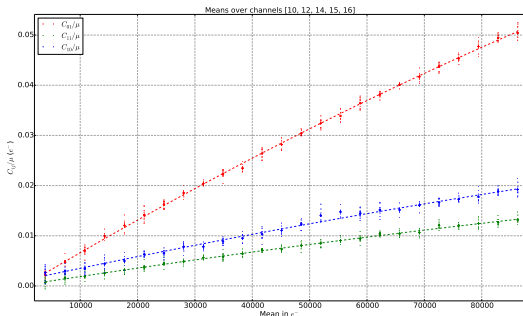
- Deux modèles : même nombre de paramètres.
- Modèle complet : meilleure description des covariances.

Modèle linéaire

	C_{01}/μ	C_{11}/μ	C_{10}/μ
Origine	$7.9 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$8.6 \cdot 10^{-4}$
σ_O	$0.7 \cdot 10^{-4}$	$0.4 \cdot 10^{-4}$	$0.7 \cdot 10^{-4}$
Pente	$2.91 \cdot 10^{-7}$	$7.53 \cdot 10^{-8}$	$1.05 \cdot 10^{-7}$
σ_P	$0.01 \cdot 10^{-7}$	$0.08 \cdot 10^{-8}$	$0.01 \cdot 10^{-7}$
χ^2/dof	1.523	1.247	1.451

Modèle complet

	C_{01}/μ	C_{11}/μ	C_{10}/μ
Origine	$-2.6 \cdot 10^{-5}$	$7.4 \cdot 10^{-5}$	$5.6 \cdot 10^{-4}$
σ_O	$6.3 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$0.7 \cdot 10^{-4}$
k_{ij}	$3.40 \cdot 10^{-7}$	$8.80 \cdot 10^{-8}$	$1.22 \cdot 10^{-7}$
$\sigma_{k_{ij}}$	$0.01 \cdot 10^{-7}$	$0.09 \cdot 10^{-8}$	$0.01 \cdot 10^{-7}$
χ^2/dof	1.150	1.172	1.350



Méthode de correction : le descrambling

- Charge perturbée par l'effet brighter-fatter :

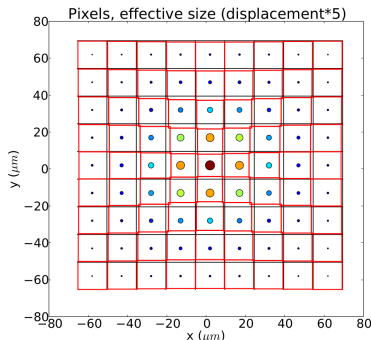
$$Q'_{00} = Q_{00} + \delta Q_{00} \quad (11)$$

- Charge à réaffecter, proportionnelle changement de surface du pixel :

$$\delta Q_{00} = \sum_X \rho_{00}^X \sum_{i,j} a_{ij}^X Q_{ij} \quad (12)$$

- Densité de charge à la frontière entre deux pixels :

$$\rho_{00}^X$$



Mesure fine des covariances

Mesure des covariances :

- Espace direct ou de Fourier.
- Espace direct plus rapide à courte distance. (méthode actuelle)
- Espace de Fourier : beaucoup plus rapide à grande distance.

Travail sur les artefacts :

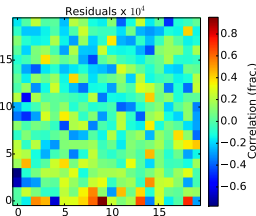
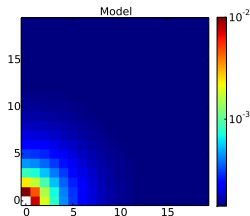
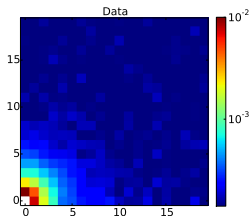
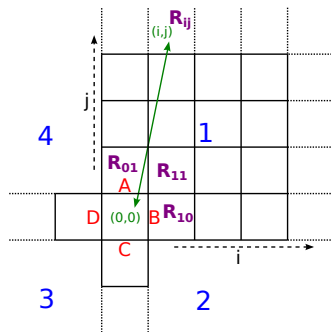
- Beaucoup d'études fines.
- Réduction de CTI ($< 5 \times 10^{-6}$).
- Effets de mémoires ($\sim 10^{-4}$).
- Non linéarité de l'acquisition (quelques ‰).

Élaboration des masques :

- Certains effets électroniques, rayons cosmiques : fausses corrélations.
- Il faut un masque suffisamment robuste mais qui affecte peu les variances.
- Rejet des points à 4σ de la moyenne.

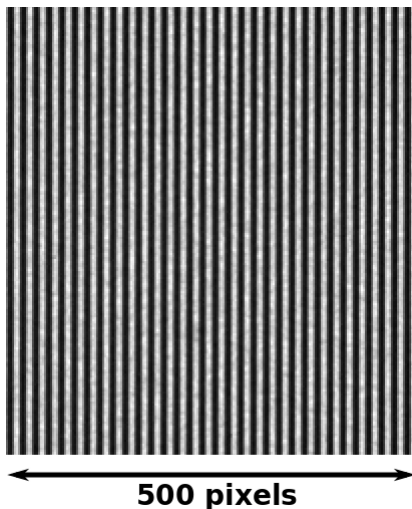
Modélisation des coefficients

- Pour corriger, il faut modéliser.
- $N^2 - 1$ Covariances mesurées.
- $2N^2$ coefficients (symétries)
- Fonction de lissage :
 - Ne convient pas pour les premières covariances.
- Nouveau modèle électrostatique.



Mesure des profils de Ronchi

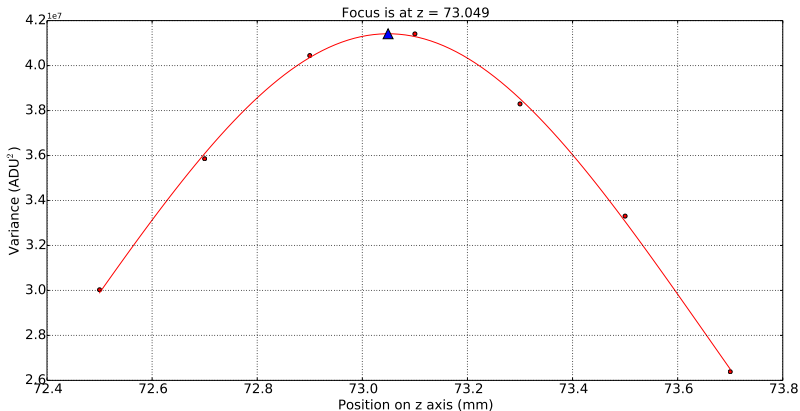
- Franges rectangulaires.
- Parallèles aux lignes ou colonnes.
- Contraintes différentes des spots.
- Profil très fortement modulé.
- Photo-statistique importante.
- Projecteur de frange.
- Mesure de la perte de contraste.
- Mesure de chromaticité difficile.



Tester les limites du descrambling

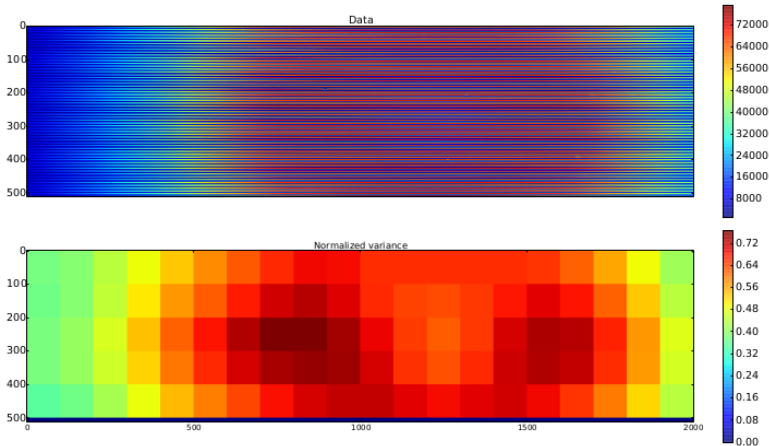
Mise au point

- Centrage du profil sur la zone d'analyse.
- Mouvement le long de l'axe optique.
- Maximisation de la variance.



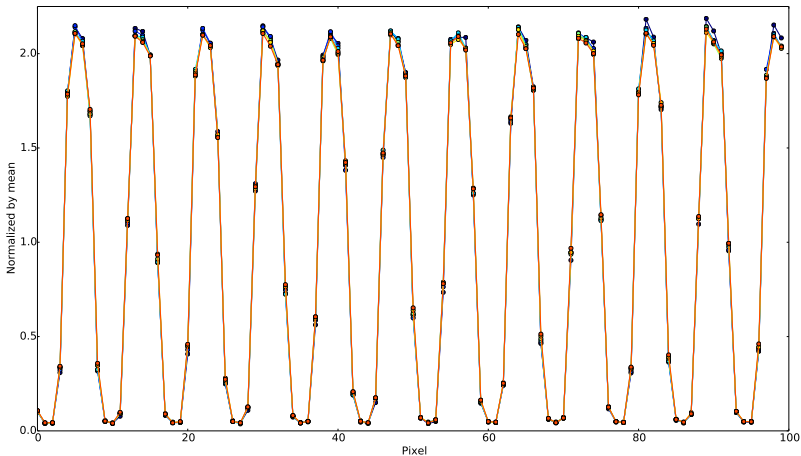
Zone d'analyse

- Période réduite du Ronchi + effet faible à mesurer :
⇒ Qualité optique importante.
- Zone optimale : meilleure variance locale (50x100 pixels).



Normalisation

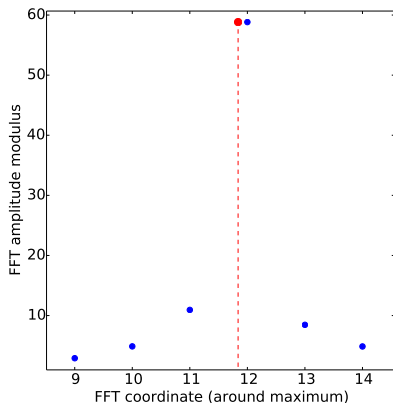
- Normalisation par la moyenne (non affectée par l'effet brighter-fatter).
- Du **bleu** vers le **rouge** : intensité moyenne de $7600 e^-$ à $34000 e^-$.



Mesure de la période moyenne

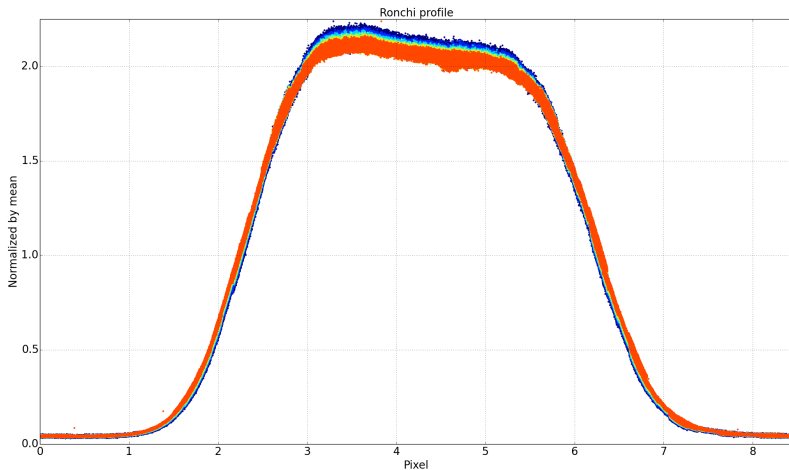
- Pour toutes les lignes sélectionnées de toutes les images.
- Mesure de la période par FFT.
- Précision du repliement critique : terme correctif sur le nombre d'onde.

$$\delta = -\text{Re} \left[\frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{2X_k - X_{k-1} - X_{k+1}} \right]$$



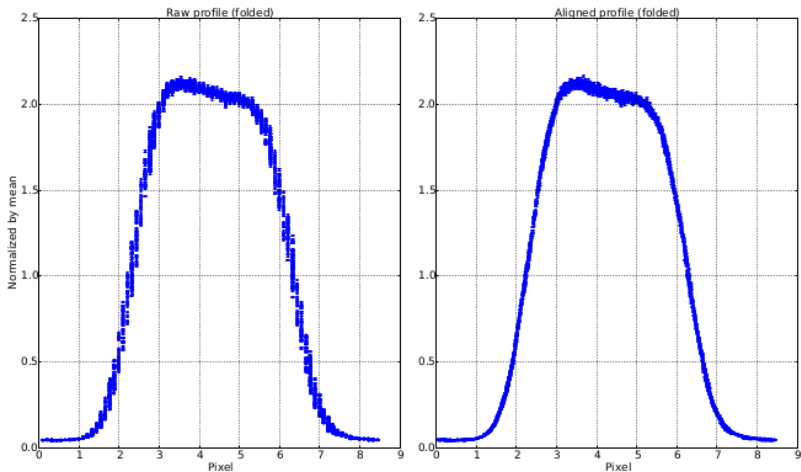
Repliement

- Du **bleu** vers le **rouge** : intensité moyenne de $7600e^-$ à $34000e^-$.

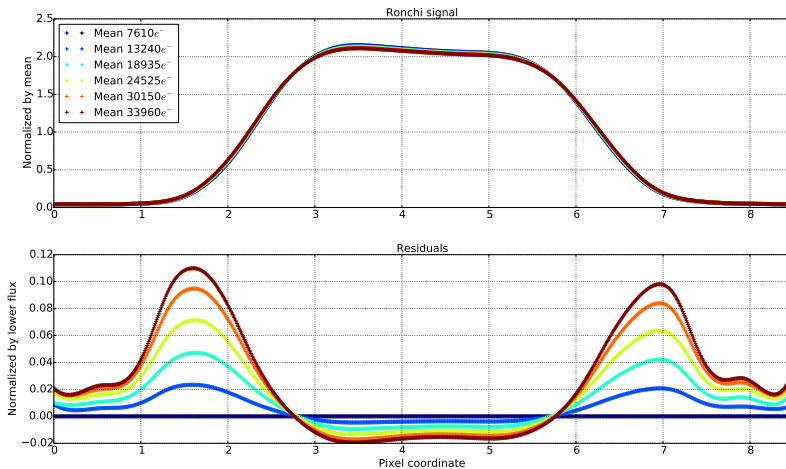


Correction des mouvements du banc

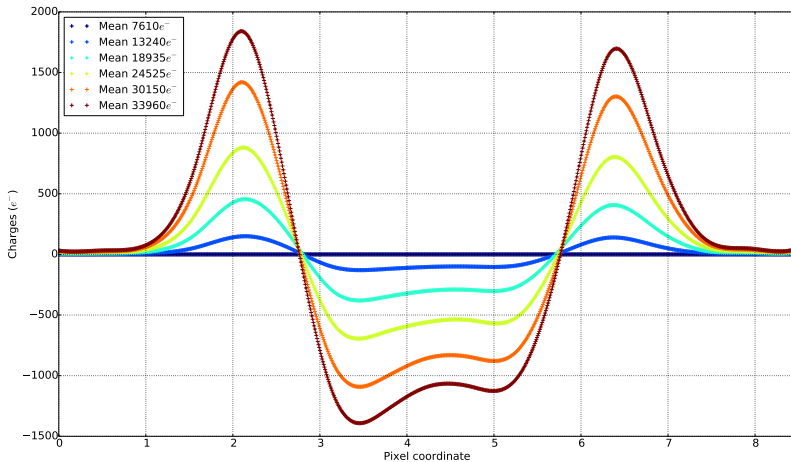
- Alignement du barycentre de tous les profils repliés.
- Pixel : $10\mu m$ de côté \rightarrow corrections $< 1\mu m$



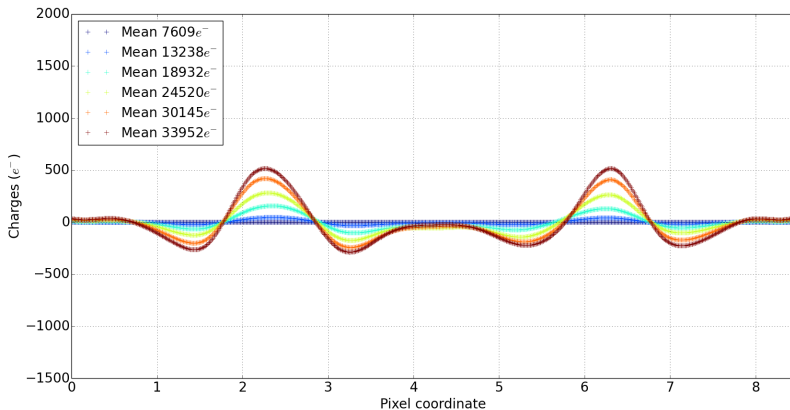
Visualisation directe de l'effet brighter-fatter



Charges déplacées par l'effet brighter-fatter



Descrambling sur des profils de Ronchi : après



ΔC_i	$7609e^-$	$13238e^-$	$18932e^-$	$24520e^-$	$30145e^-$	$33952e^-$
Non corrigé	0	553	1626	3093	4896	6315
Estimateur moyenne	0	168	530	963	1421	1760
Estimateur polynomial	0	134	431	775	1117	1360

$$\delta Q_{00} = \sum_X \rho_{00}^X \sum_{i,j} a_{ij}^X Q_{ij}$$

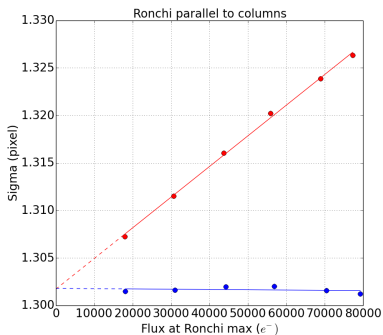
Influence de l'estimateur de charge

$$\delta Q_{00} = \sum_X \rho_{00}^X \sum_{i,j} a_{ij}^X Q_{ij}$$

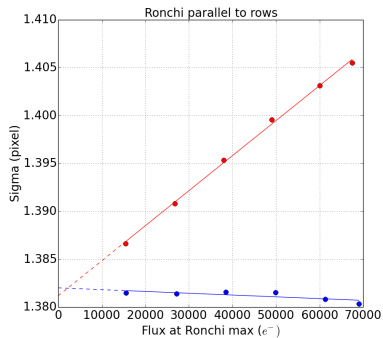
- Erreur de l'estimateur de charge sur profil de Ronchi : $\pm 15 \%$
- Explique plus de 75 % de l'erreur de correction (en charge).
- Les profils de Ronchi ne sont pas représentatifs de la future qualité d'image de LSST.
- Résolution pixels LSST : 0.2 arcsecondes.
- Meilleures conditions d'observation : 0.4 arcsecondes.
- Erreur estimée : $\pm 0.4 \%$
- Le *descrambling* n'est plus limité par l'estimateur de charge.
- Nous sommes maintenant sensible à la précision du modèle.

Efficacité de la correction : correction sur la dispersion

- [Guyonnet et al. 2015](#) : correction supérieure à 95 %.



Correction de $\sim 100.1\%$



Correction de $\sim 105\%$

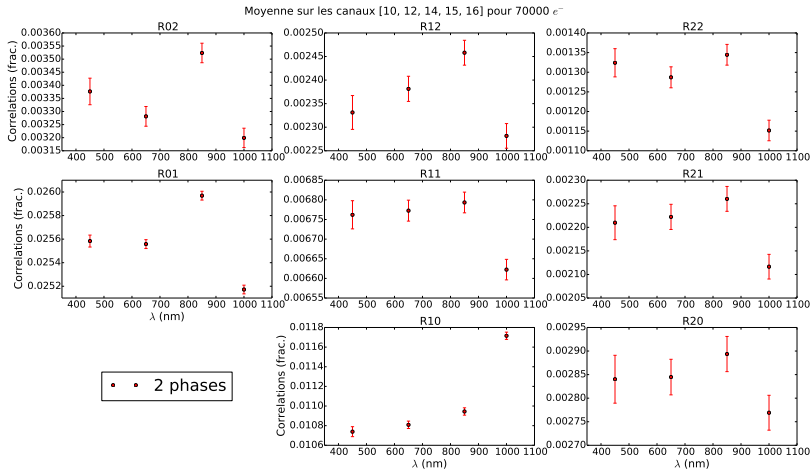
Mesure de différentes propriétés de l'effet brighter-fatter

Correction dépendante des conditions d'observation ?

- De la position sur le CCD ?
- De l'objet observé ? Couleur des SNIa ?

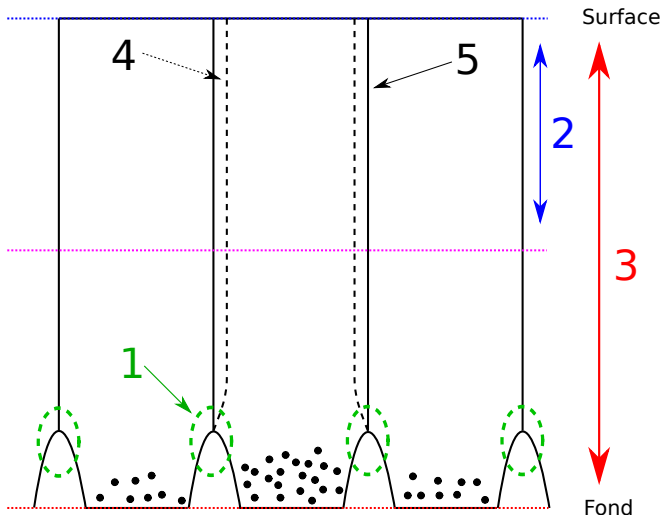
Jusqu'à quelle distance prendre en compte l'influence des pixels voisins ?

Chromaticité

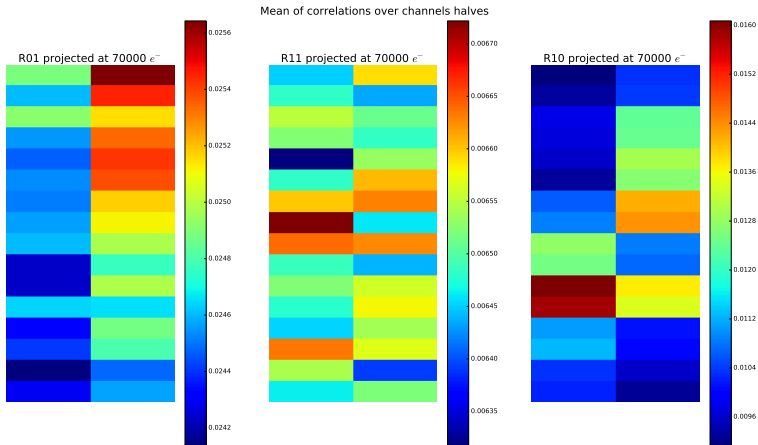


Interprétation de la chromatécité

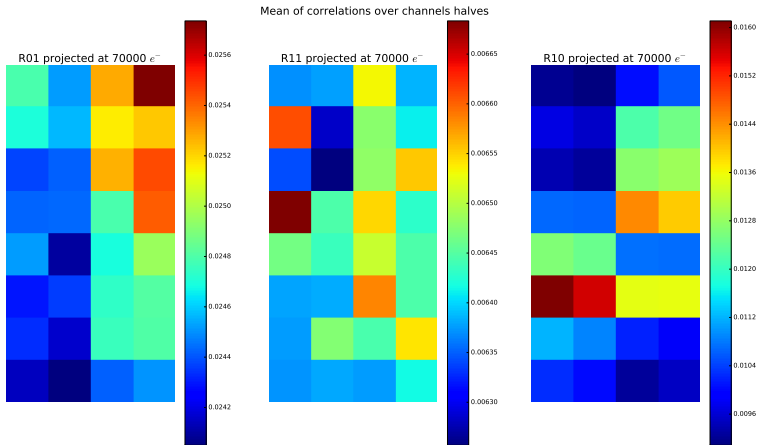
- Le schéma n'est pas à l'échelle.



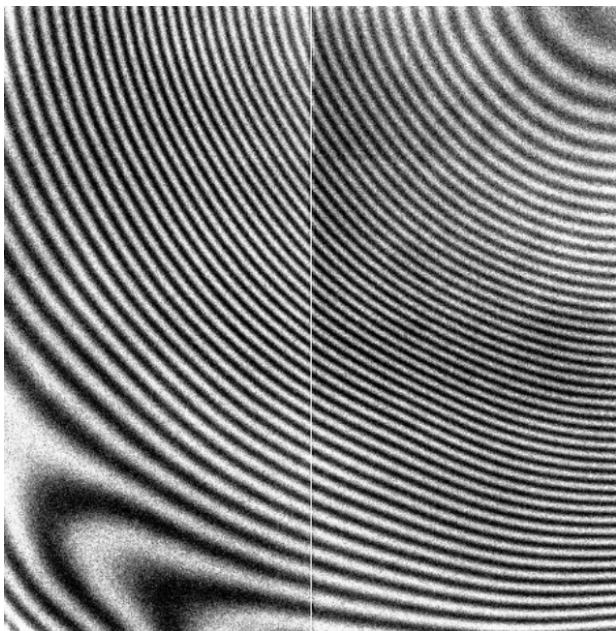
Uniformité spatiale



Uniformité spatiale

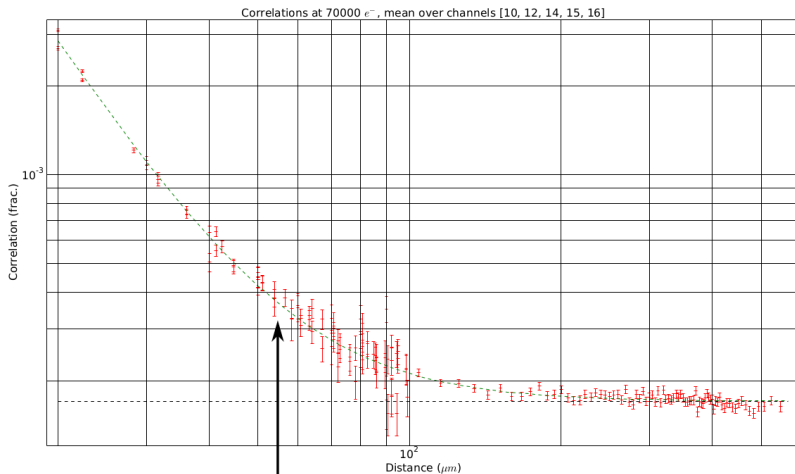


Uniformité spatiale



Distances

- Première mesure de l'offset à grande distance.
- Asymptote (peut changer sur le même capteur) : bruits électroniques.
- Jusqu'où aller pour la correction ? 10 pixels ? 15 pixels ?



Guyonnet et al. 2015

Instrumentation :

- Banc de caractérisation **stable** et **complet**.
 - ⇒ Amélioration de l'uniformité de la source.
 - ⇒ Illumination nette sur plus grande surface de détecteur.
- Développement d'un projecteur de franges **polyvalent**.

Méthode :

- Méthode de caractérisation des distorsions statiques, testée **avec succès** sur des simulations.
 - ⇒ Réduction des distorsions optiques sur le banc.
 - ⇒ Modélisation des distorsions optiques.
- Développement d'une nouvelle méthode de mesure et de caractérisation de l'effet brighter-fatter basée sur des profils (Ronchi, Sinus).

Effet brighter-fatter :

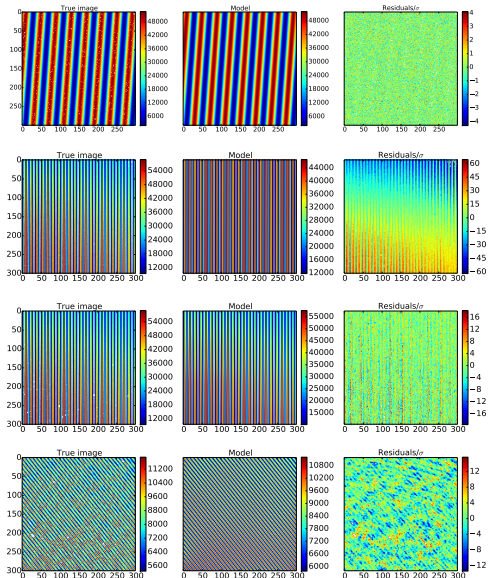
- Meilleure description de l'évolution de la variance et des covariances en fonction du flux.
 - ⇒ Description des covariances au première ordre : écart $> 10\%$ avec le modèle linéaire.
- Mesure de nombreuses propriétés de l'effet brighter-fatter, dont **première mesure de chromaticité**.
- Modèle électrostatique pour **modéliser et corriger l'effet brighter-fatter**.
- Meilleur estimateur de charge pour l'évaluation de la densité de charge à la frontière entre deux pixels : **gain de précision de 4 %**.
 - ⇒ Étude approfondie du modèle.

Backup slides

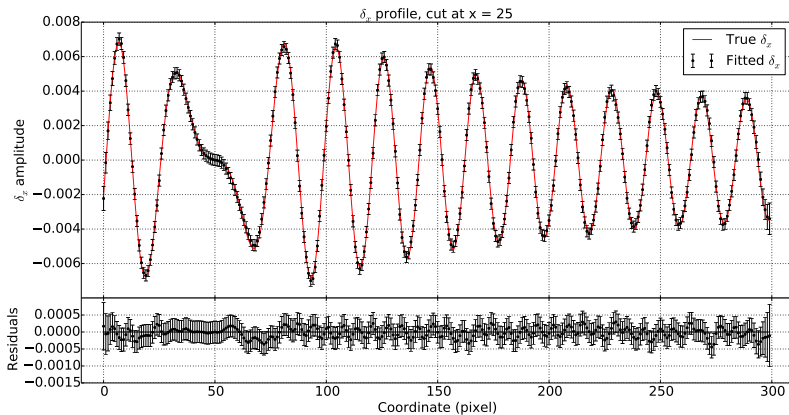
Overshoot

Limitation et ouverture

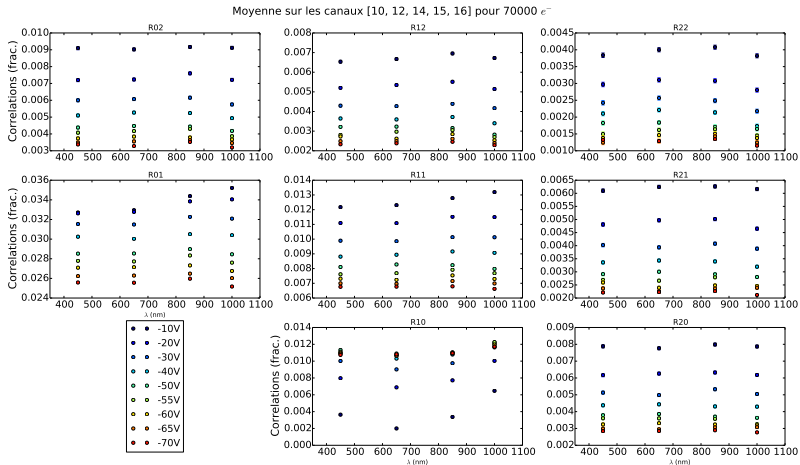
- Variations d'efficacité quantique.
- Distorsions optique.
- Modèle simple pas suffisant.
- Modèle splines.



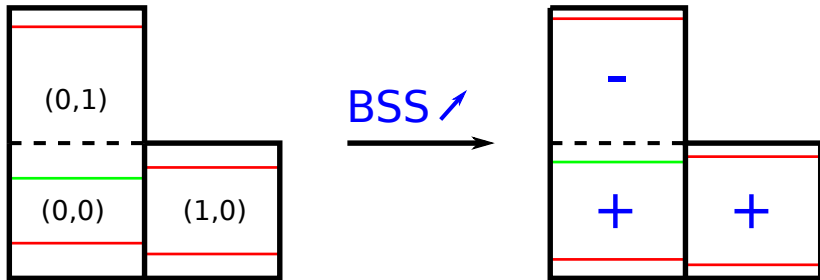
Champ de déplacement, δ_x coupe en x



Tension de polarisation

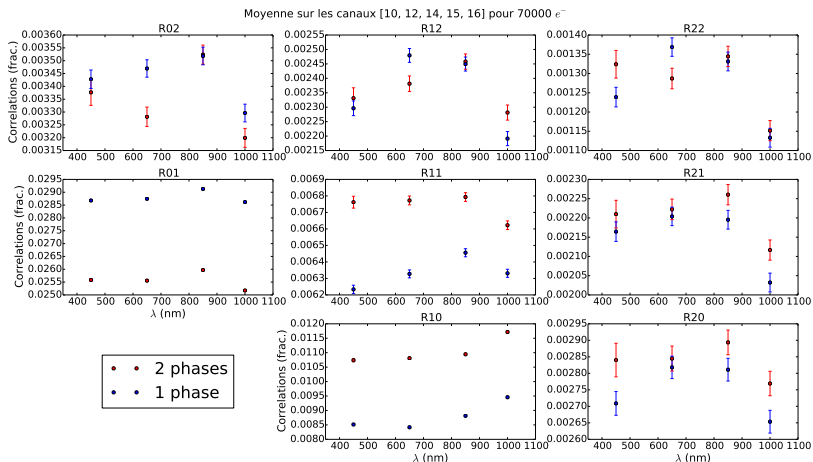


- Mouvement différentiel de frontières.

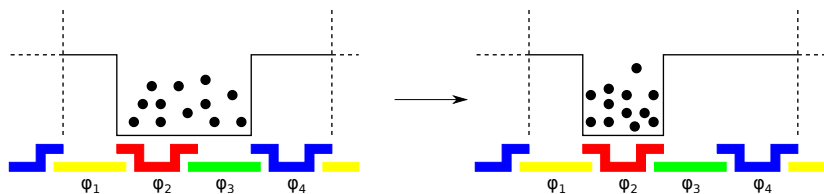
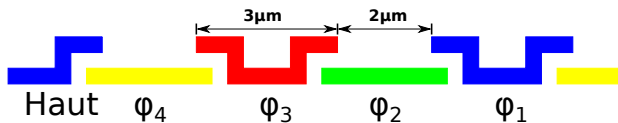


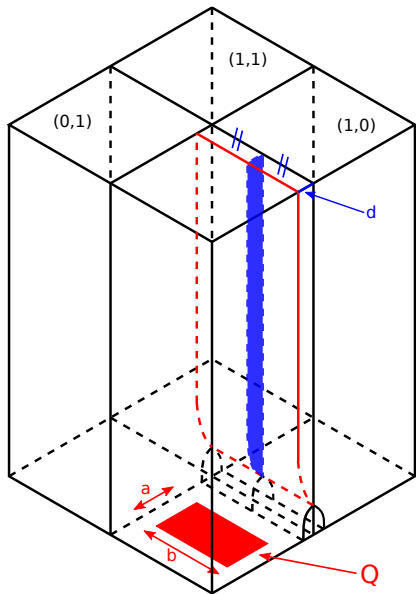
En fonction du nombre de phases

- Dépendance de l'effet brigther-fatter en fonction de la géométrie des pixels.
- Origines du BF dans des effets électrostatiques.

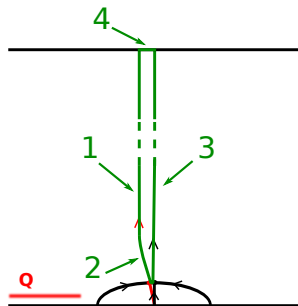
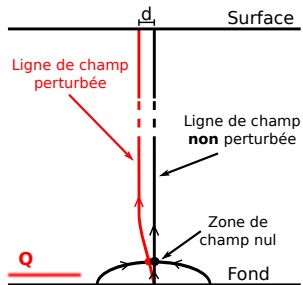


Interprétation



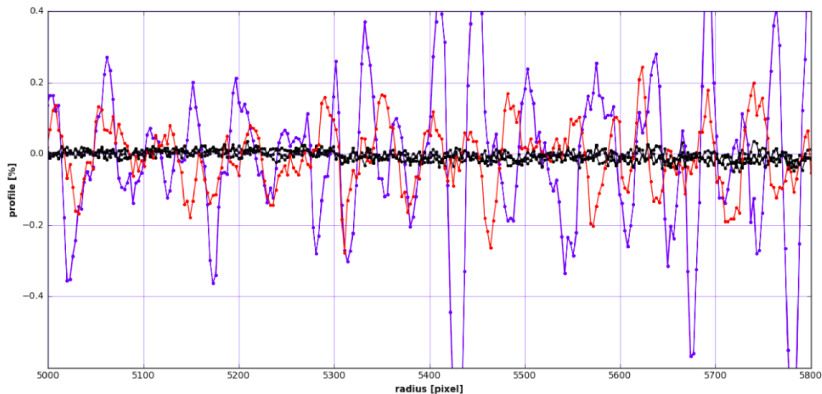


Nouveau modèle



Les cernes de croissances : tree-rings

- Amplitude moyenne :
 - CCD E2V : 0.19% (rouge et noir)
 - CCD ITL : 0.83% (bleu)



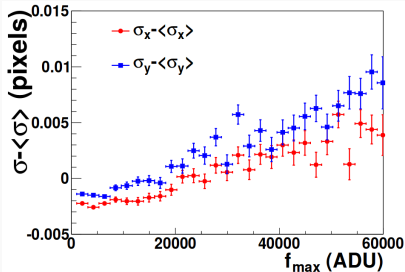
L'effet brighter-fatter : impact sur la science

Propriétés :

- Déformations de la PSF en fonction du flux.
- Anisotrope.

Les SNIa

- PSF calibrée sur objets lumineux.
- SNIa sont beaucoup plus faibles.
- Erreur \propto au rapport des PSF.
- Effet faible, dépend du CCD.

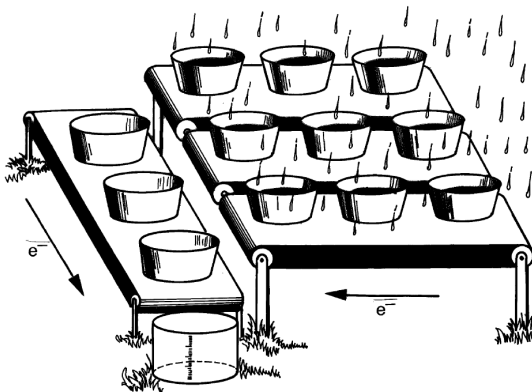


Le lentillage gravitationnel faible

- Du même ordre que l'effet brighter-fatter.
- Mesure de forme des galaxies par mesure des seconds moments est impactées.
- PSF calibrée sur objets lumineux, seconds moments trop grands, donc seconds moments intrinsèques trop petits.

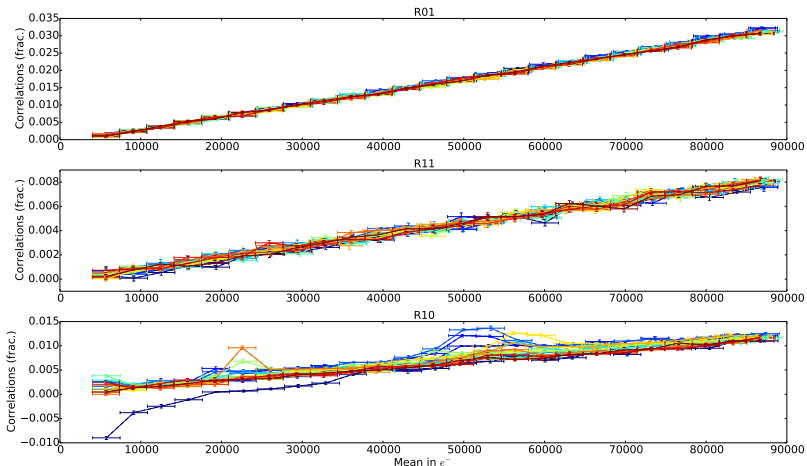
Transfert de charges

- Horloges parallèles : variation des tensions des électrodes.
- *Charge Transfer Efficiency* > 99,9999 %.
- CTE dépend de synchronisation horloges, taille pixel, vitesse de transfert.



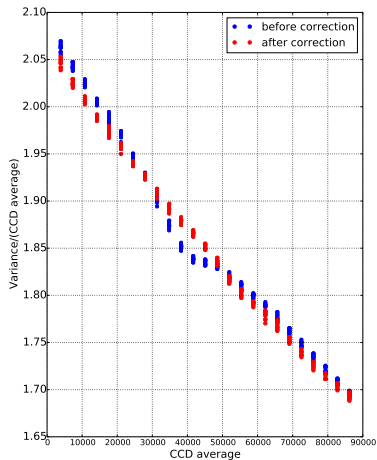
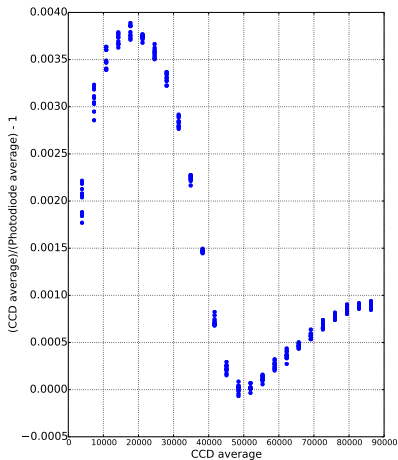
Sélection des canaux

- PTC : corrélations ($C_{ij}/Var = R_{ij}$) à plusieurs intensités.
- Sélection des canaux les moins chaotiques en R_{10} .

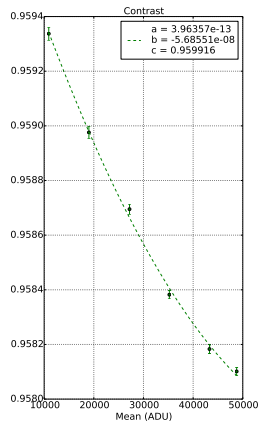
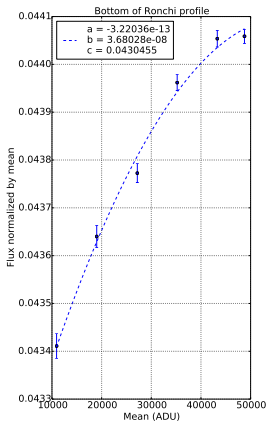
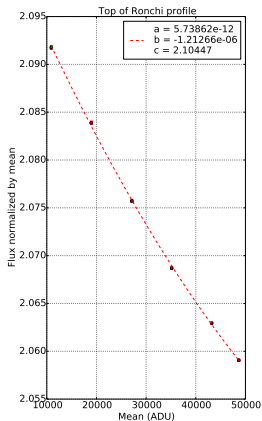


Correction de la non-linéarité de l'acquisition

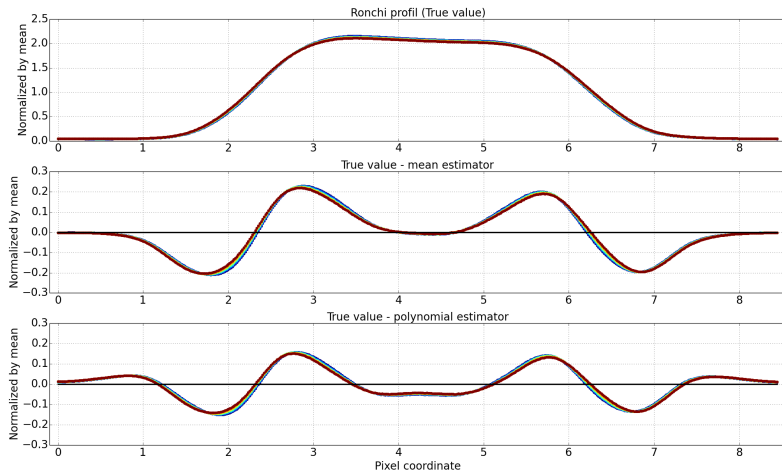
- Non linéarité d'un amplificateur de l'ASPIIC.
- Quelques %.



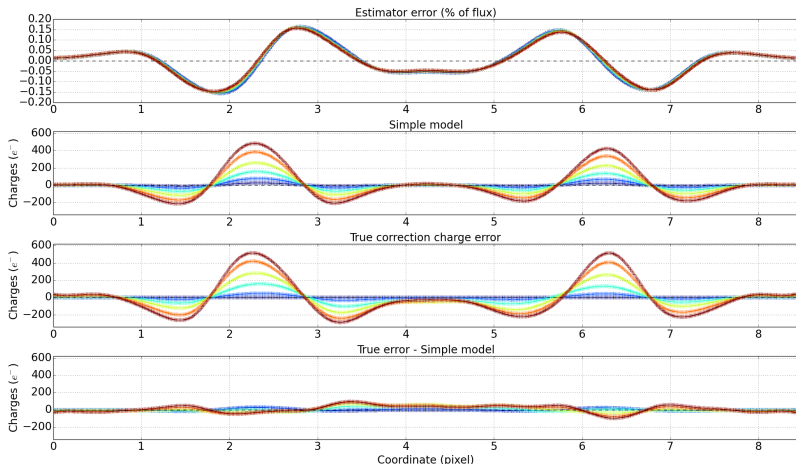
Analyse quantitative de l'effet brighter-fatter



Influence de l'estimateur de charge



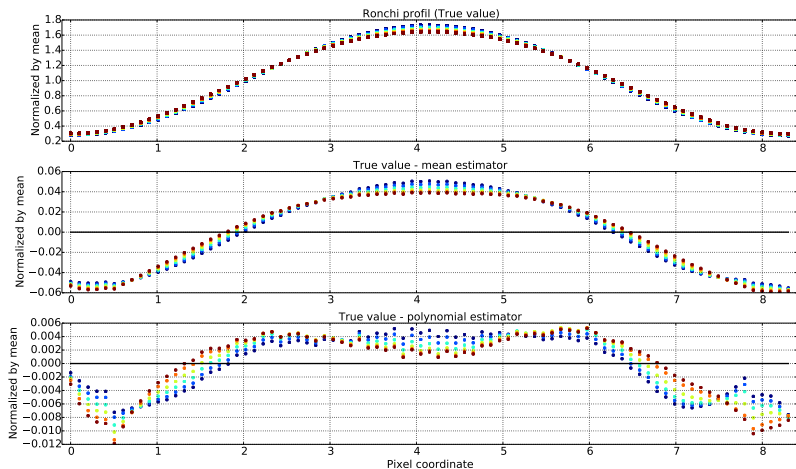
Propagation de l'erreur de l'estimateur de charge



ΔC_i	$7609e^-$	$13238e^-$	$18932e^-$	$24520e^-$	$30145e^-$	$33952e^-$
Non corrigé	0	553	1626	3093	4896	6315
Estimateur polynomial	0	134	431	775	1117	1360
Estimateur polynomial + correction	59	73	117	207	267	294

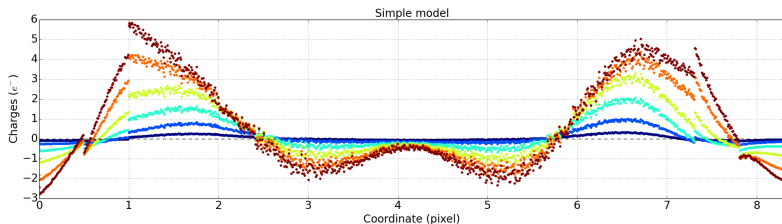
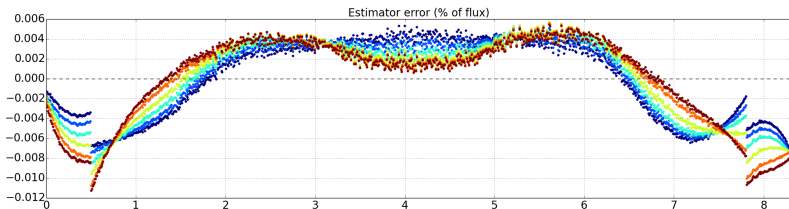
Sinus

- Les profils de Ronchi ne sont pas représentatifs de la future qualité d'image de LSST.
- Résolution pixels LSST : 0.2 arcsecondes.
- Meilleures conditions d'observation : 0.4 arcsecondes, soit deux pixels.



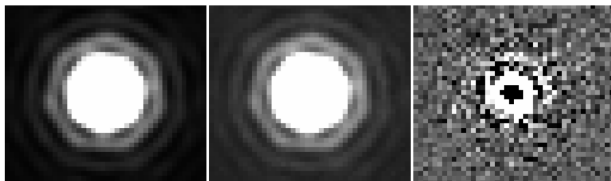
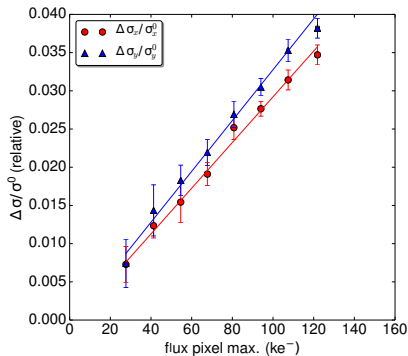
Sinus : estimation de l'erreur de l'estimateur de charge

- Le *descrambling* n'est plus limité par l'estimateur de charge.
- Nous sommes maintenant sensible à la précision du modèle.



Mesure de l'effet brighter-fatter sur des spots lumineux

- Projection de nombreux spots lumineux sur une même portion du CCD.
- Mesure des seconds moments en fonction du flux.
- Mesure de l'anisotropie.
- Difficile de mesurer chromaticité (diffraction).



(a) 200-s exposures (b) 20-s exposures (c) subtraction (a)-(b)

Banc optique

- Amélioration de l'uniformité de la source.
- Illumination nette sur plus grande surface de détecteur.
- Installation d'un interféromètre de Michelson ?

Reconstruction des distorsions statiques :

- Réduction des distorsions optiques sur le banc.
- Modélisation des distorsions optiques.
- Implémentation de la méthode sur des vraies données.
- Impact de la qualité de la reconstruction sur la science ?

Correction de l'effet brighter-fatter :

- Étude des erreurs du modèle.
- Correction sur des images à plus faibles gradients.