

*Simulation d'observations
virtuelles d'échantillons de
galaxies*

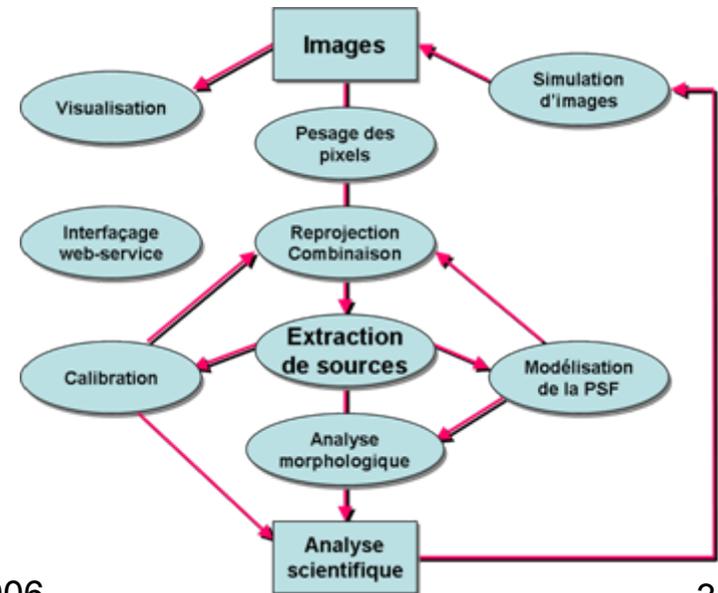
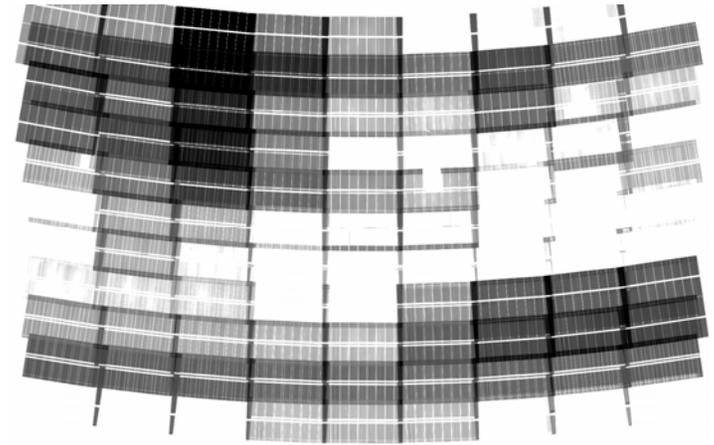


Simulation d'observations virtuelles d'échantillons de galaxies

- Motivations
- Catalogues cosmologiques virtuels
 - Recettes “du pauvre”
- Images de galaxies: variété intrinsèque et variété de présentation
- Modélisation de la "réponse impulsionnelle“
- Échantillonnage
- Bruits et artefacts
- Affichage réaliste

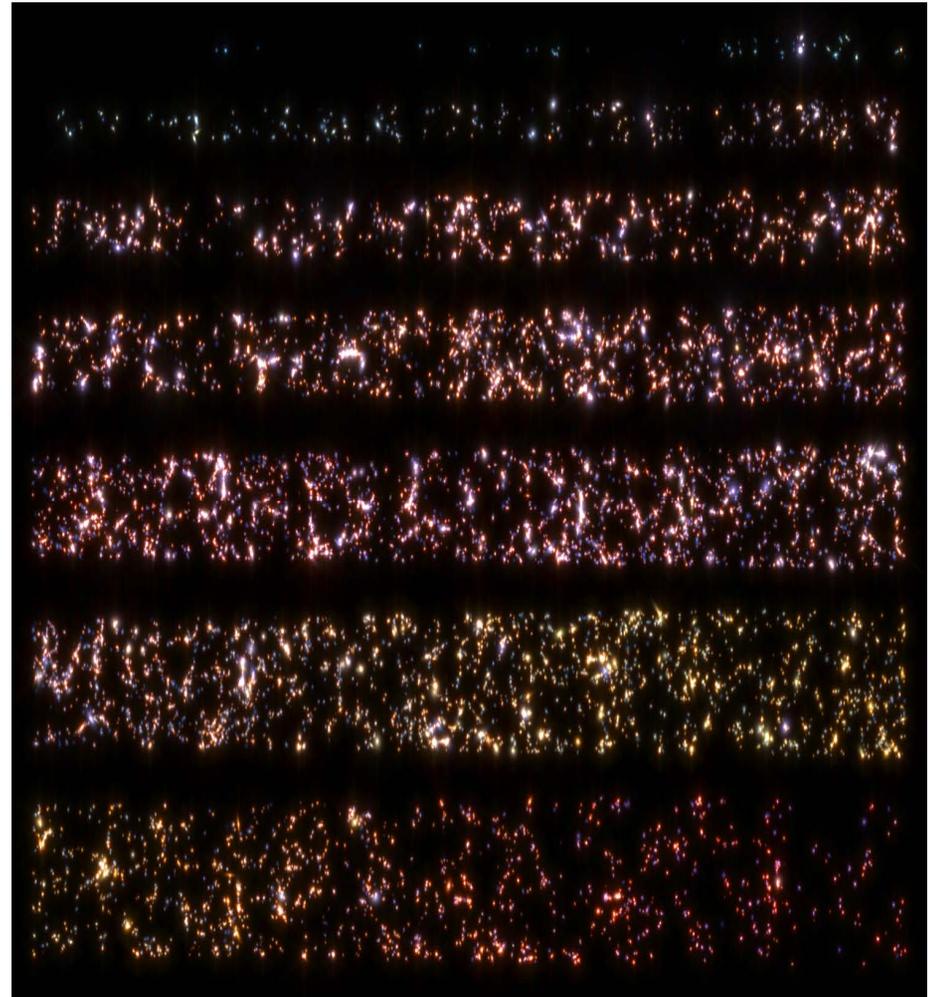
Motivations

- Analyse scientifique: prendre en compte de manière réaliste les différentes contributions
 - Influence fortement non-linéaire des sources de bruit sur les mesures
 - Détection (biais d'Eddington)
 - Mesures adaptatives
 - Couverture et qualité hétérogènes des relevés
- Mise au point des outils de détection et de mesure
 - Evaluer et valider les algorithmes
 - Exemple de SkyMaker & Stuff: Outils dont l'origine remonte au développement de SExtractor (1994-95)
 - Test des logiciels de redshifts photométriques
- Préparation de projets instrumentaux



Catalogues cosmologiques virtuels

- Origine
 - Simulations 4D matière noire + recettes semi-analytiques (GallCS, voir l'intervention de Jeremy Blaizot)
 - Univers "jouet" simplifiés
- Constituants
 - Composantes de galaxies, chacune avec sa distribution spectrale d'énergie (SED) et éventuellement sa loi d'extinction:
 - Bulbe
 - Rayon équivalent, ellipticité intrinsèque, indice de Sersic, angles de position
 - Disque
 - Longueur et hauteur d'échelle, angles de position
 - Autres attributs: bande de poussière, bras, barre, ...
 - Source(s) (quasi-)ponctuelle(s) (noyau actif, Supernova)



Catalogues cosmologiques “du pauvre”

- Distribution des galaxies

- poissonnienne

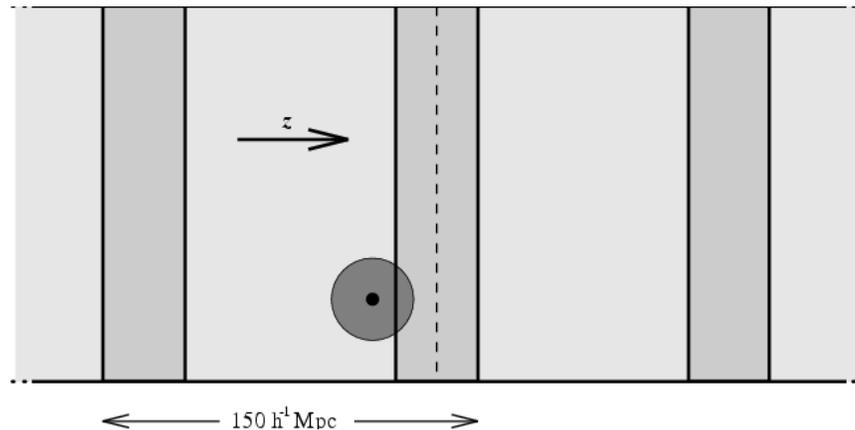
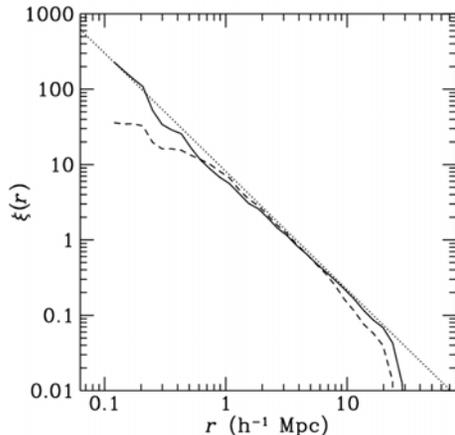
- Un seul paramètre $\langle N(z) \rangle$
- suffisante pour les analyses photométriques en l'absence de confusion

- issue d'un champ gaussien (stationnaire localement)

- Fonction d'autocorrélation
 - $r_0 \approx 4 h^{-1} \text{ Mpc}$
 - $\gamma \approx 1.8$

$$\xi(\mathbf{r}) = \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma}$$

- suffisante pour les statistiques à grande échelle (régime linéaire de croissance des perturbations). En première approximation pour $z < 1$ on peut utiliser r_0 et γ constants en coordonnées comobiles (mais voir intervention de Henry Joy McCracken)
- Approche discrète possible directement à partir d'une construction hiérarchique (Soneira & Peebles 1978, Chokshi & Wright 1988, Brown & Groth 1989,...)
- Sinon, génération du champ gaussien 3D
 - par FFT inverse d'un champ complexe d'amplitude $\propto \sqrt{P(\mathbf{k})}$ et de phase aléatoire distribuée uniformément, ou
 - par convolution d'un bruit blanc avec la “racine de convolution” de la fonction d'autocorrélation
 - » facilite l'assemblage de “briques d'univers”



Catalogues cosmologiques “du pauvre”

- Distribution des galaxies
 - issue d'un champ lognormal (stationnaire localement):

- $\delta_l = e^\delta$

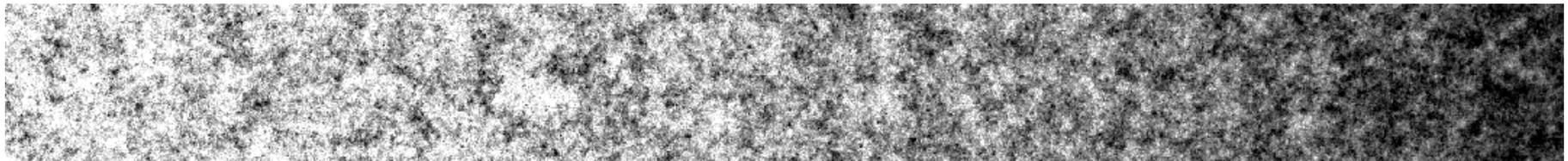
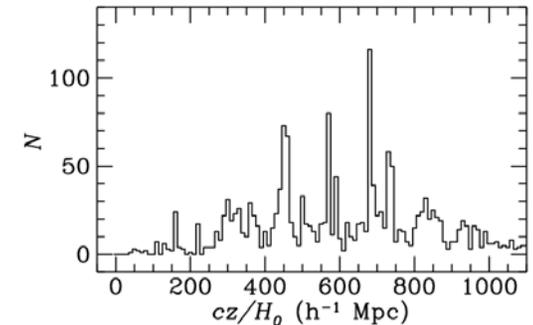
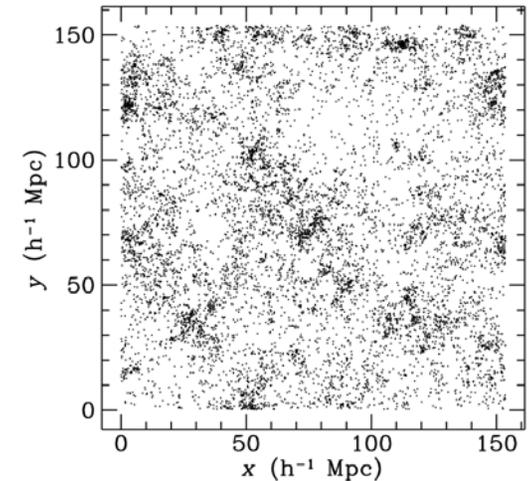
- Moyenne $\mu_l = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$

- Variance $\sigma_l^2 = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$

- Fonction d'autocorrélation (voir Coles & Jones 1991)

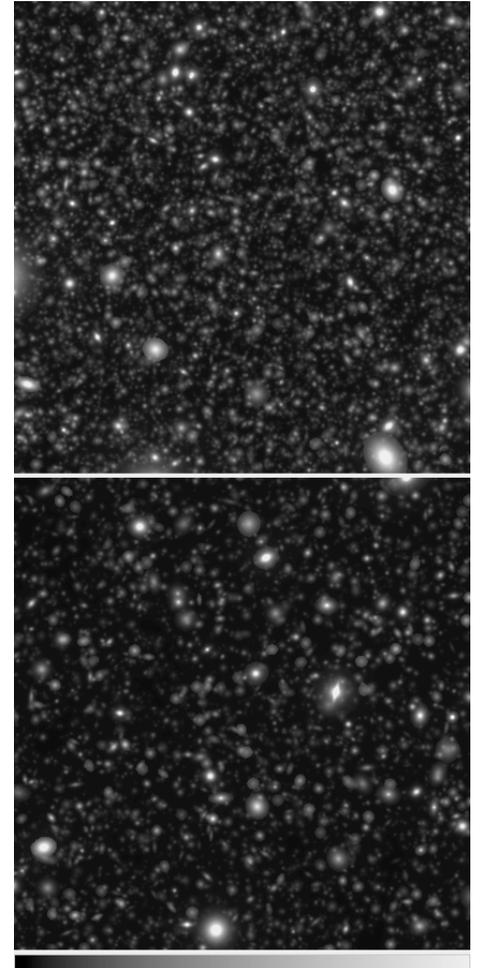
$$\xi_l(\mathbf{r}) = e^{\xi(r)} - 1$$

- reproduit avec une précision convaincante les probabilité de comptage des galaxies.
 - permet de mesurer l'impact des effets de confusion.



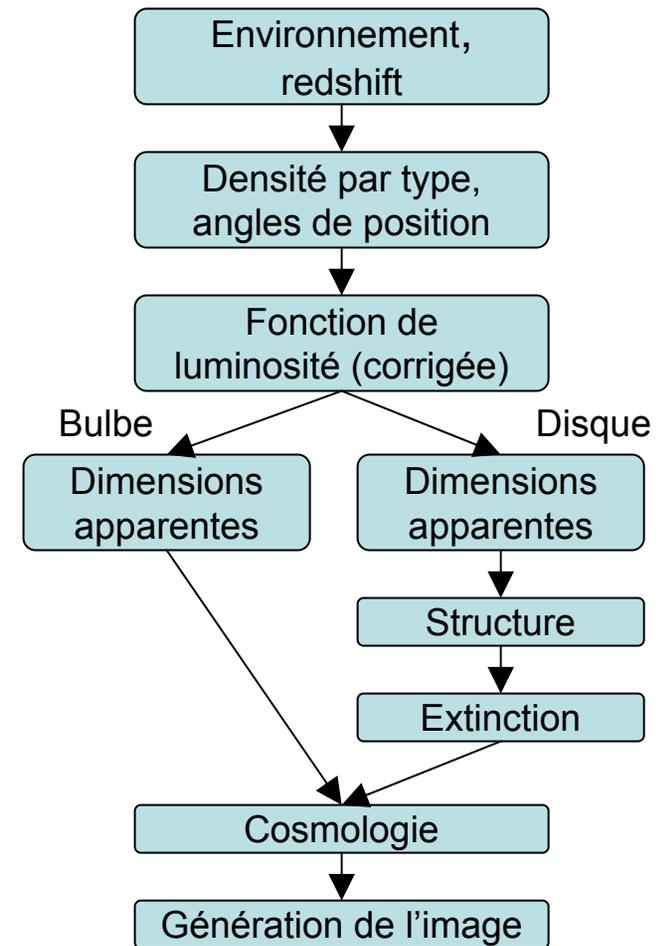
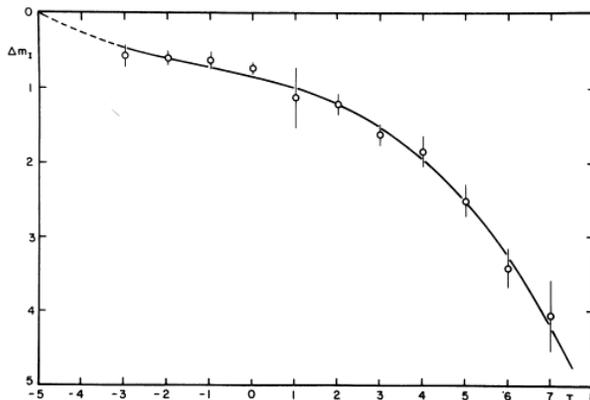
Cosmologie “du pauvre”

- Cosmologie:
 - Friedmann avec constante cosmologique
 - Approche différentielle par pas comobile constant
 - Certains calculs n’ont pas besoin d’être refaits exactement au sein d’une même tranche de redshift
 - Vision “en décor de théâtre”
 - A chaque pas est calculé une magnitude limite dans la bande de référence
 - Algorithme “du peintre”
 - Affichage des galaxies par z décroissants depuis $z = z_{\max}$
 - Permet de calculer un effet d’extinction sur les pixels d’arrière plan”
 - Beaucoup moins coûteux en temps de calcul qu’un lancer de rayons, mais ne permet pas de faire des simulations précises de *gravitational lensing*.



Galaxies “du pauvre”

- Modélisation semi-empirique à partir de statistiques obtenues sur les grands catalogues modernes de galaxies
- Nécessité de définir une bande spectrale unique “de référence” dans le référentiel de chaque galaxie
 - Fonctions de luminosité
 - Extinction interne
 - Rapports de luminosité bulbe/total
- Type morphologique T
 - (Morphologie)
 - Type spectral (disque)
 - Clustering
 - Fonction de luminosité
 - Extinction interne
 - Rapport luminosité bulbe/total (par exemple Simien & de Vaucouleurs 1986, et Schulz & Fritze 2002)
 - Evolution



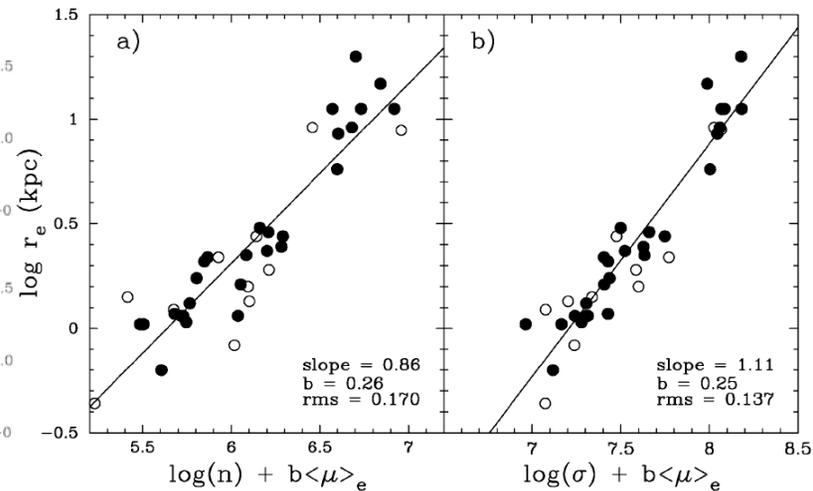
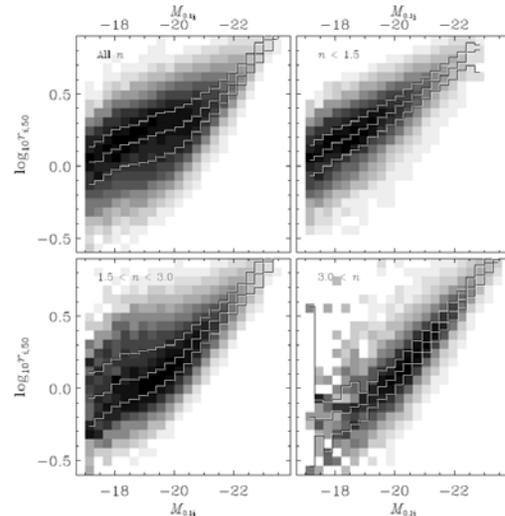
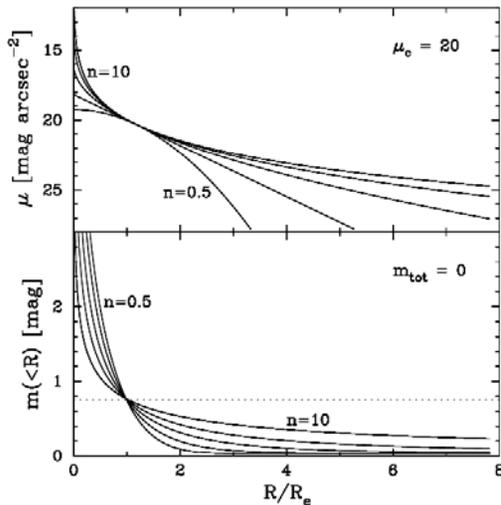
Bulbes

- Bulbes (sphéroïde)

- Loi de Sersic de paramètre n (Ciotti 1991):

$$\mu_S(r) \approx M_S + 1.086(2n-0.324)(r/r_e)^{1/n} + 5 \log r_e + 2.5 \log_{10}[2\pi n(2n-0.324)^{-2n} \Gamma(2n)]$$

- r_e depend de façon étroite de M_S (conséquence de la relation de Kormendy, voir Binggeli *et al.* 1984, ou encore Blanton *et al.* 2003). Valable pour elliptiques et bulbes (Renzini 1999).
- En incluant n , on obtient un “plan fondamental photométrique” (voir par exemple Graham 2002):
 - $\log r_e \approx 0.86 (\log n + 0.26 \mu_e)$
- Pas d’extinction interne
- SED Coleman *et al.* (1980) étendue par Arnouts (1998)



Disques

- Disques

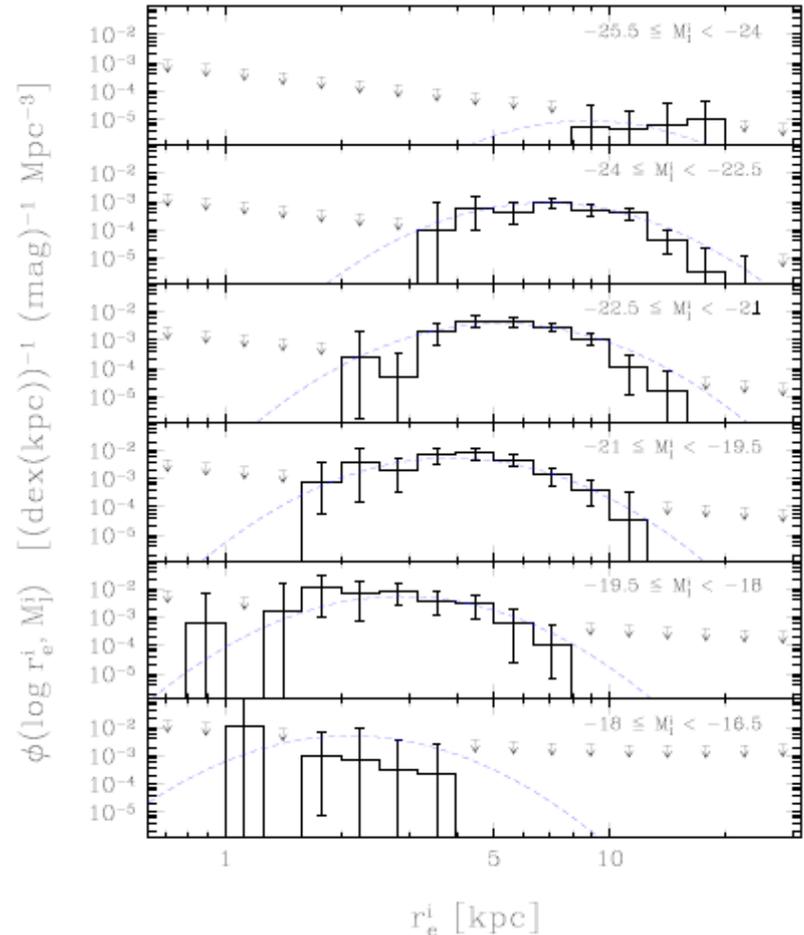
- Loi exponentielle:

$$\mu_D(r) = M_D + 1.0857(r/r_h) + 5 \log r_h + 23.56$$

- Modèle semi-analytique (de Jong & Lacey 1999) basé sur les résultats de simulations de halos de matière noire: la longueur d'échelle des disques suit une loi log-normale centrée sur

$$r_h = r_*(L/L_*)^{-\beta} \text{ avec } \beta \approx -1/3$$

- Extinction interne paramétrée selon de Vaucouleurs *et al.* (1991), distribution spectrale selon Calzetti *et al.* (LMC)
- SEDs Sab à Im Coleman *et al.* (1980) étendue par Arnouts (1998)





Ellipticité des galaxies

- Ellipticité intrinsèque

- Bulbes (oblates)

- Aplatissement apparent q_{obs} en fonction de l'aplatissement réel q (Sandage *et al.* 1970): $q_{\text{obs}} = (q^2 \sin^2 i + \cos^2 i)^{1/2}$
 - Distribution gaussienne de q avec $\langle q \rangle \approx 0.65$ et $\sigma_q \approx 0.18$

- Disques

- Distribution uniforme en angle d'inclinaison

- Déficit de la distribution observée du rapport d'axe apparent des disques q_{obs} en $q_{\text{obs}} = 1$

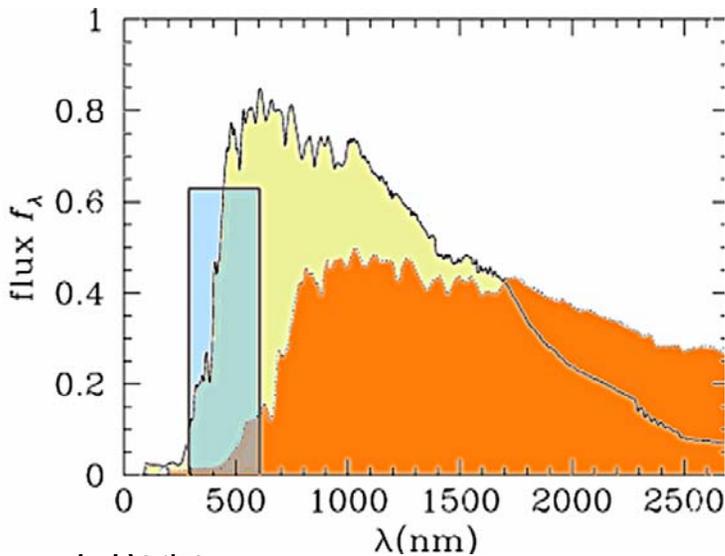
- ☞ Triaxialité + barres, bras, ...

- Shear

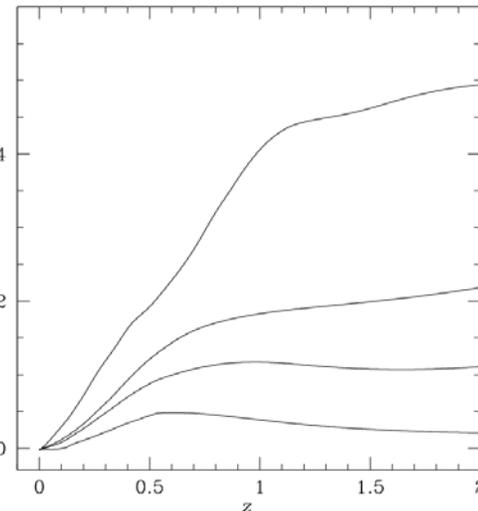
- transforme les ellipses en autres ellipses
 - Induit une rotation apparente du bulbe relative au disque

Photométrie

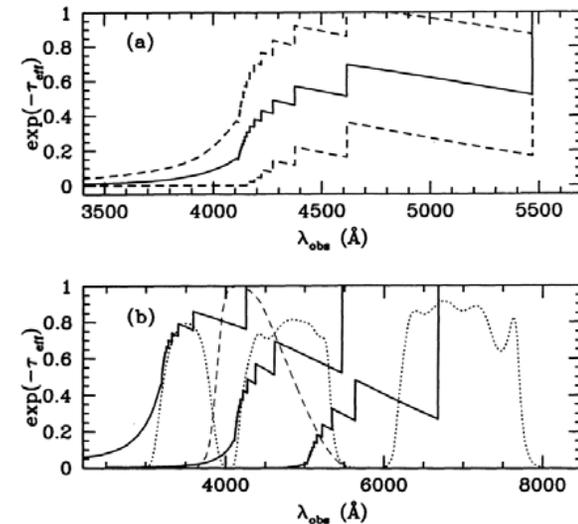
- Transformation de la luminosité du référentiel de la galaxie à celui de l'observateur
 - $m = M + 5 \log_{10} d_L(z) + k(z) - 2.5 \log_{10} e^{-\tau_{\text{eff}}}$
 - Correction k:
 - Fait rapidement “disparaître” les bulbes dans le domaine visible
 - Extinction intergalactique (Madau 1995):
 - HI et HeII
 - Comportement stochastique
 - Significative dans le visible pour $z > 2.5$



E. Bertin



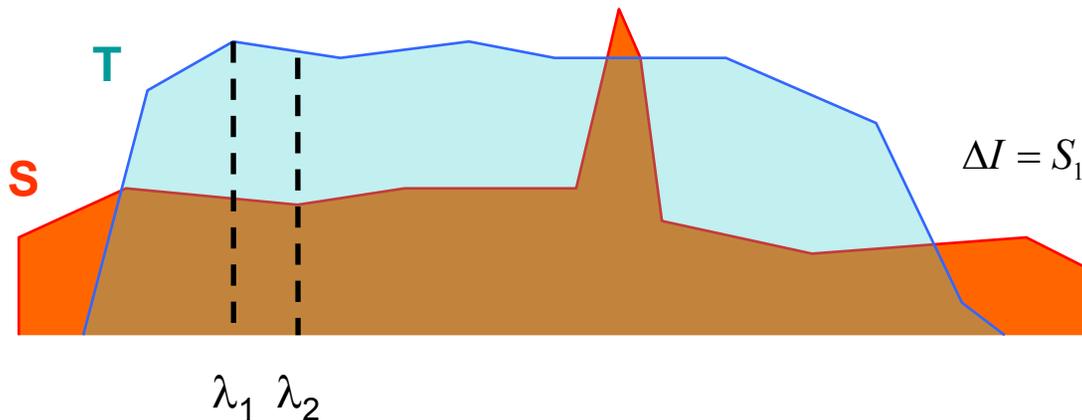
Cargese 29/08/2006



12

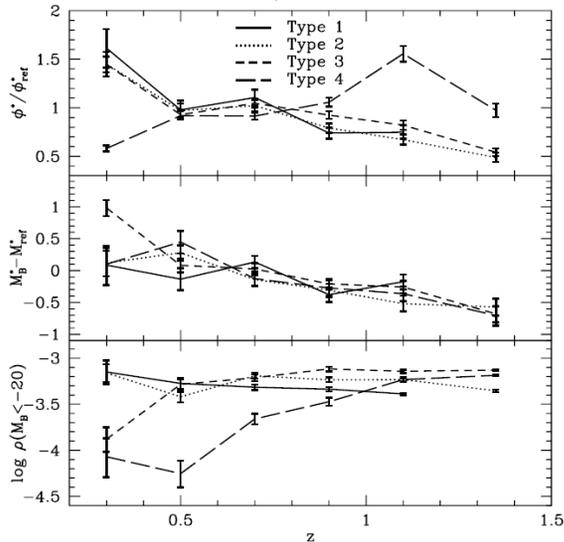
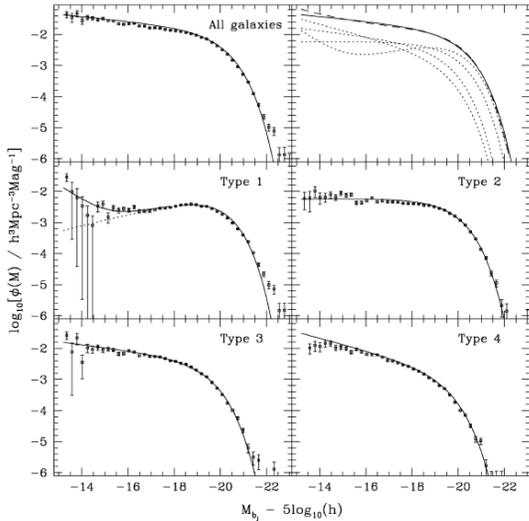
Photométrie

- Le moteur réalisant le produit scalaire entre SEDs et courbes de transmission ou d'extinction est la pièce maitresse de la section photométrique des simulations
 - Techniques classiques de rééchantillonnage très coûteuses en temps. Il existe heureusement une possibilité de réaliser les produits scalaires de façon extrêmement rapide et précise
 - Pas de rééchantillonnage des SEDs
 - Calculs exacts (interpolation bi-linéaire implicite)
 - Les courbes peuvent être fournies avec un échantillonnage quelconque, régulier ou non.
 - Les SEDs peuvent être en f_ν ou f_λ
 - Intégration des flux en énergie ou en nombre de photons.
 - Magnitudes exprimées dans un système tel que AB ou Véga.



$$\Delta I = S_1 T_1 (W_2 - W_1) \left(\frac{S_2}{2S_1} + \frac{T_2}{2T_1} + \frac{\left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right) \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{3} \right)$$

Fonctions de luminosité



- Paramétrisation selon Schechter 1976:

$$\phi(M)dM = \phi^* \exp(0.92(\alpha+1)(M^*-M)) - e^{0.92(M^*-M)} dM$$
- Paramètres par type à $z=0$: Madgwick *et al.* 2002 (2dFGRS)
- Evolution de la fonction de luminosité
 - Cette évolution n’affecte pas les rayons d’échelle, mais seulement les brillances de surface
 - On peut adopter la paramétrisation de Gabasch *et al.* 2004:
 - $\Delta M^*(z) = a \ln(1+z)$
 - $\Delta \ln \phi^*(z) = b \ln(1+z)$
 - α constant
 - Les études récentes (Blanton *et al.* 2003, Ilbert *et al.* 2005, Willmer *et al.* 2005, Zucca *et al.* 2005) jusqu’à $z \approx 2$ suggèrent
 - $a \approx -1.0$ à -1.5 (Irrégulières) selon le type spectral aux longueurs d’ondes bleues
 - $b = -1.7$ (Elliptiques) à $+1.9$ (Irrégulières).

Les images



- La simulation des images FITS à partir de catalogues pré-calculés offre de nombreux avantages
 - Possibilité d'interfacer avec différents types de codes simplistes, N-corps ou encore semi-analytiques (GalICS)
 - Bibliothèque de types d'objets:
 - étoiles (sources ponctuelles)
 - galaxies (bulbes + disques).
 - Une seule passe dans le catalogue suffit pour les modélisations simples.
 - 2 passes peuvent être nécessaires pour simuler des effets comme les lentilles gravitationnelles
- Sur-échantillonnage
- Modélisation de la réponse impulsionnelle
- Bruits et artefacts
- Affichage

La réponse impulsionnelle (PSF)

- Convolution de plusieurs composantes:
 - Turbulence atmosphérique
 - Flou de bougé
 - Vibrations de l'instrument
 - Guidage
 - Diffraction sur la pupille
 - Optique de Fourier
 - Pouvoir séparateur
 - Aberrations
 - Reflection/diffusion dans l'instrument
 - Halos produits par de l'optique réfractive
 - Micro-diffusion
 - dans le détecteur
 - Diffusion des charges
 - Transferts de charges (sans obturateur)
 - Convolution par la réponse intra-pixel



Turbulence atmosphérique

- Pour une pose « longue » effectuée à travers une atmosphère dont la structure turbulente suit le modèle de Kolmogorov (voir par exemple Roddier 1981), les fluctuations de phase ramenées à la pupille conduisent à une FTM (Fonction de Transfert de Modulation)

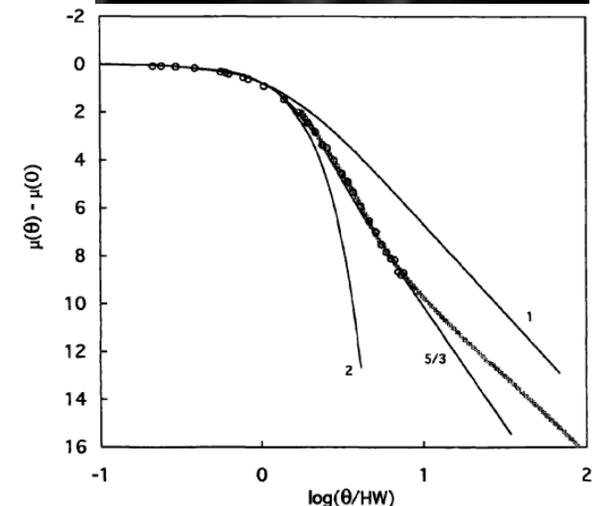
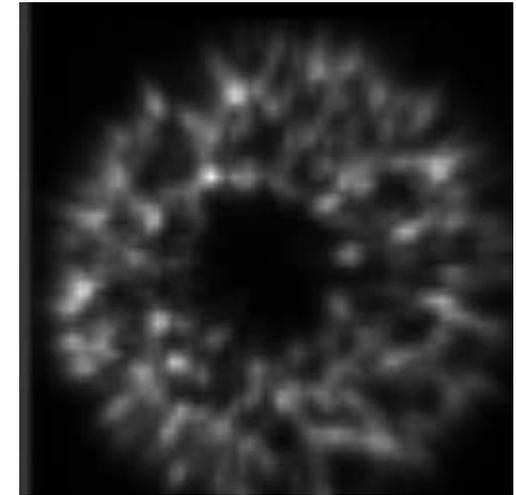
$$\text{FTM}(|\mathbf{k}|) = e^{-(|\mathbf{k}|/k_0)^{5/3}}$$

- avec

$$k_0 \approx \frac{2\pi}{2.0993} \left(\frac{r_0}{\lambda} \right)$$

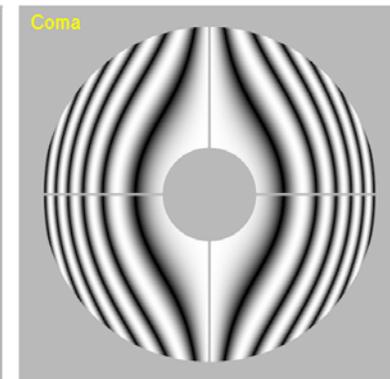
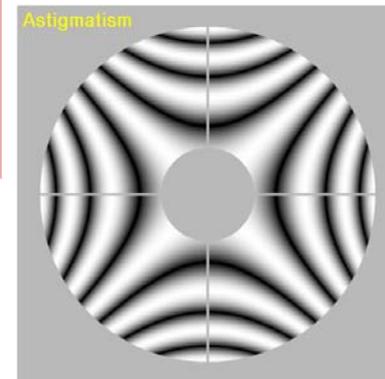
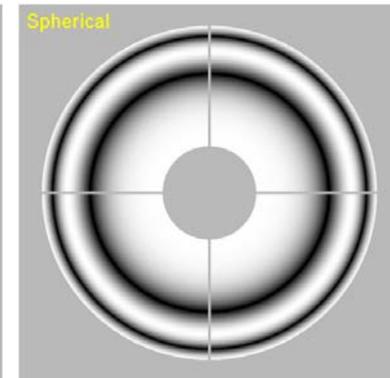
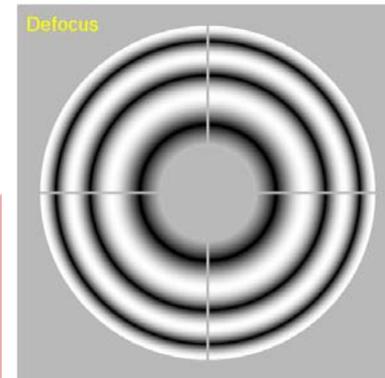
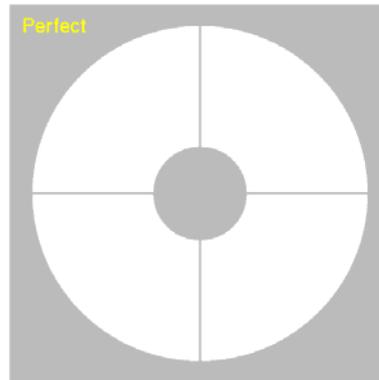
- r_0 paramètre de Fried (1966) relié à la largeur à mi-hauteur de la réponse impulsionnelle

$$\text{FWHM} \approx 0.976 \left(\frac{\lambda}{r_0} \right)$$



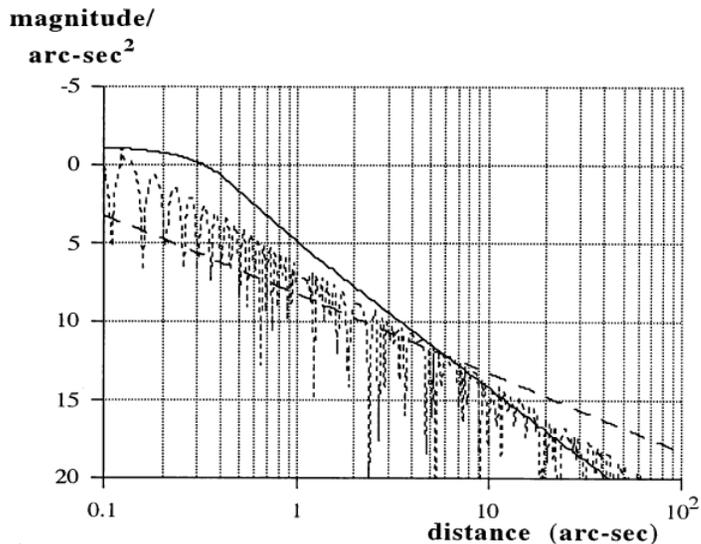
Composante de diffraction de la PSF

- Pupille:
 - Diffraction de Fraunhofer
 - La réponse impulsionnelle est la transformée de Fourier de l'autocorrélation de la pupille
 - l'échantillonnage et l'étendue de la grille représentant la pupille déterminent respectivement l'étendue et l'échantillonnage de la PSF
 - Les aberrations sont simulées sous formes de variations de phase sur la pupille complexe
 - L'étalement de la bande passante du système peut nécessiter une sommation en longueur d'onde (les aberrations résultent de différences de marche).

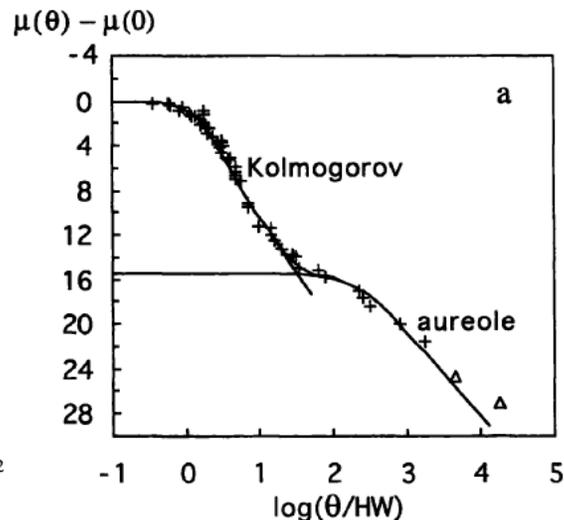


Auréole

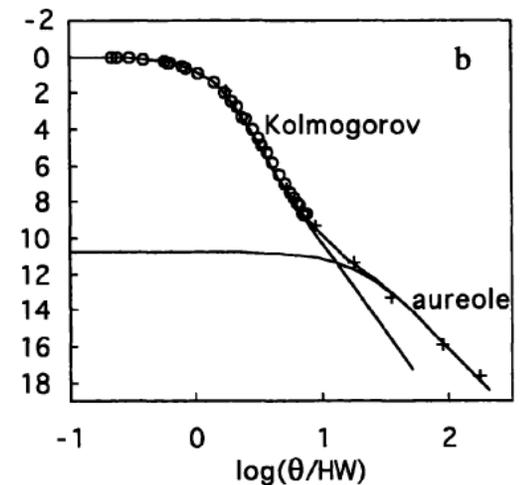
- Au-delà de quelques dizaines de demi-largeurs de distance du centre, les ailes de la réponse impulsionnelle sont dominée par une composante appelée « auréole » se comportant en $1/r^2$
 - Plusieurs origines invoquées (par exemple Roddier 1995 ou Racine 1996)
 - Poussières, défauts de polissage et microrayures sur les surfaces optiques
 - Diffusion dans les matériaux (détecteurs)
 - Diffusion dans l'atmosphère
 - Brillance de surface typique $\mu = 16 \text{ mag.arcsec}^{-2}$ à $1'$ du centre d'une étoile de magnitude 0



E.Bertin



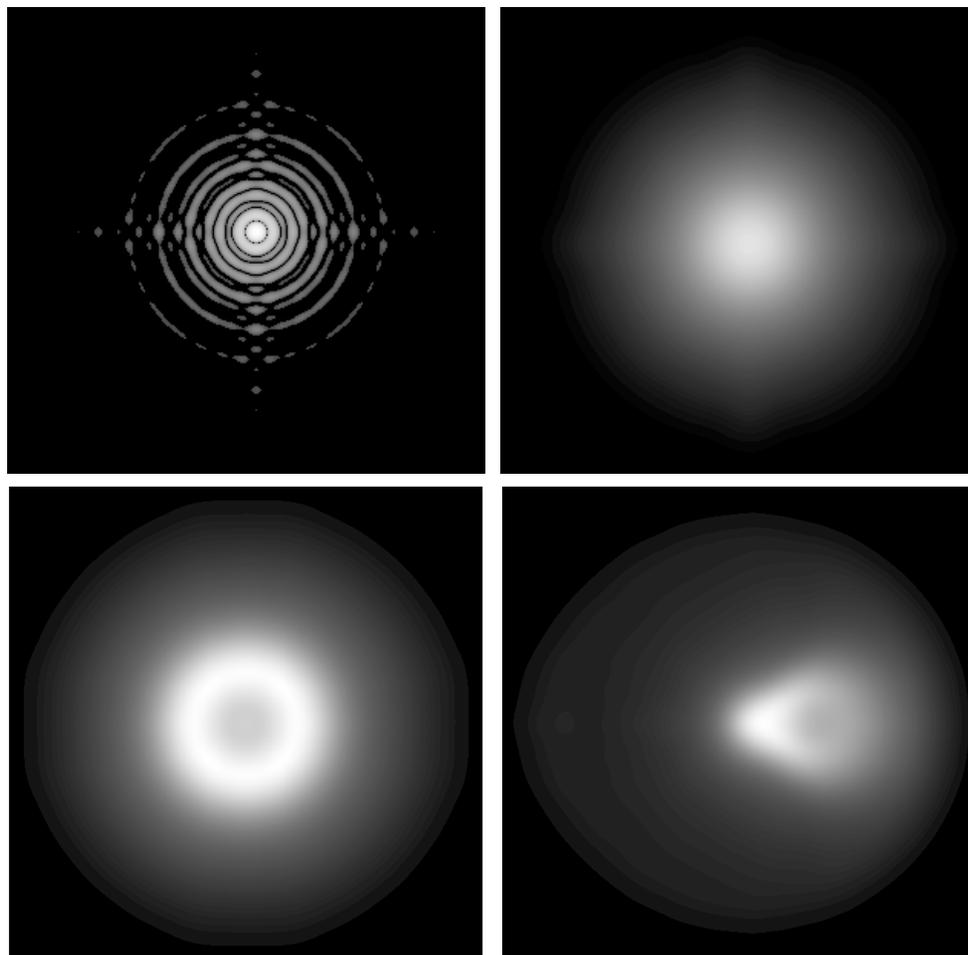
Cargese 29/08/2006



19

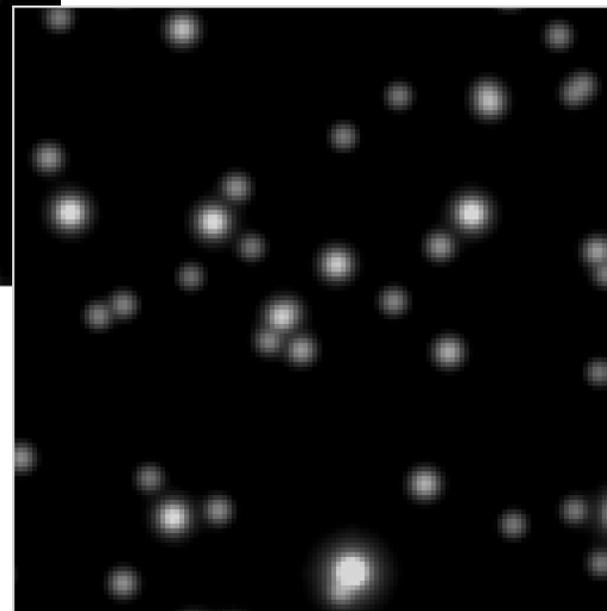
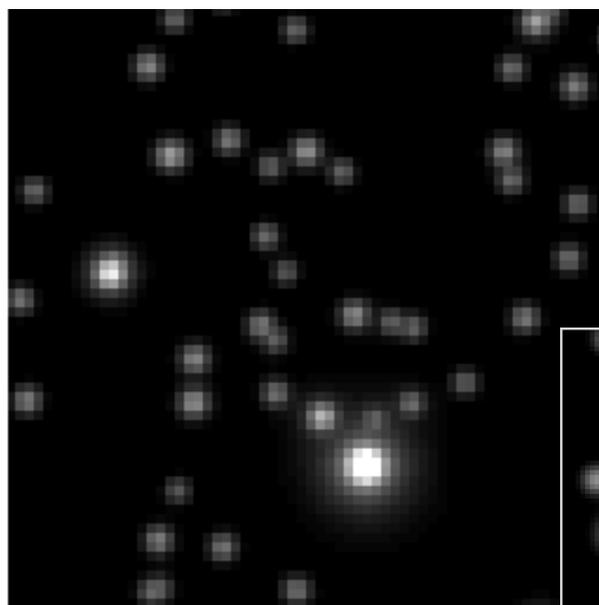
Flou de bougé et réponse intra-pixel

- La convolution par la composante de jitter et/ou de trainage peut être appliquée à ce niveau (dans Fourier)
- Finalement la PSF est convoluée par l'empreinte du pixel



Effets de sous-échantillonnage

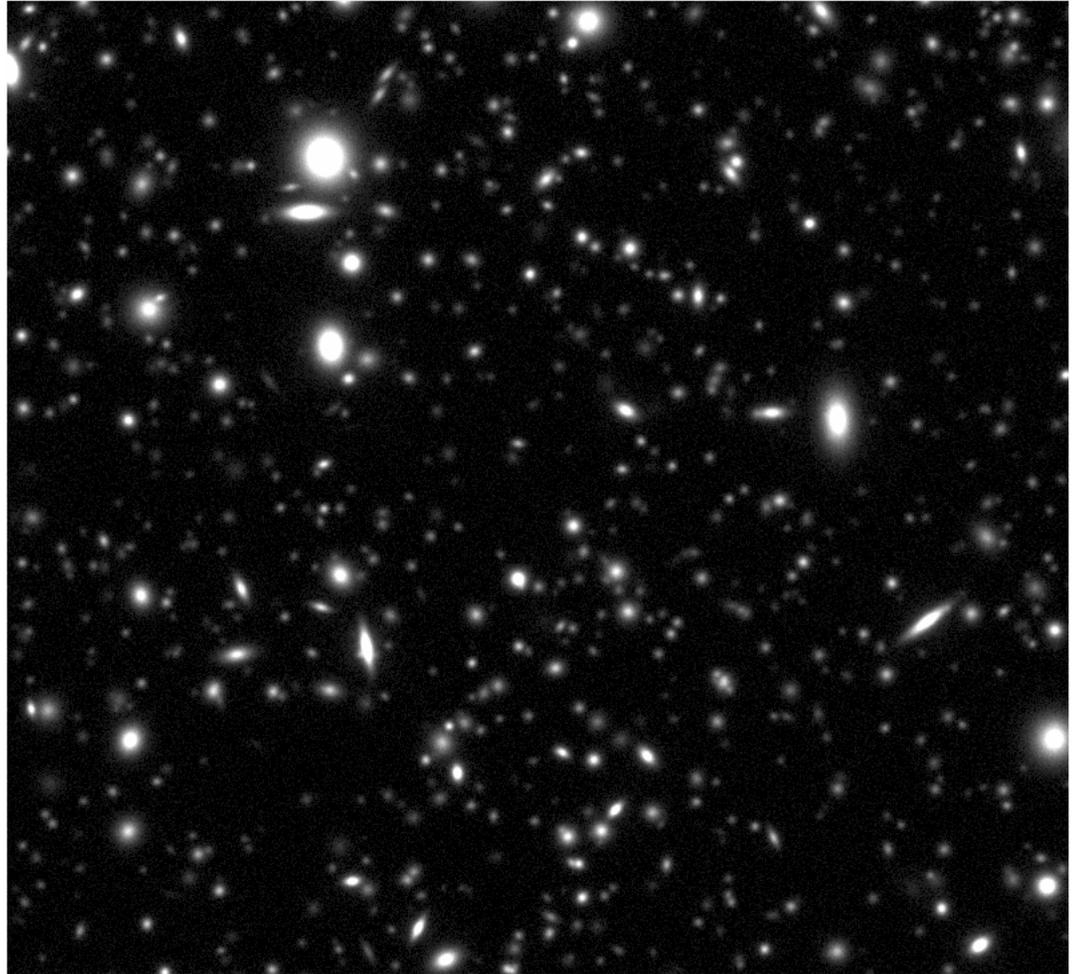
- La PSF suréchantillonnée est interpolée et décimée à la résolution finale de l'image
 - Les effets de sous-échantillonnage sont fidèlement reproduits
- Les techniques de micro-scanning techniques peuvent être simulées



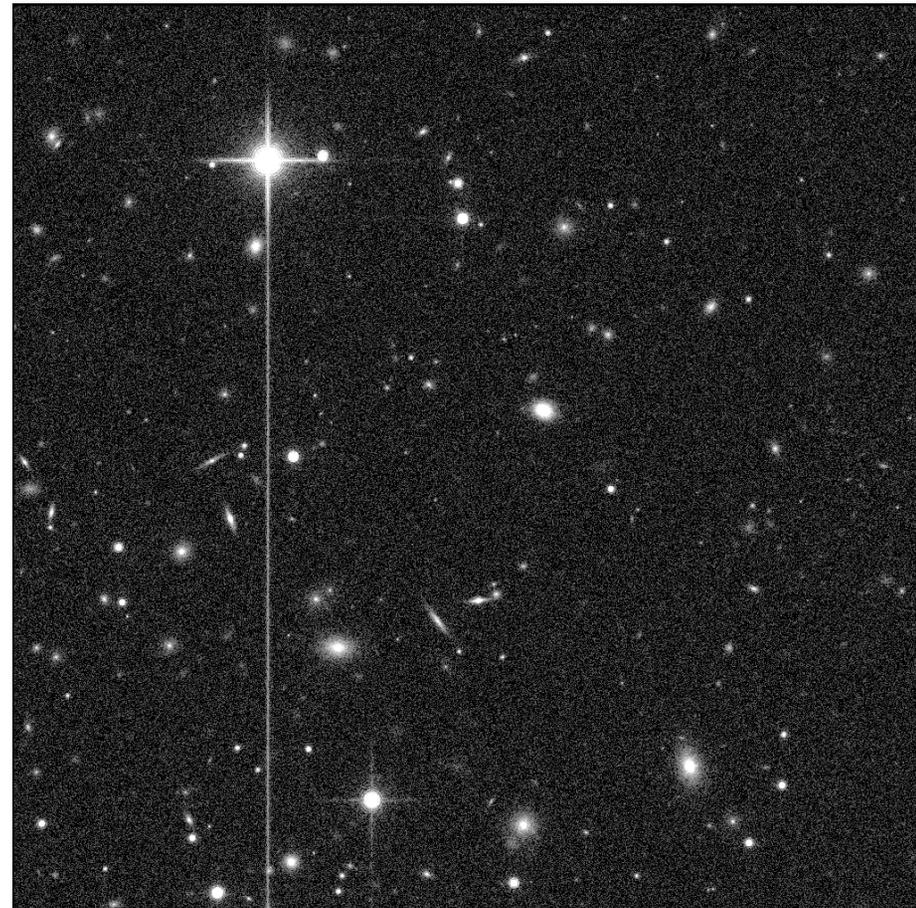
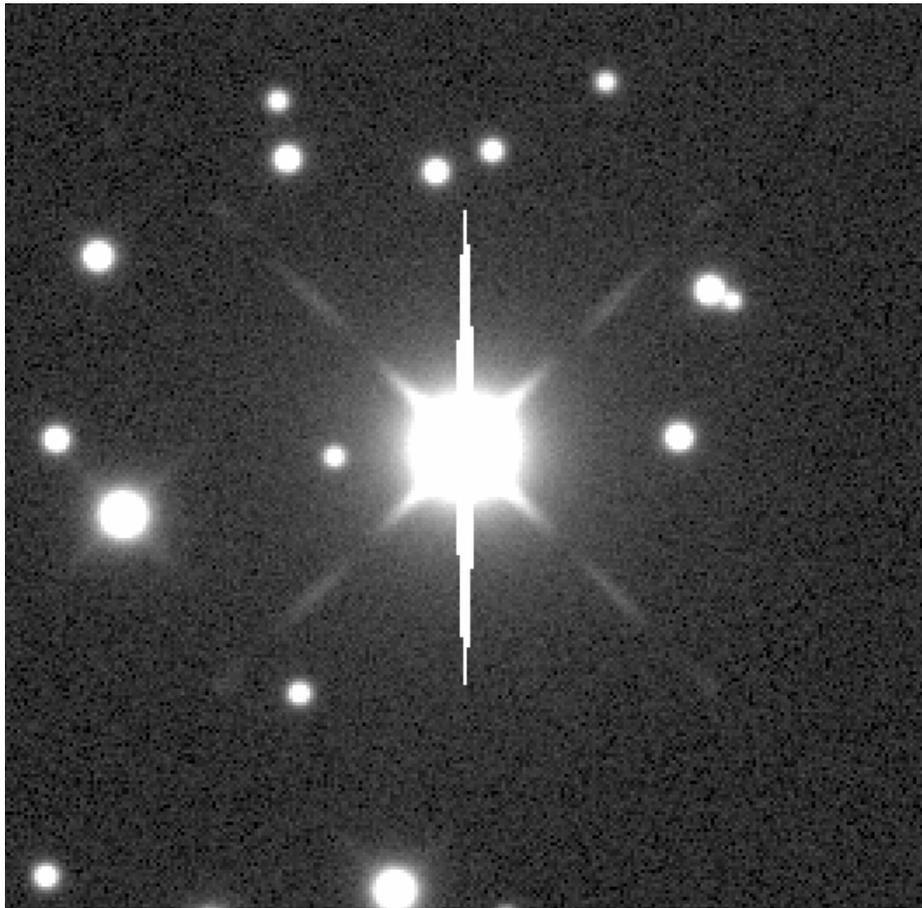


Bruits

- Le bruit (blanc) de photon est simulé par réalisation de Poisson de l'image
- Du bruit (blanc) gaussien peut être ajouté pour simuler un bruit de lecture



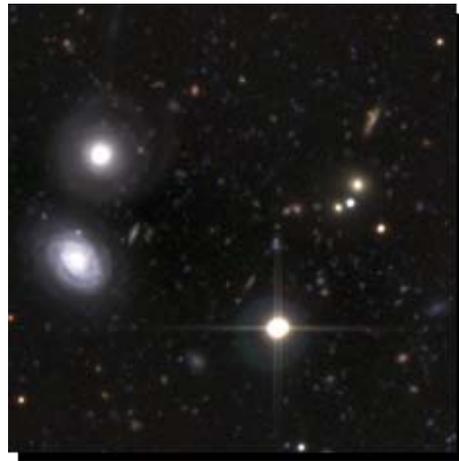
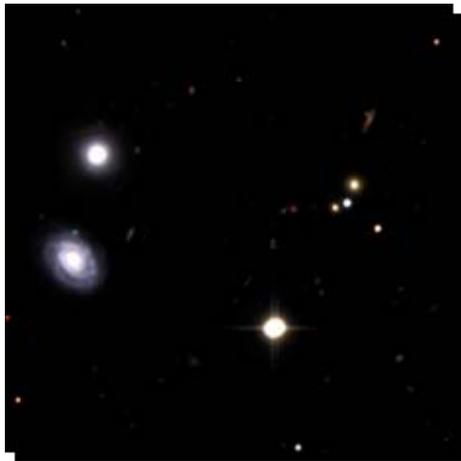
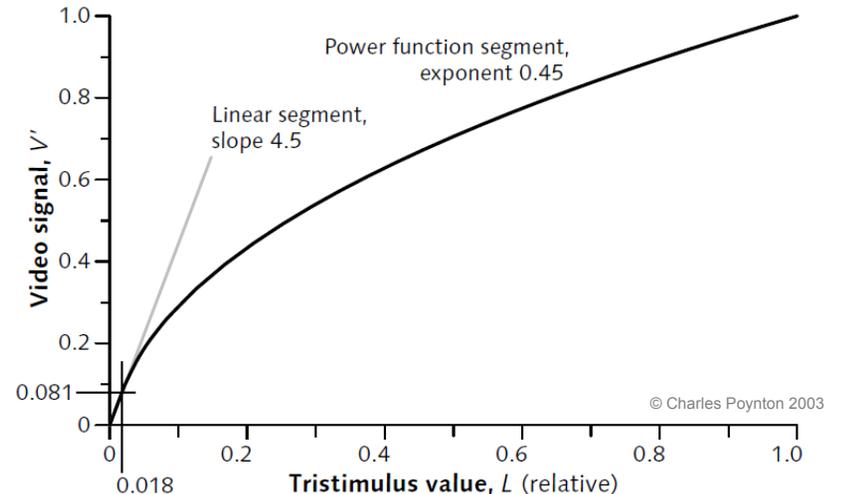
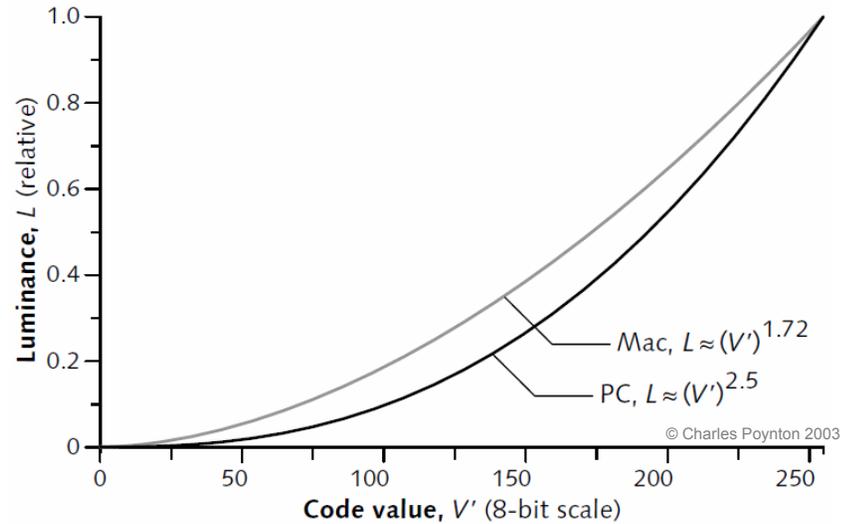
Artefacts: saturation CCD et traînage



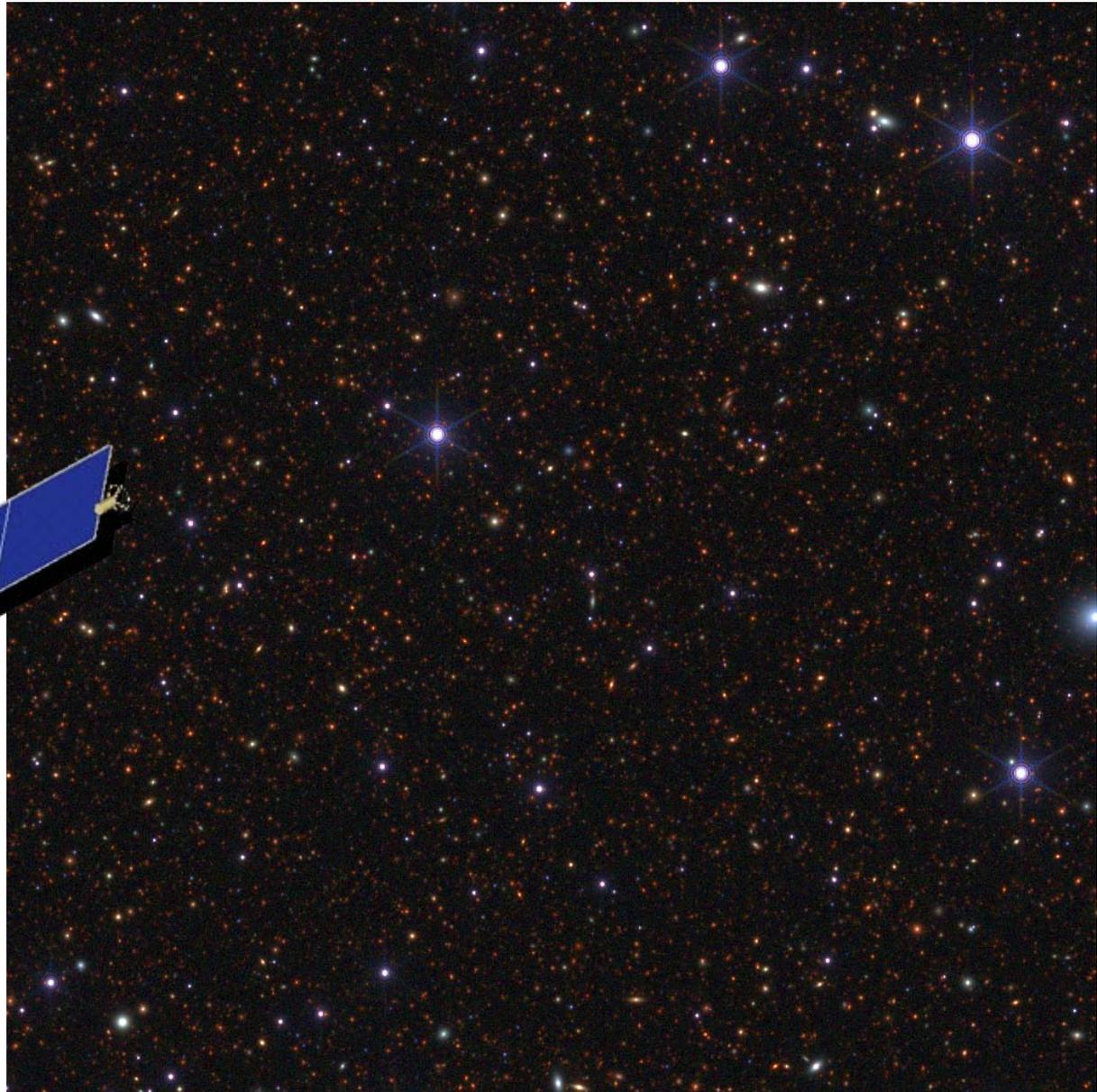
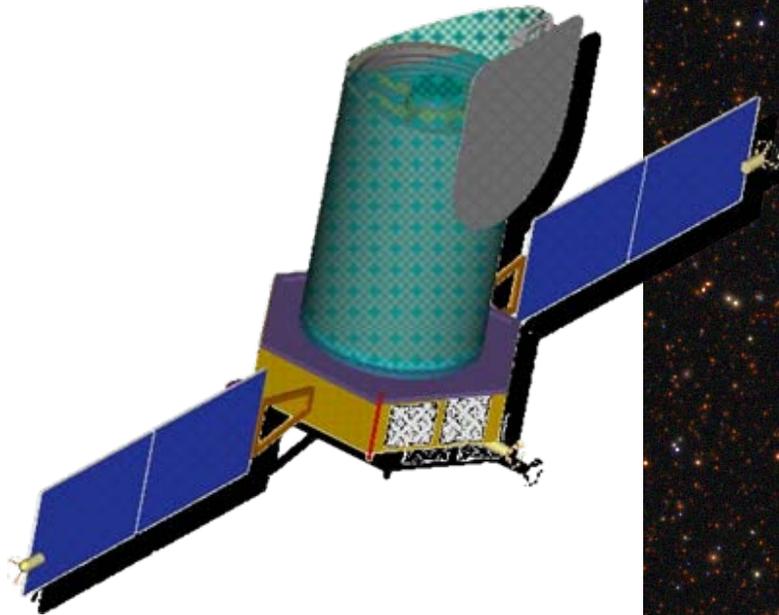
Visualisation réaliste

- Bien que les formats d'image 8 bits par composante (R, V ou B) des standards populaires JPEG, PNG ou TIFF n'offrent que 256 niveaux de gris, la dynamique en flux qu'ils offrent excèdent celles de la plupart des images astronomiques!

- Les valeurs de pixel V ne sont pas stockées avec une échelle linéaire en intensité lumineuse.
- Correction gamma effectuée dans les moniteurs $L = V^\gamma$, avec $\gamma = 1.7-2.5$

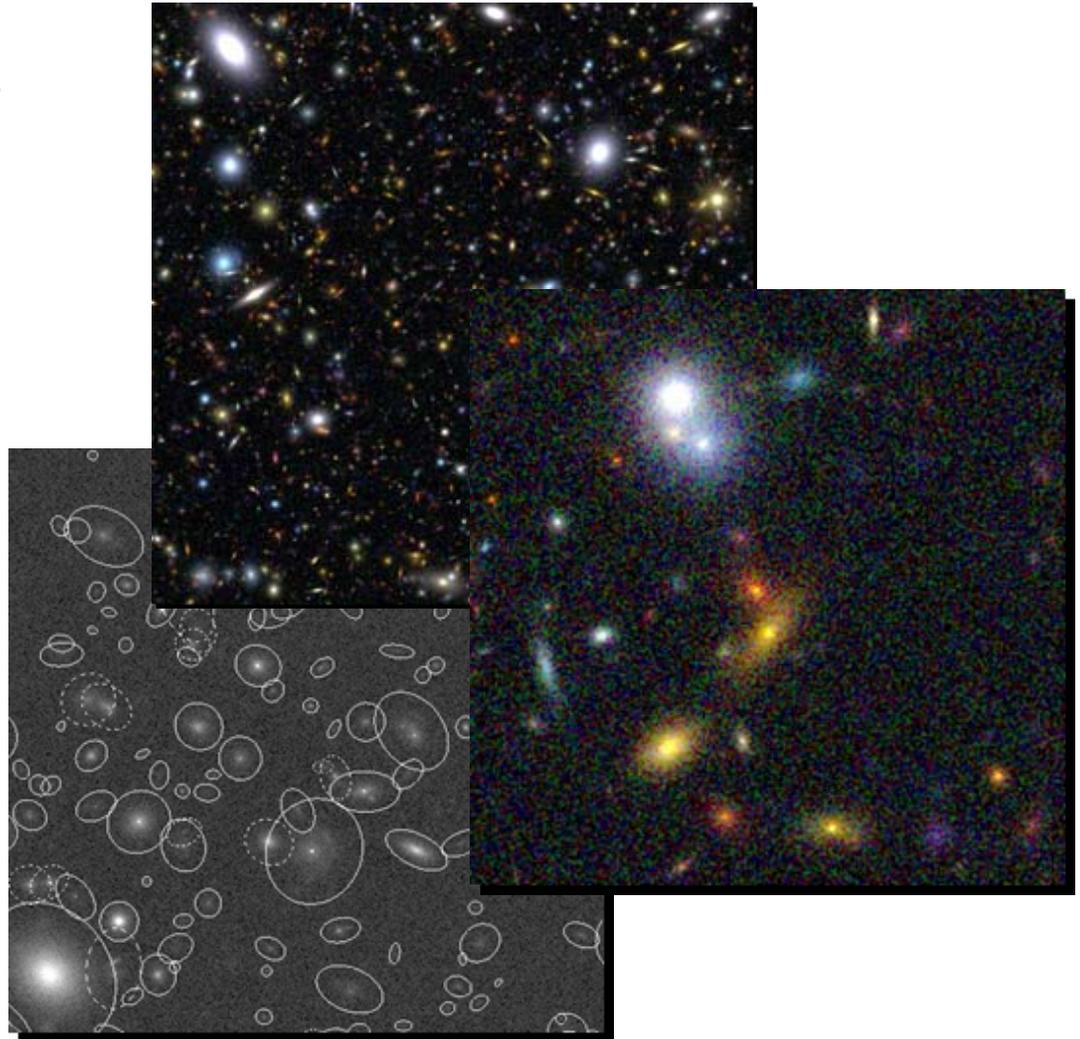


Exemple: PrimE
(proche IR)



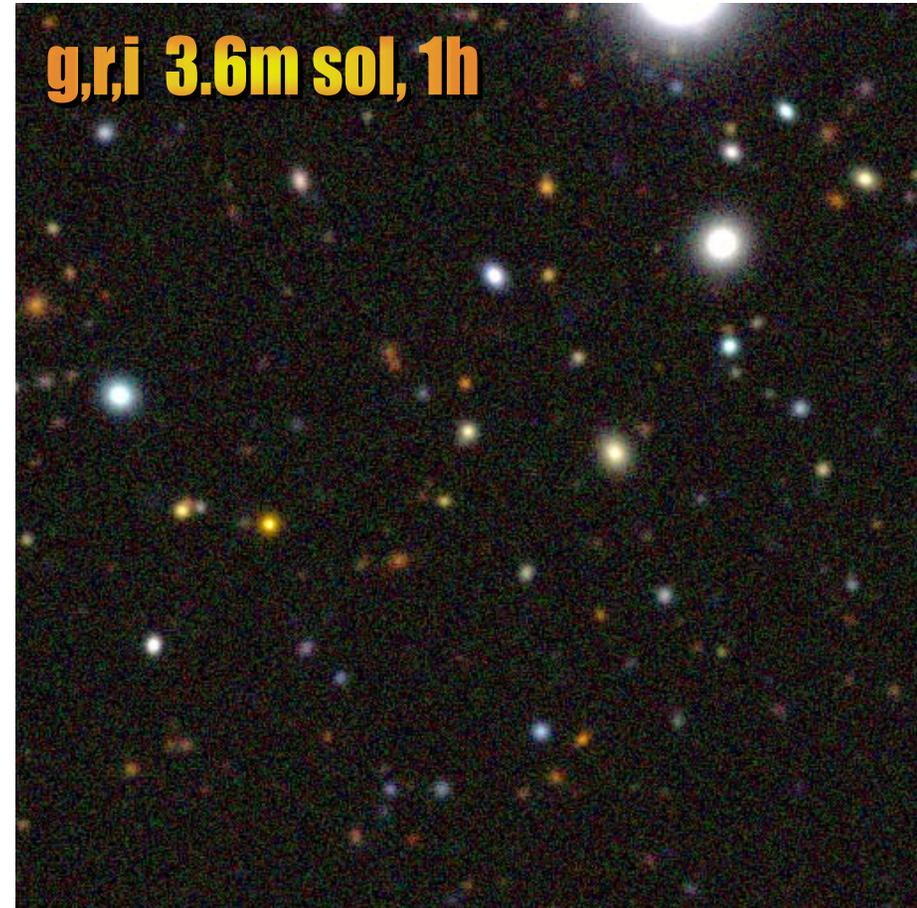
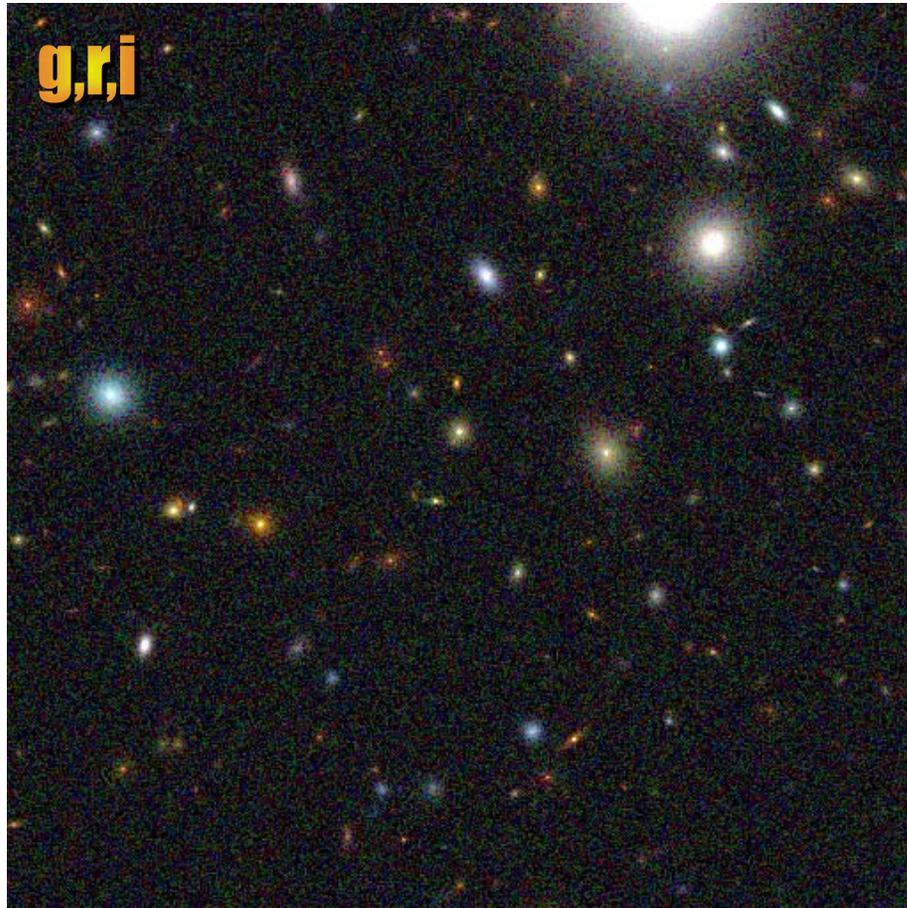
Exemple: DUnE

- Quelques chiffres (obsolète):
 - Limites de complétude stellaire mesurées (50%):
 - $g = 27.8$
 - $r = 27.4$
 - $I = 27.1$
 - Précision astrométrique (RMS, bande i):
 - 0.4 mas pour $i < 20$
 - 2 mas pour $i < 24$
 - 15 mas pour $i < 27$
 - Limites de complétude mesurées pour les galaxies (50%, pas d'évolution en luminosité, mais pas d'absorption intergalactique non-plus):
 - $g = 25.6$
 - $r = 25.2$
 - $I = 25.0$

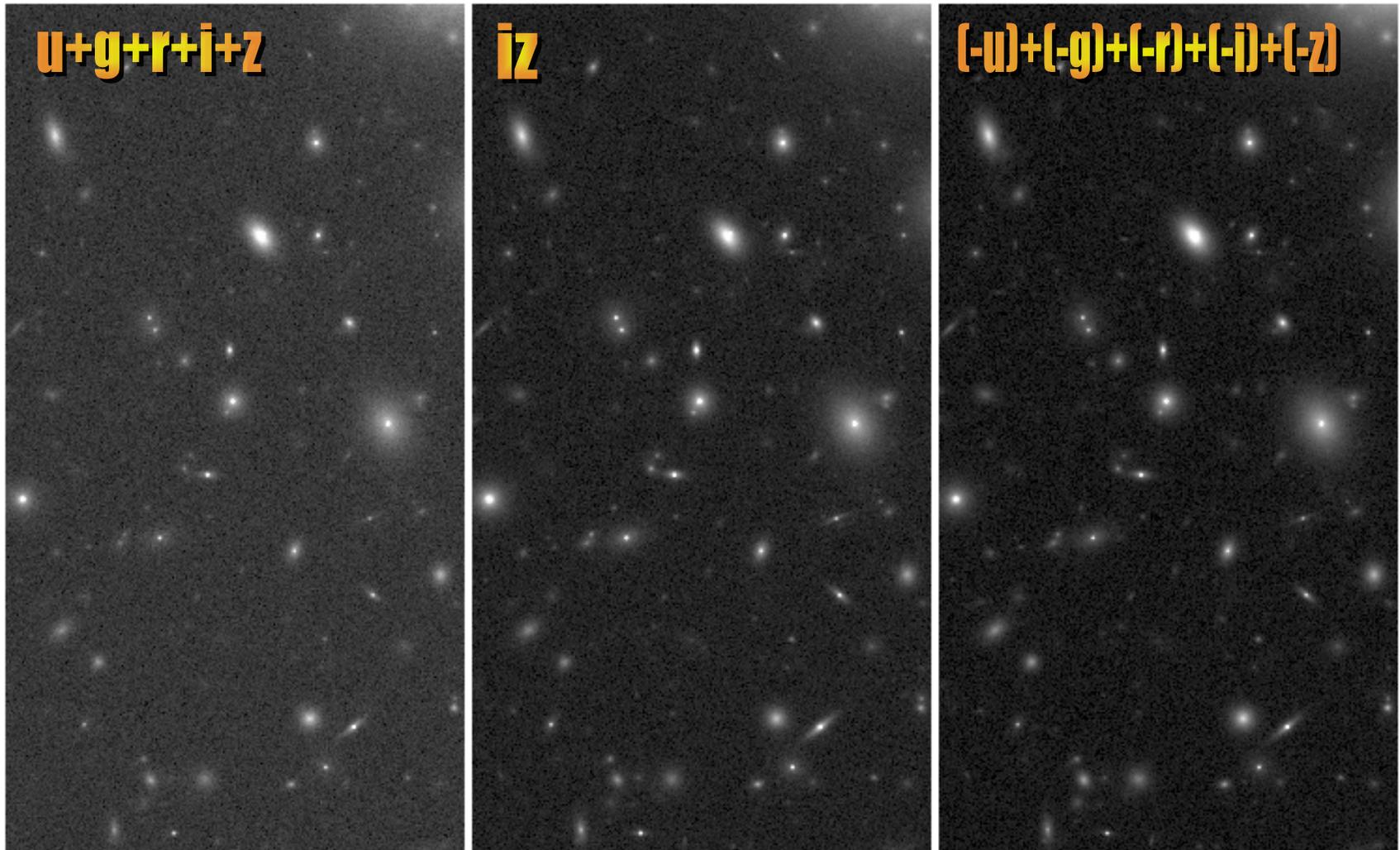




Comparaison sol-espace



Systemes de filtres et analyses multi-canaux





Développements à venir

- Stuff
 - Absorption intergalactique
 - Évolution spectro-photométrique?
 - Intégration dans SkyMaker?
- SkyMaker
 - PSF
 - Variabilité
 - Caractéristiques morphologiques
 - Barres et Bras spiraux
 - Bandes de poussière
 - Asymétries
 - Flocculence





Stuff, SkyMaker et STIFF sont disponibles sur

terapix.iap.fr

