



# Décomposition en imagerie astronomique multispectrale

Vincent Mazet  
([vincent.mazet@unistra.fr](mailto:vincent.mazet@unistra.fr))  
séminaire MIPS – 9 avril 2015



### Informatique

IGG, R, ICPS, BFO, MIV

### Imagerie, robotique, télédétection & santé

MIV, AVR, TRIO, IMIS

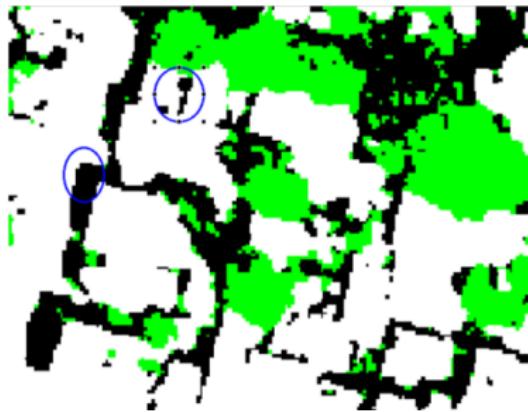
### Électronique du solide, systèmes & photonique

MaCEPV, SMH, IPP

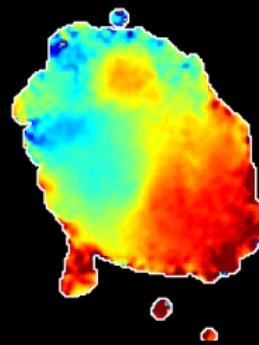
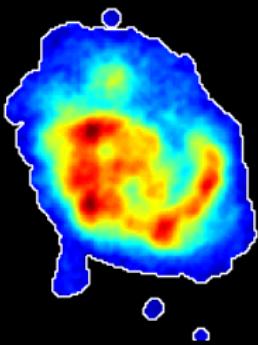
### Mécanique

MMB, MécaFlu, GCE

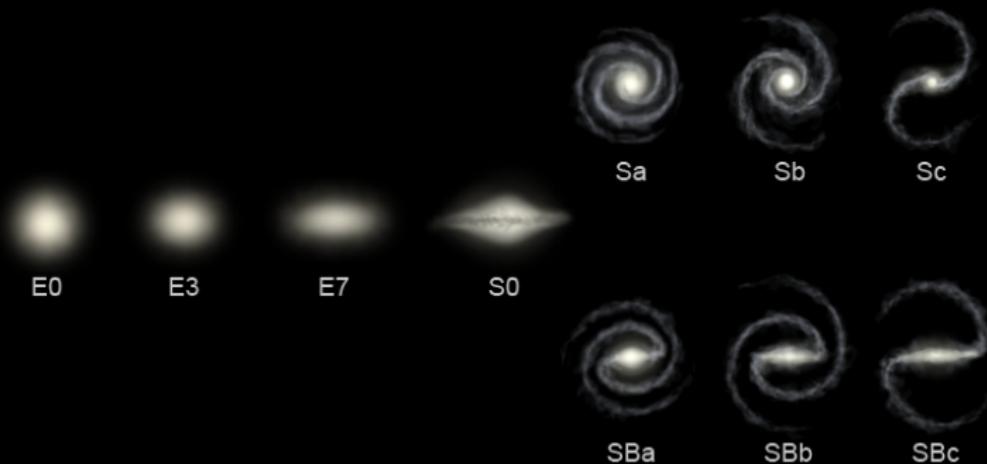
# Télédétection



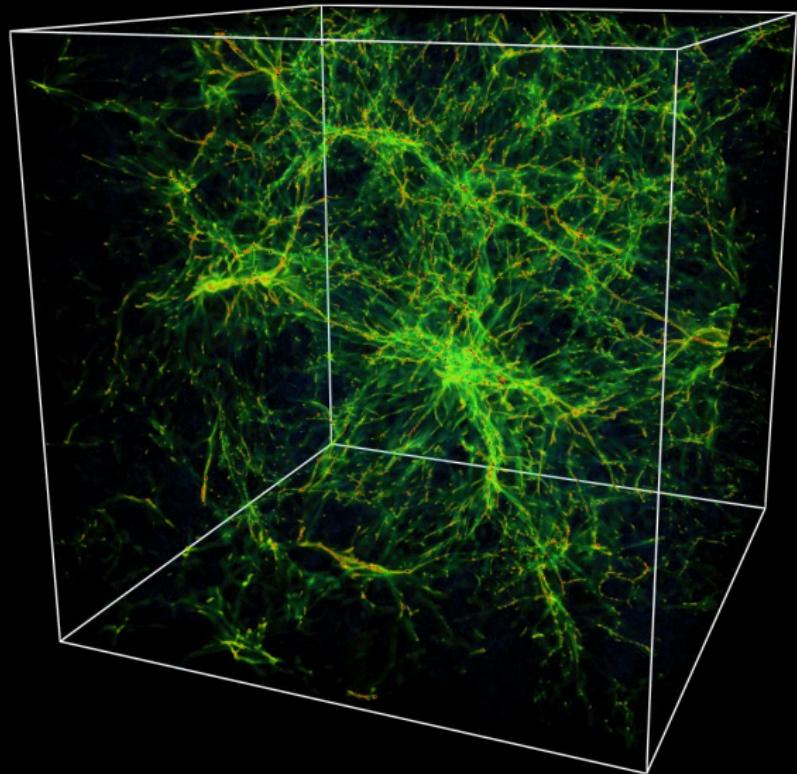
# Cinématique des galaxies



# Classification des galaxies

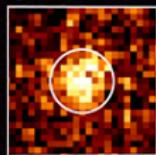


# Détection de raies Lyman $\alpha$

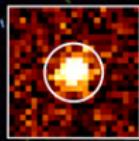








MUSE



MUSE

# Spécificités de l'imagerie astronomique

## Spécificités de l'imagerie astronomique

- Observer longtemps = observer loin = observer l'ancien

## Spécificités de l'imagerie astronomique

- Observer longtemps = observer loin = observer l'ancien
- Une image = plusieurs observations

## Spécificités de l'imagerie astronomique

- Observer longtemps = observer loin = observer l'ancien
- Une image = plusieurs observations
- Pas de vérité terrain

## Spécificités de l'imagerie astronomique

- Observer longtemps = observer loin = observer l'ancien
- Une image = plusieurs observations
- Pas de vérité terrain
- Bruit corrélé non stationnaire

## Spécificités de l'imagerie astronomique

- Observer longtemps = observer loin = observer l'ancien
- Une image = plusieurs observations
- Pas de vérité terrain
- Bruit corrélé non stationnaire
- « Convolution » non invariante

## Spécificités de l'imagerie astronomique

- Observer longtemps = observer loin = observer l'ancien
- Une image = plusieurs observations
- Pas de vérité terrain
- Bruit corrélé non stationnaire
- « Convolution » non invariante
- Grosses masses de données (MUSE : 1 Go, SKA : 80 To)

# Spécificités de l'imagerie astronomique

- Observer longtemps = observer loin = observer l'ancien
- Une image = plusieurs observations
- Pas de vérité terrain
- Bruit corrélé non stationnaire
- « Convolution » non invariante
- Grosses masses de données (MUSE : 1 Go, SKA : 80 To)
- Images multispectrales

## Quelques grandes questions de l'astronomie...

- Comment les galaxies se sont-elles assemblées ?
- Comment ont-elles chauffées ?
- Comment se sont-elles mis en mouvement ?

## Quelques grandes questions de l'astronomie...

- Comment les galaxies se sont-elles assemblées ?
- Comment ont-elles chauffées ?
- Comment se sont-elles mis en mouvement ?
  - 1 Cinématique des galaxies
  - 2 Classification des galaxies

# Quelques grandes questions de l'astronomie...

- Comment les galaxies se sont-elles assemblées ?
- Comment ont-elles chauffées ?
- Comment se sont-elles mis en mouvement ?

1 Cinématique des galaxies

2 Classification des galaxies

- Décomposition de signaux (1D, 2D, ...) en motifs (1D, 2D, ...)
- Problèmes inverses
- Formulation bayésienne
- Optimisation par méthodes MCMC

# Cinématique des galaxies

avec S. Faisan, C. Soussen, E.-H. Djermoune

## Cinématique des galaxies

galaxie = structures de gaz qui...

- émettent de la lumière (gaz « chaud »)
- sont en mouvement rapide ( $\approx 1000$  km/s)

## Cinématique des galaxies

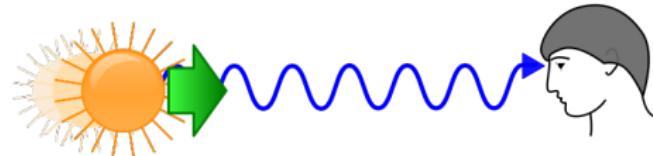
galaxie = structures de gaz qui...

- émettent de la lumière (gaz « chaud »)  
⇒ présence de raies dans le spectre de la galaxie
- sont en mouvement rapide ( $\approx 1000$  km/s)

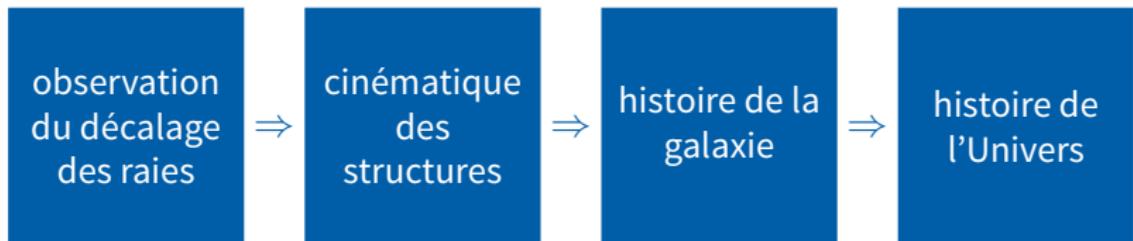
# Cinématique des galaxies

galaxie = structures de gaz qui...

- émettent de la lumière (gaz « chaud »)  
⇒ présence de raies dans le spectre de la galaxie
- sont en mouvement rapide ( $\approx 1000$  km/s)  
⇒ effet Doppler  
⇒ décalage vers le rouge des raies d'émission (redshift)



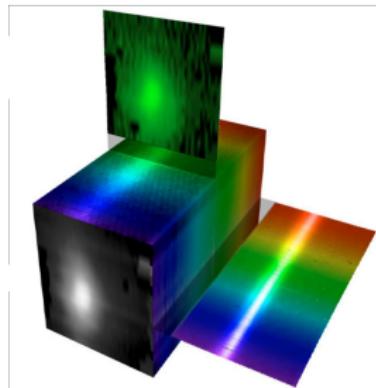
# Cinématique des galaxies



# Observation du redshift

- Pour observer le redshift, il faut un spectre
- Pour mesurer ce redshift à travers la galaxie, il faut une image
  - ⇒ image multispectrale

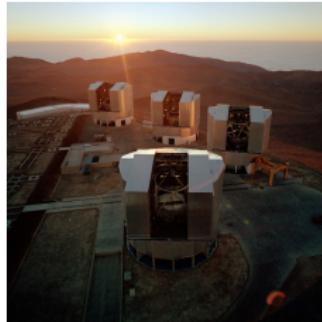
Chaque pixel est un spectre de raies



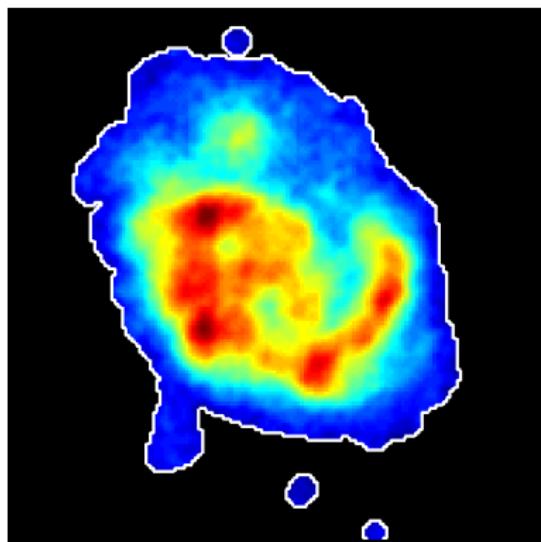
# Observation du redshift

- Pour observer le redshift, il faut un spectre
- Pour mesurer ce redshift à travers la galaxie, il faut une image
  - ⇒ image multispectrale

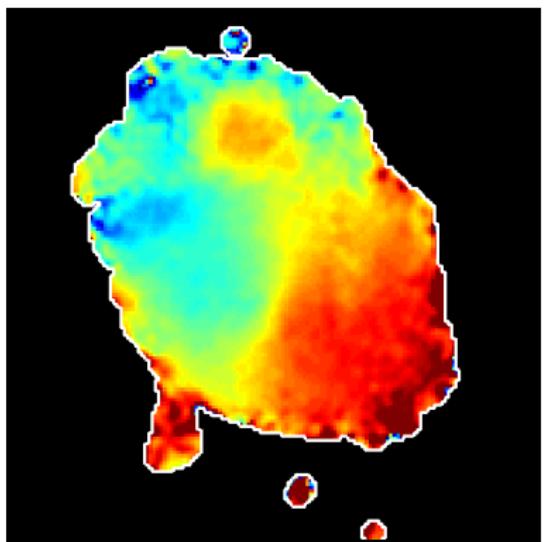
Observations à l'aide de télescopes optiques ou radio



# Analyse de la cinématique en astronomie

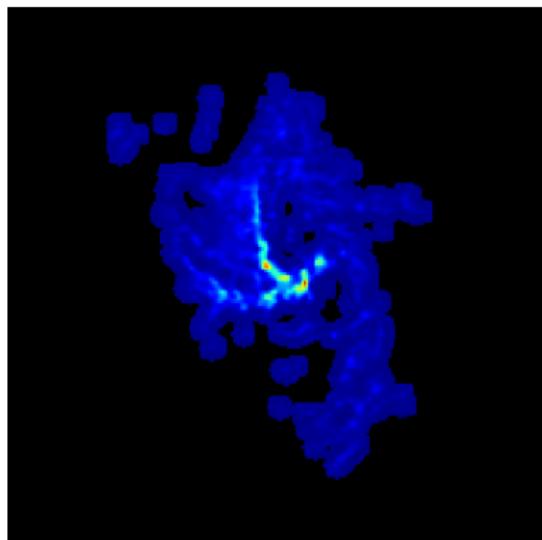


moment 0

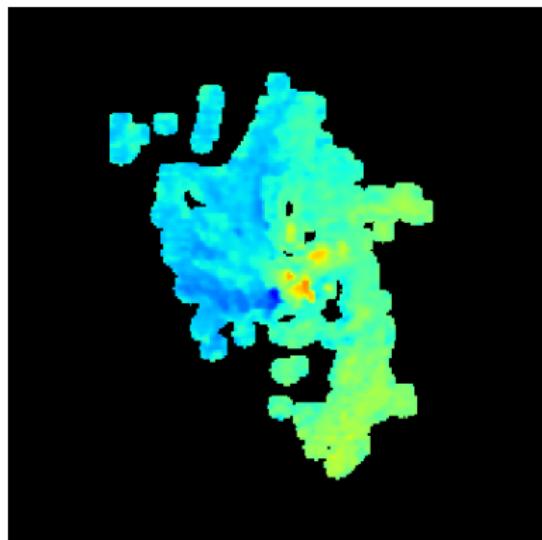


moment 1

# Analyse de la cinématique en astronomie



moment 0



moment 1

## Objectif

On considère que les données sont un ensemble de spectres répartis dans un espace 2D.

Objectif : *détecter et suivre les raies à travers l'image multispectrale.*

## Objectif

On considère que les données sont un ensemble de spectres répartis dans un espace 2D.

Objectif : *détecter et suivre les raies à travers l'image multispectrale.*

⇒ Décomposition séquentielle  
puis appariement des raies détectées

# Objectif

On considère que les données sont un ensemble de spectres répartis dans un espace 2D.

Objectif : *détecter et suivre les raies à travers l'image multispectrale.*

~~⇒ Décomposition séquentielle  
puis appariement des raies détectées~~

⇒ Décomposition jointe

## Modèle bayésien

$$\forall s, \quad \mathbf{y}_s = \sum_{k=1}^K g(c_{s,k}, a_{s,k}, w_{s,k}) + \mathbf{b}_s$$

- $K$  inconnu
- $p(\mathbf{y}|\mathbf{c}, \mathbf{a}, \mathbf{w}) \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma)$
- Évolution douce des positions
- Évolution douce des amplitudes
- Évolution douce des largeurs

# Modèle bayésien

$$\forall s, \quad \mathbf{y}_s = \sum_{k=1}^K \mathbf{g}(c_{s,k}, a_{s,k}, w_{s,k}) + \mathbf{b}_s$$

- $K$  inconnu
- $p(\mathbf{y}|\mathbf{c}, \mathbf{a}, \mathbf{w}) \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma)$
- Évolution douce des positions :  $c_{s,k} \sim \mathcal{N}\left(\frac{c_{s,k-1} + c_{s,k+1}}{2}, r_c\right)$
- Évolution douce des amplitudes :  $a_{s,k} \sim \mathcal{N}\left(\frac{a_{s,k-1} + a_{s,k+1}}{2}, r_a\right)$
- Évolution douce des largeurs :  $w_{s,k} \sim \mathcal{N}\left(\frac{w_{s,k-1} + w_{s,k+1}}{2}, r_w\right)$

## Algorithme RJMCMC

- Nombre de variables important et inconnu
- Loi a posteriori très irrégulière

## Algorithme RJMCMC

- Nombre de variables important et inconnu
  - Loi a posteriori très irrégulière
- reversible jump Monte Carlo Markov chain (RJMCMC)

Génère des variables aléatoires  $\theta$  suivant une loi  $p(\theta|y)$  de dimension inconnue.

## Algorithme RJMCMC

- Nombre de variables important et inconnu
  - Loi a posteriori très irrégulière
- reversible jump Monte Carlo Markov chain (RJMCMC)

Génère des variables aléatoires  $\theta$  suivant une loi  $p(\theta|y)$  de dimension inconnue.

Initialiser  $\theta^{(0)}$

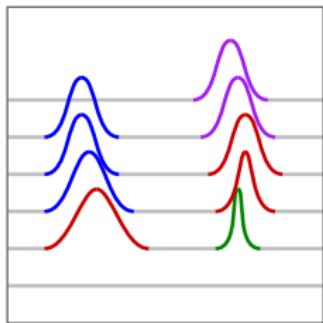
Pour  $i = 1 \rightarrow I$ :

choisir un mouvement

proposer  $\tilde{\theta}$  à partir de  $\theta^{(i-1)}$

accepter ( $\theta^{(i)} \leftarrow \tilde{\theta}$ ) ou refuser ( $\theta^{(i+1)} \leftarrow \theta^{(i-1)}$ )

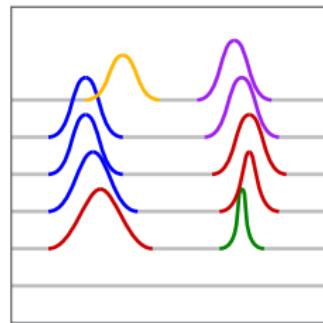
# Mouvements



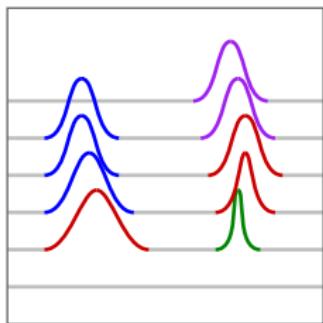
Naissance



Mort



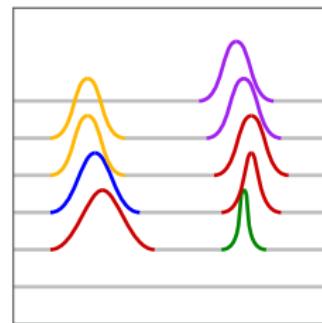
# Mouvements



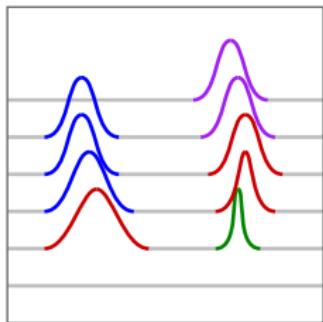
Scission



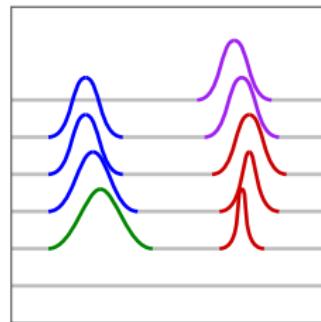
Fusion



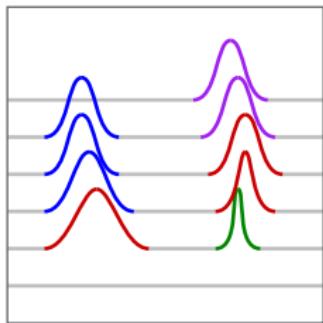
# Mouvements



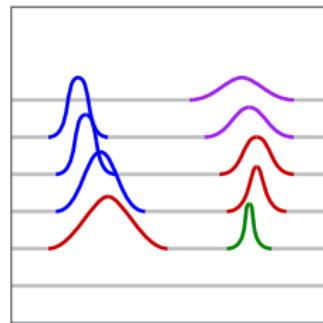
Réaffectation des  
raies  
 $\longleftrightarrow$



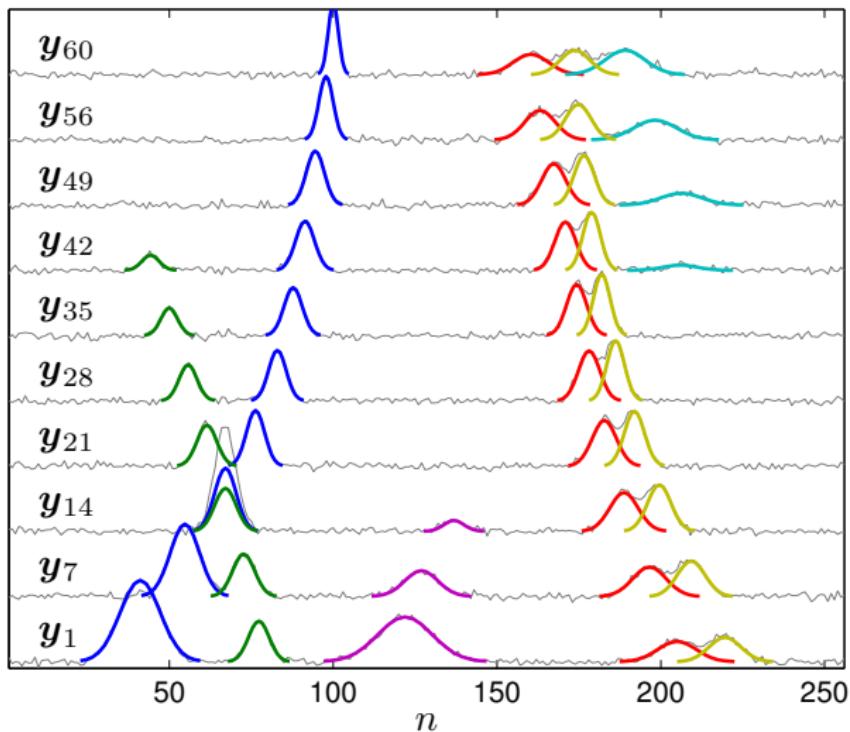
# Mouvements



Mise à jour des  
paramètres des  
raies

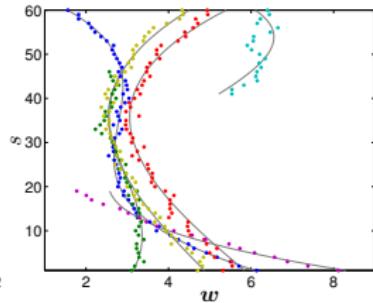
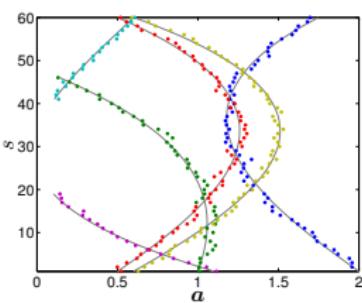
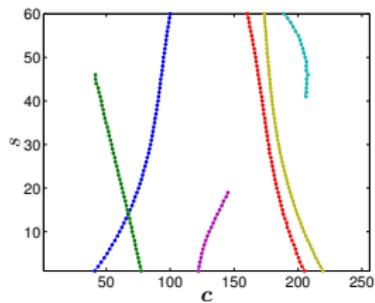


# Données simulées 1D



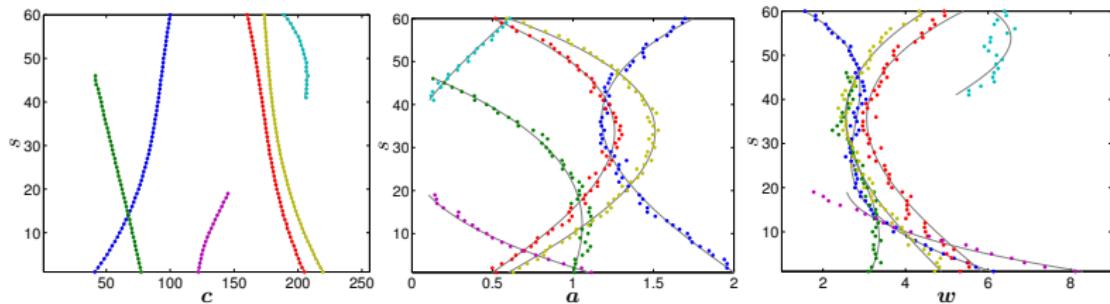
# Données simulées 1D

Approche proposée

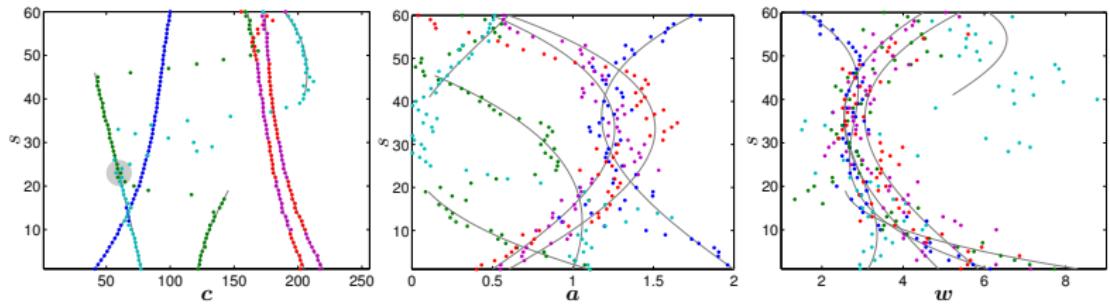


# Données simulées 1D

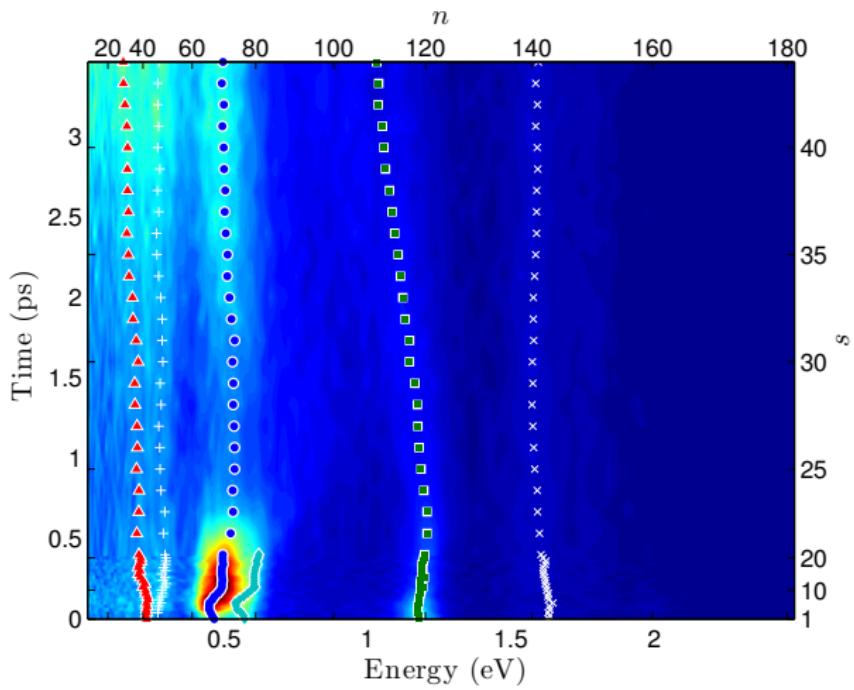
Approche proposée



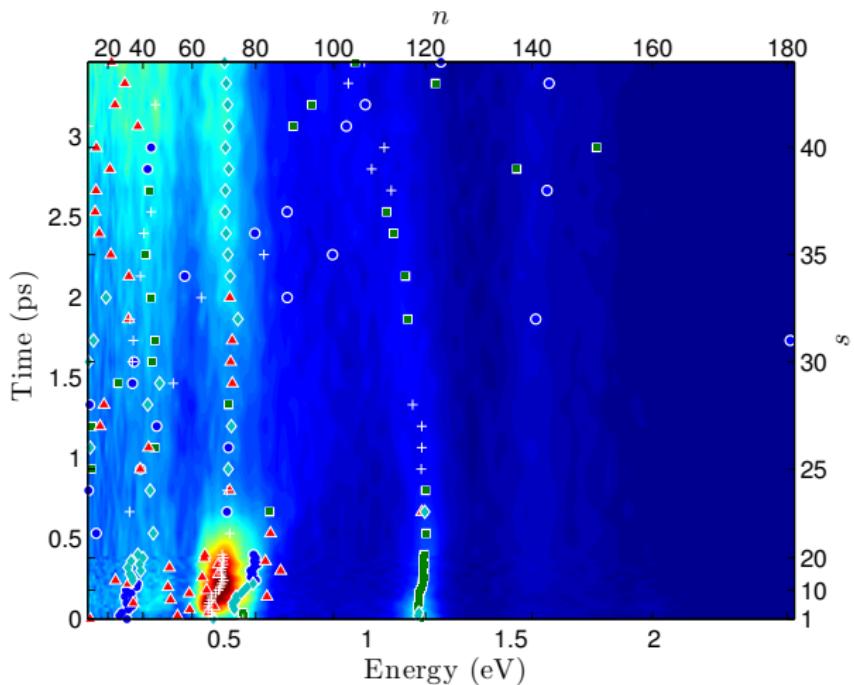
Approche supervisée et à dimension constante



# Données réelles 1D



# Données réelles 1D



## Données réelles 2D

Non applicable

Mauvais brassage  $\Rightarrow$  mauvaise convergence  $\Rightarrow$  méthode très lente :

- bloque dans des maxima locaux
- dépendant de l'initialisation
- méthode trop ambitieuse

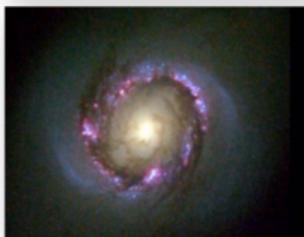
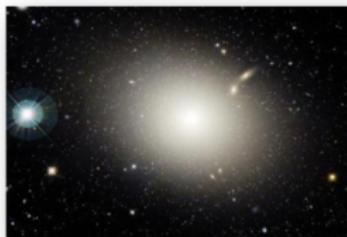
# Conclusion

- Décomposition de spectres en raies d'émission
- Décomposition jointe
- RJMCMC pas adapté pour l'estimation du nombre de structures *et* de raies
- ⇒ Utilisation de méthodes d'approximation parcimonieuse

# Classification spectro- morphologique des galaxies

thèse de B. Perret

## Morphologies variées



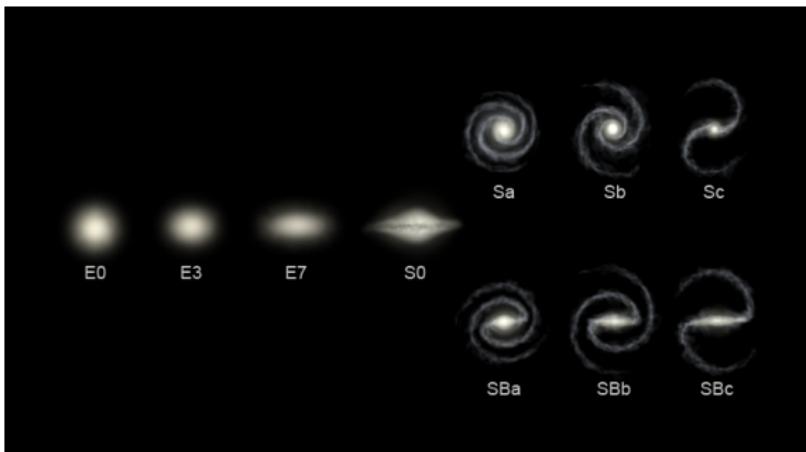
# Comment observer l'évolution cosmologique ?

- Échelle de temps  $\gg$  échelle humaine
- Chaque galaxie apparaît statique
- Chaque galaxie a un unique angle de vue

# Comment observer l'évolution cosmologique ?

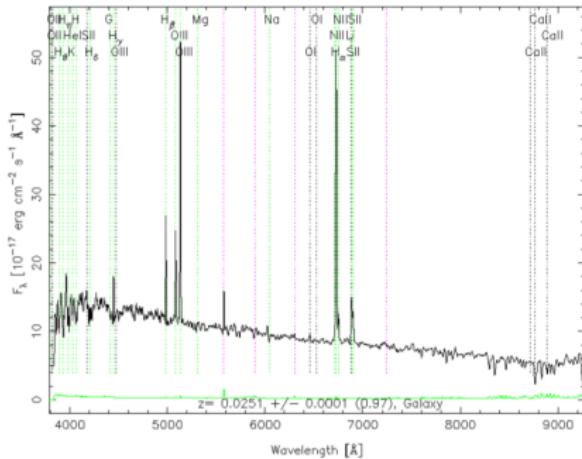
- Échelle de temps  $\ggg$  échelle humaine
  - Chaque galaxie apparaît statique
  - Chaque galaxie a un unique angle de vue
- ⇒ Classification → comprendre les liens entre les classes.

## État de l'art : classification morphologique



- 1<sup>re</sup> classification (Hubble, 1936)
- Reste le schéma de référence malgré quelques évolutions
- Considère uniquement la lumière visible !

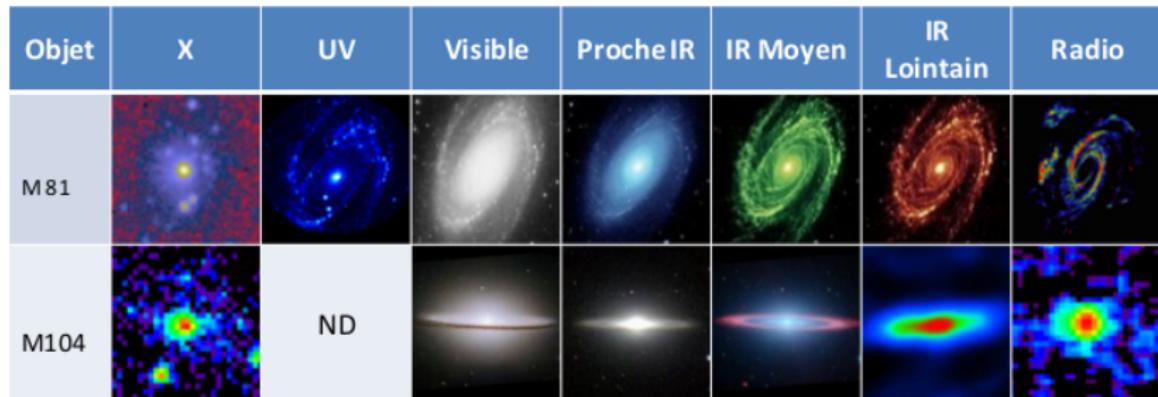
# État de l'art : classification spectrale



- Vue condensée
- Traitement automatisé plus simple
- Permet de distinguer les deux grands types (E et S)
- Ne tient pas compte de la morphologie de la galaxie...

## Vers une classification spectro-morphologique

Nombreuses images multispectrales disponibles  
⇒ combiner classification morphologique et information spectrale



⇒ Décomposition en structures physiques  
→ classifier les paramètres  
→ comprendre les liens entre les classes.

## Modèle paramétrique

$$Y(x, y) = H(x, y) * \sum_k I_k(x, y) + e(x, y)$$

# Modèle paramétrique

$$Y(x, y) = H(x, y) * \sum_k I_k(x, y) + e(x, y)$$

Structures élémentaires :

- bulbe
- disque
- barre stellaire
- bras spiraux
- anneau
- halo
- barre de poussière

→ couvre 97 % des galaxies.

## Modèle paramétrique

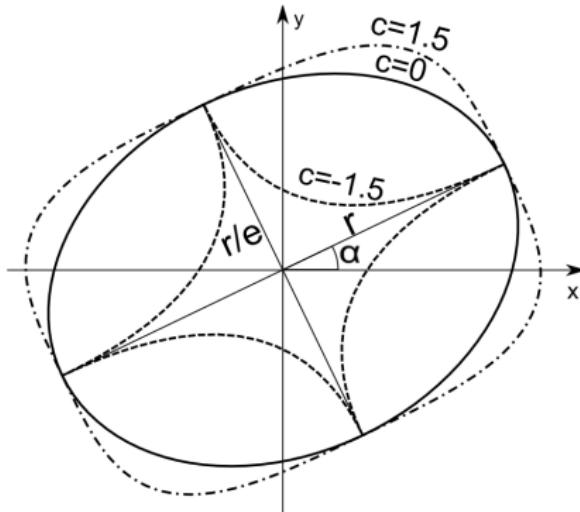
$$Y(x, y) = H(x, y) * \sum_k I_k(x, y) + e(x, y)$$

Chaque structure est caractérisée par :

- un descripteur de forme :  
aspect des isophotes, indépendant de la longueur d'onde ;
- un descripteur de brillance :  
variation de la brillance des isophotes, dépend de la longueur d'onde.

# Descripteur de forme

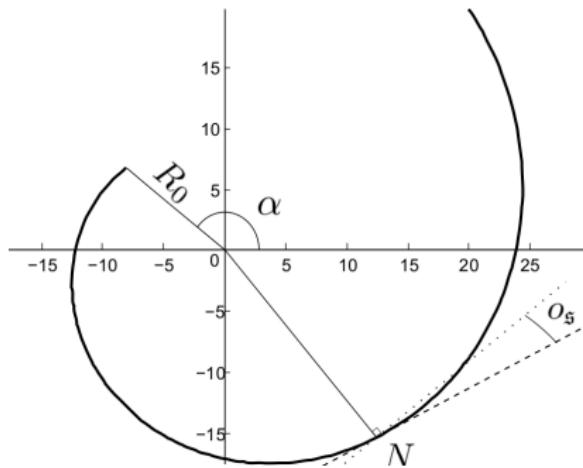
Ellipse généralisée pour le disque, le bulbe, la barre, ...



$$r(x, y) = \left( |(x - c_x) \cos \alpha - (y - c_y) \sin \alpha|^{c+2} + |e((x - c_x) \sin \alpha + (y - c_y) \cos \alpha)|^{c+2} \right)^{\frac{1}{c+2}}$$

# Descripteur de forme

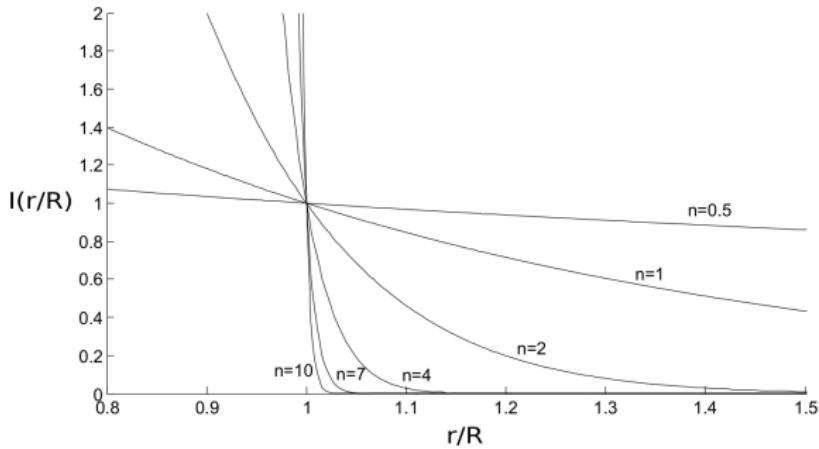
Spirale pour les bras spiraux



$$r = R_0 \exp(|o_S|\theta) \quad \text{et} \quad \rho = o_S\theta + \alpha + k\pi \quad (\theta \in \mathbb{R}^+, k \in \{0, 1\})$$

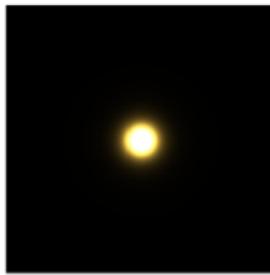
# Descripteur de brillance

Fonction de Sérsic



$$I(r) = I_0 \exp \left[ -k_n \left( \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n} - 1 \right) \right]$$

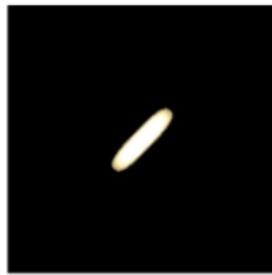
## Exemple de structures



« bulbe »



« disque »



« barre stellaire »



« anneau »

## Exemples de galaxies synthétiques



Galaxie elliptique  
géante cD



Galaxie spirale  
barrée avec anneau



Galaxie spirale  
vue par la tranche

## Estimation des paramètres

- Approche bayésienne :  $\hat{\theta} \sim p(\theta|y)$
- Estimation du MAP :  $\hat{\theta}^{\text{MAP}}$
- Optimisation d'une loi a posteriori complexe et de grande dimension  $\Rightarrow$  méthodes de Monte Carlo par chaînes de Markov (MCMC) :
  - échantillonneur de Gibbs
  - algorithme de Metropolis–Hastings

## Échantillonneur de Gibbs

Pour estimer  $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$  à partir de  $p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{y})$ , l'échantillonneur de Gibbs génère les  $\theta_n$  suivant les a posteriori conditionnels :

Initialiser  $(\boldsymbol{\theta}_1^{(0)}, \boldsymbol{\theta}_2^{(0)}, \dots, \boldsymbol{\theta}_N^{(0)})$

Pour  $i = 1 \rightarrow I$ :

$$\theta_1^i \sim p(\theta_1 | \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta}_2^{i-1}, \dots, \boldsymbol{\theta}_N^{i-1})$$

$$\theta_2^i \sim p(\theta_2 | \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta}_1^i, \dots, \boldsymbol{\theta}_N^{i-1})$$

⋮

$$\theta_N^i \sim p(\theta_N | \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta}_1^i, \dots, \boldsymbol{\theta}_{N-1}^i)$$

# Algorithme de Metropolis–Hastings

Initialiser  $\theta^{(0)}$

Pour  $i = 1 \rightarrow I$ :

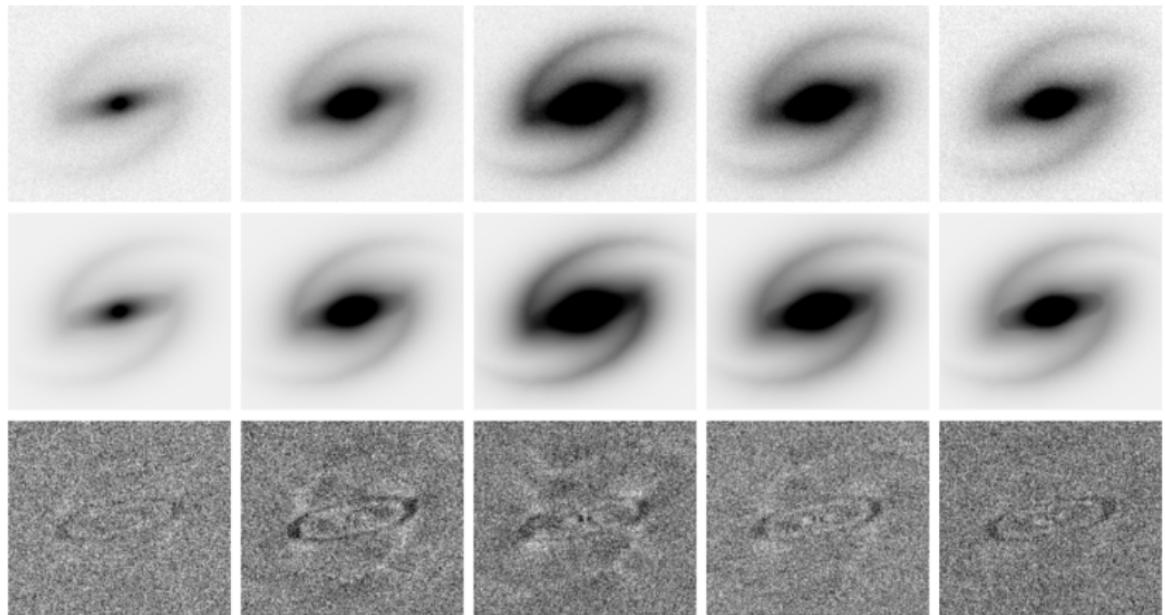
Générer  $\tilde{\theta} \sim q(\theta | \theta^{(i-1)})$

Calculer  $\alpha = \min \left\{ 1, \frac{p(\tilde{\theta} | \dots)}{p(\theta^{(i-1)} | \dots)} \frac{q(\theta^{(i-1)} | \tilde{\theta})}{q(\tilde{\theta} | \theta^{(i-1)})} \right\}$

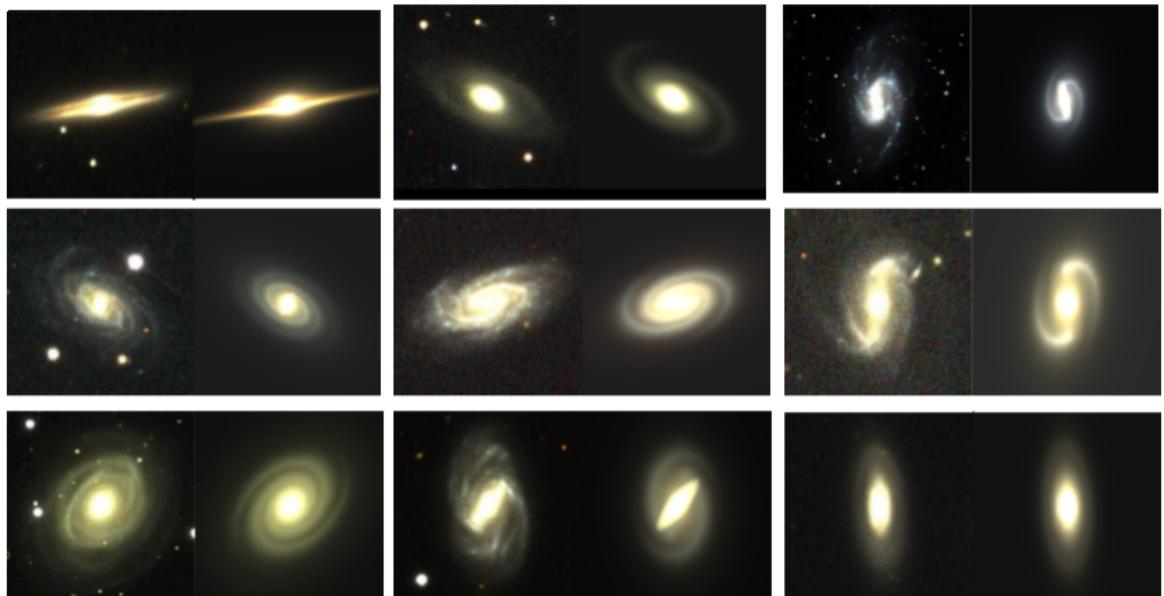
Accepter  $\tilde{\theta}$  avec la probabilité  $\alpha$ :

$$\theta^{(i)} = \begin{cases} \tilde{\theta} & \text{avec la probabilité } \alpha \text{ (acceptation)} \\ \theta^{(i-1)} & \text{sinon (rejet)} \end{cases}$$

## Résultats



# Résultats



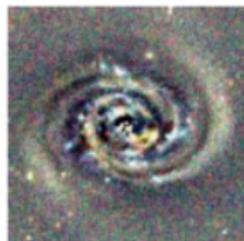
## Exemple détaillé : PGC 2182



Image



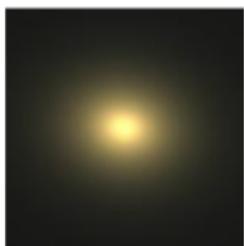
Simulation



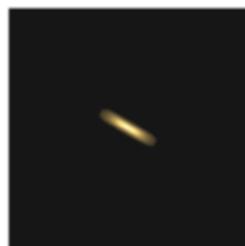
Résidu



Bulbe



Disque



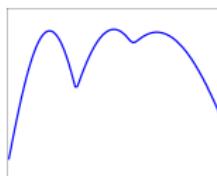
Barre stellaire



Bras spiraux

# Amélioration des performances

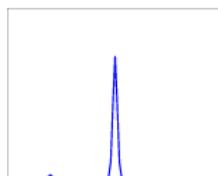
- Hiérarchie de modèle pour aider la convergence
- Recuit simulé :  
On remplace l'a posteriori  $p(\theta|y)$  par  $p(\theta|y)^{\frac{1}{T_i}}$



$$T_i = 10^2$$



$$T_i = 10^0$$



$$T_i = 10^{-1}$$

- Metropolis–Hastings à marche aléatoire adaptative :  
Adaptation du pas pour avoir un taux d'acceptation optimal

# Conclusion

- Décomposition d'images multispectrales de galaxies en structures physiques
- Morphologie mathématique (arbre de composantes connexes multispectral) :
  - masquage des sources parasites,
  - extraction des bras spiraux,
  - détection des régions HII,
  - etc.

# Conclusion

## Résumé

- décomposition d'images multispectrales
  - 1 séquence 2D de spectres 1D à décomposer en motifs 1D
  - 2 séquence 1D d'images 2D à décomposer en motifs 2D
- approche bayésienne
- MCMC
- nombre d'inconnu inconnu donc :
  - 1 RJMCMC
  - 2 plusieurs exécutions dans différentes dimensions

## Perspectives

- Méthode d'optimisation plus supervisée
- Monte Carlo hamiltonien, MALA, ...
- Méthodes d'approximation parcimonieuse

merci !

[miv.u-strasbg.fr/mazet](http://miv.u-strasbg.fr/mazet)