

# Évolution cosmologique des propriétés physiques des galaxies

**Fabrice Lamareille**

THÈSE

Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse/Tarbes  
Université Paul Sabatier



## Plan

- **Objectifs**
- **Données**
- **Méthodes et outils**
- **Analyse**
  - **Univers local**
  - **Univers distant**
- **Conclusions et perspectives**





**Objectifs**

Données

Méthodes  
Outils

Univers  
local

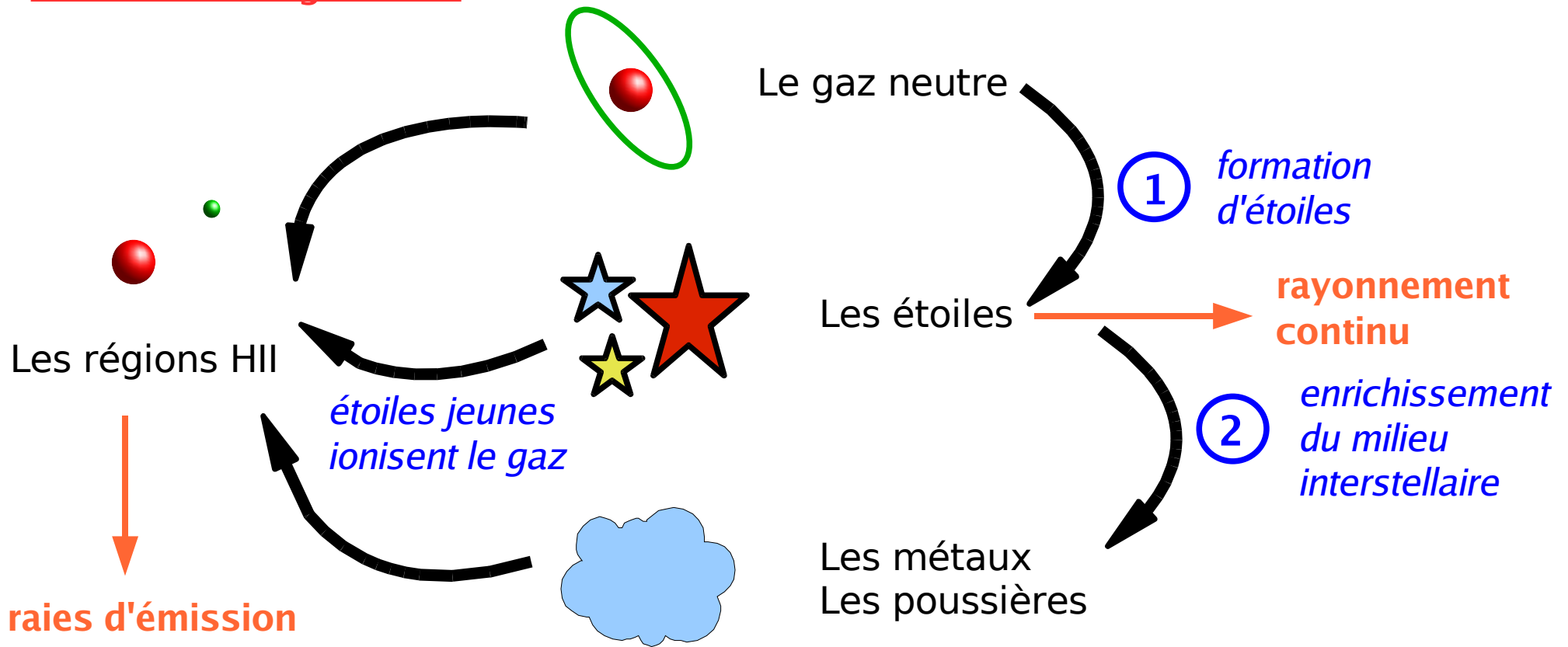
Univers  
distant

Conclusions  
Perspectives

# ***Objectifs***

# La formation et l'évolution des galaxies

## La vie d'une galaxie:

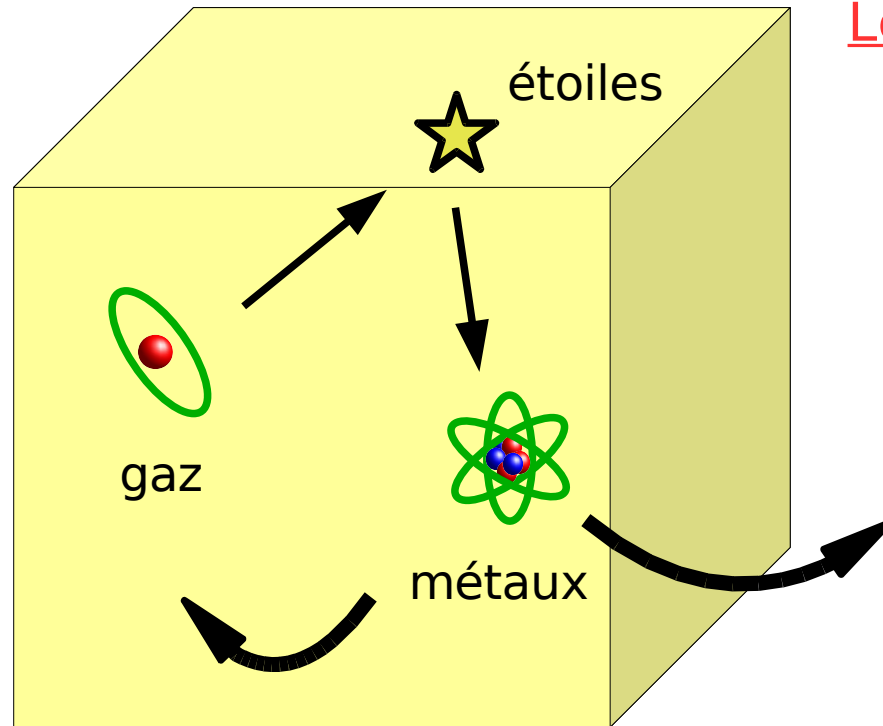


Les deux paramètres physiques principaux sont:

- 1) **La masse stellaire**
- 2) **La métallicité du gaz**

➔ **horloges cosmiques**

# La formation et l'évolution des galaxies



## Les modèles monolithiques

**La masse totale se conserve et prédétermine l'évolution**

**potentiel gravitationnel faible**

boîte ouverte

- Les métaux sont éjectés dans le milieu intergalactique
- on définit le taux de production effectif

**potentiel gravitationnel fort**

boîte fermée

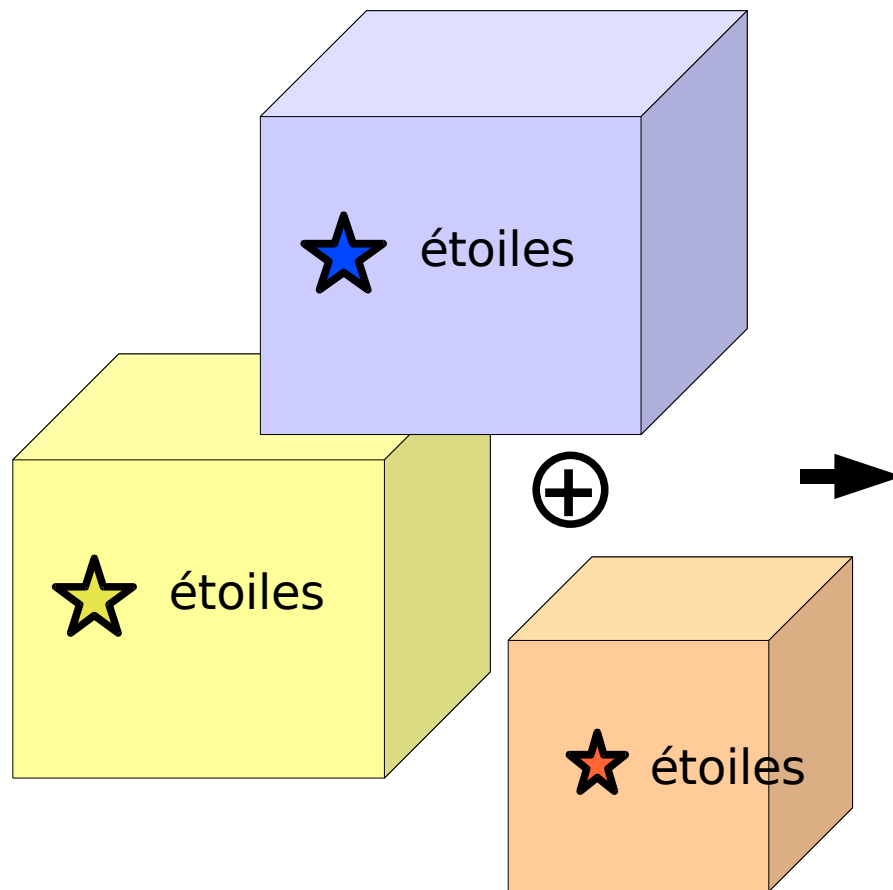
- Les métaux enrichissent le milieu interstellaire
- La métallicité augmente alors que la fraction de gaz diminue

$$Z(t) = y \cdot \ln \frac{1}{\mu(t)} \quad y : \text{taux de production total}$$

$$y_{eff} = \frac{Z}{\ln \frac{1}{\mu}}$$

# La formation et l'évolution des galaxies

## Le modèle hiérarchique



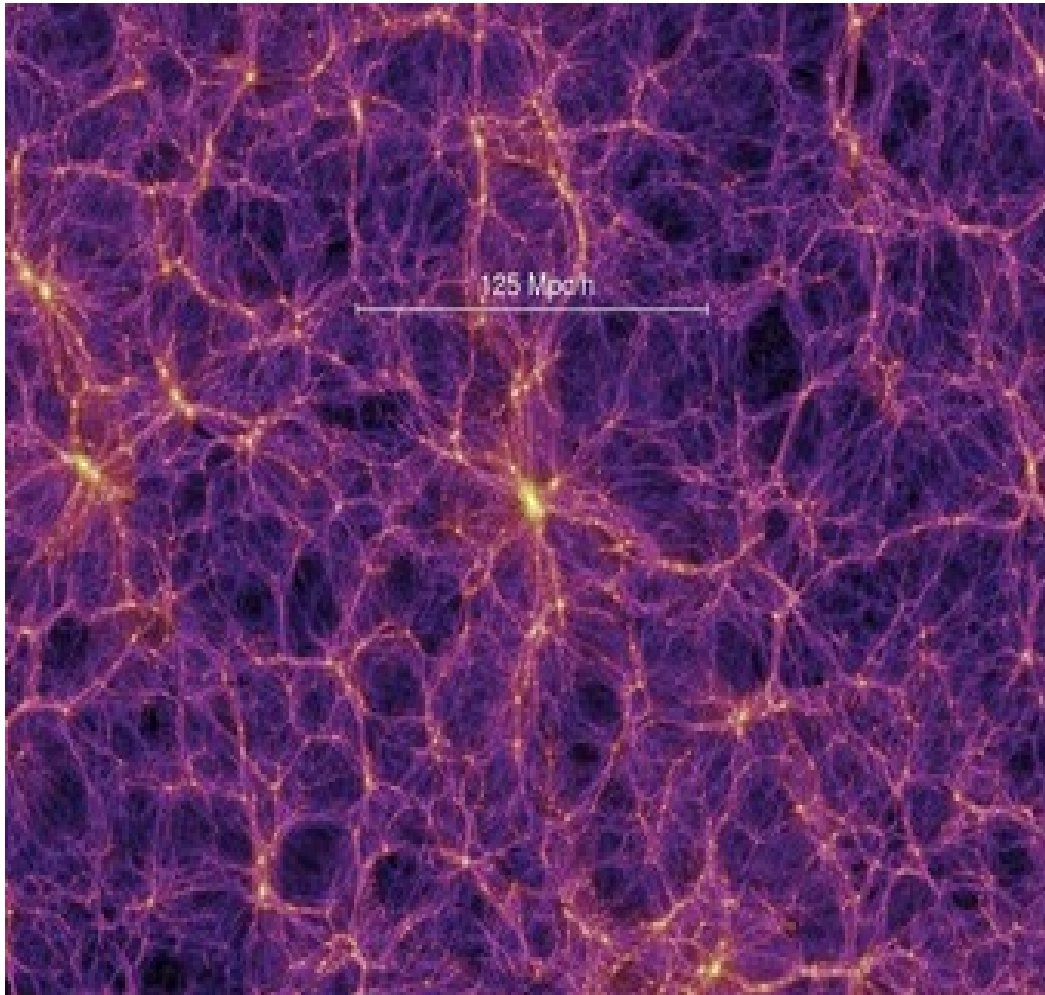
**La masse stellaire et la masse totale augmentent par fusions ou accrétions successives de galaxies**

Chaque galaxie est le fruit:

- **de sa propre histoire**
- **des histoires de ses progénitrices**

# La formation et l'évolution des galaxies

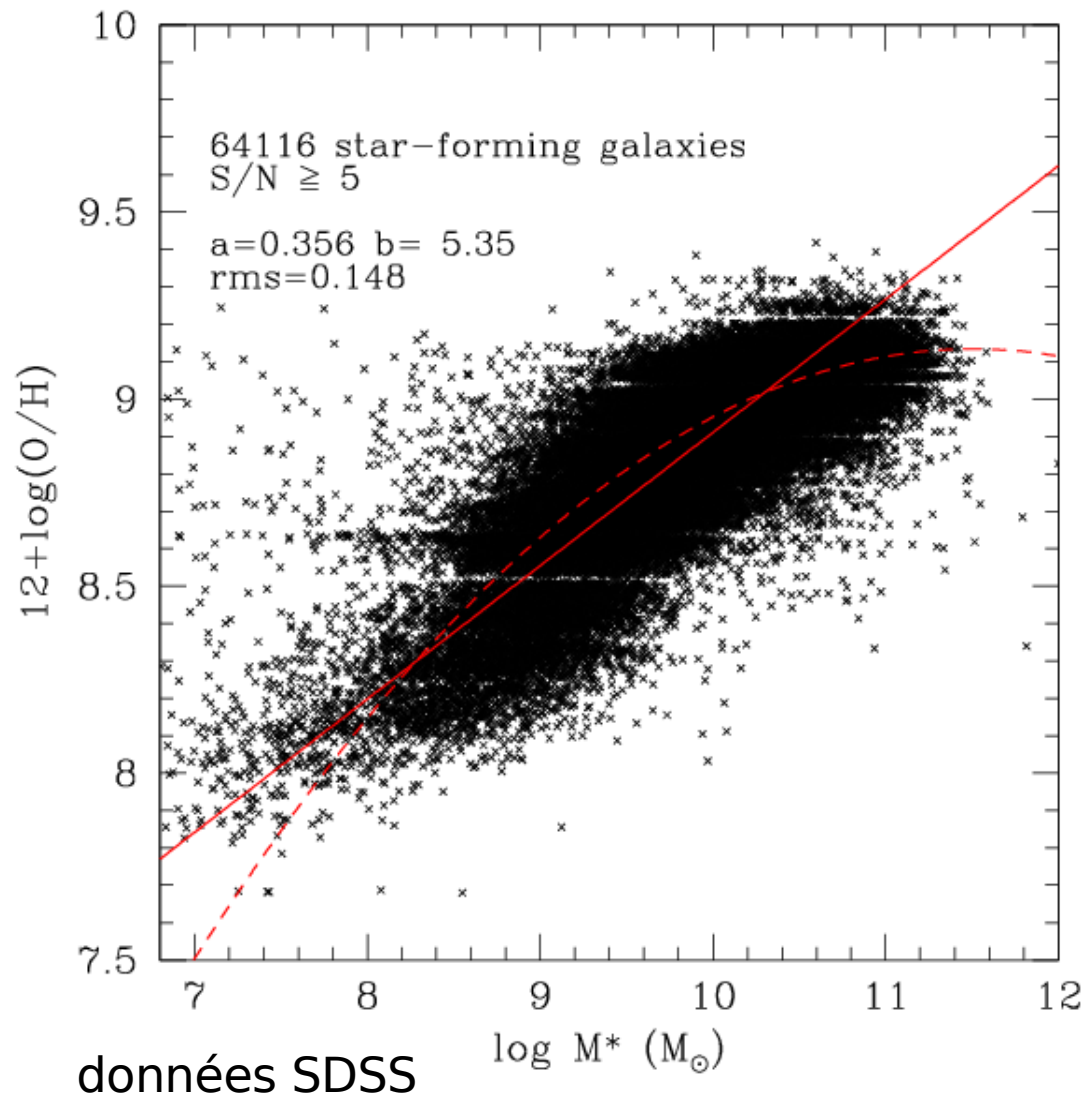
## Les modèles semi-analytiques



- simulations numériques basées sur le modèle hiérarchique
- prédisent les propriétés physiques des galaxies en fonction de l'âge cosmique

# La formation et l'évolution des galaxies

## La relation Masse-Métallicité (M-Z)



*Découverte par Lequeux en 1979*

C'est la relation entre deux horloges cosmiques:

- *Masse stellaire*  
-> *formation stellaire*
  - *Métallicité du gaz*  
-> *enrichissement du milieu interstellaire*
- > Très bon test des modèles de formation et d'évolution des galaxies**
- > Lien entre la cosmologie (masse) et la physique des galaxies (métallicité)**





# État des connaissances

## Il y a 3 ans:

- Les échantillons de galaxies se limitent à  $<10\,000$  galaxies dans l'univers local,  $\sim 100$  galaxies dans l'univers distant.
- Pas d'étude de référence de la relation masse-métallicité.
- Difficultés pour mesurer les propriétés physiques des galaxies à grande distance avec les diagnostics utilisés localement (décalage spectral).
- Pas d'outils automatiques pour analyser les propriétés physiques des galaxies des futurs grands relevés profonds.

## Aujourd'hui:

Nombreuses avancées réalisées dans tous ces domaines



Objectifs

**Données**

Méthodes  
Outils

Univers  
local

Univers  
distant

Conclusions  
Perspectives

# ***Données***

# La technique

## Les grands télescopes

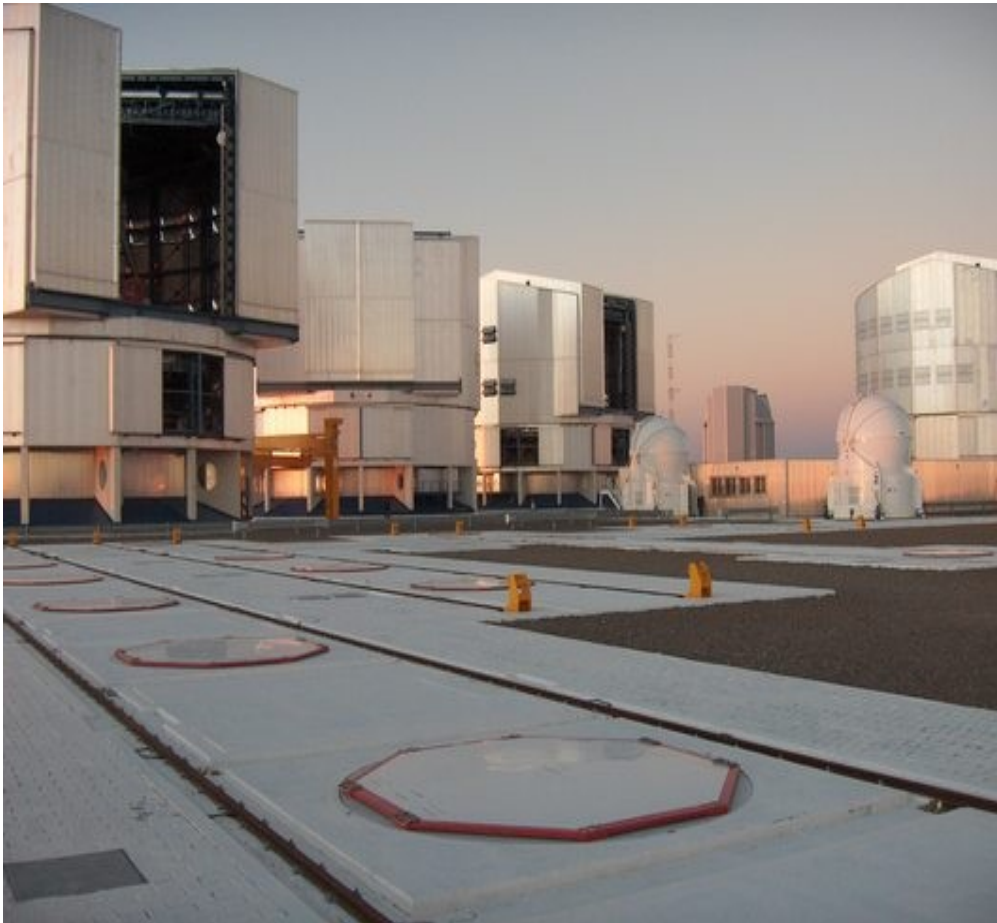
+ 8-10m de diamètre pour observer les galaxies lointaines  
ex: **VLT**, Keck, Gemini, Subaru, ...

### 1) **photométrie:**

+ *capteur CCD*  
+ *mesure de la luminosité totale à travers un filtre donné (ex: bleu, vert, rouge, etc...)*  
-> **plus profond, plus complet**

### 2) **spectroscopie:**

+ *système dispersif (prisme / réseau)*  
+ *mesure de la densité de luminosité en fonction de la longueur d'onde*  
-> **plus précis, de plus en plus rapide avec les spectroscopes multi-objets (VIMOS, DEIMOS, ...)**



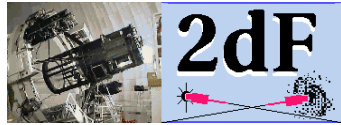


observatoire du mont Paranal (ESO/Chili)

# La technique

## Les grands relevés

- Le but est de décrire les propriétés physiques des galaxies grâce à l'étude du plus grand nombre d'objet possible (échantillons statistiques)

**+ Comparaison entre l'univers local et l'univers distant (retour dans le passé) pour comprendre l'évolution des galaxies**

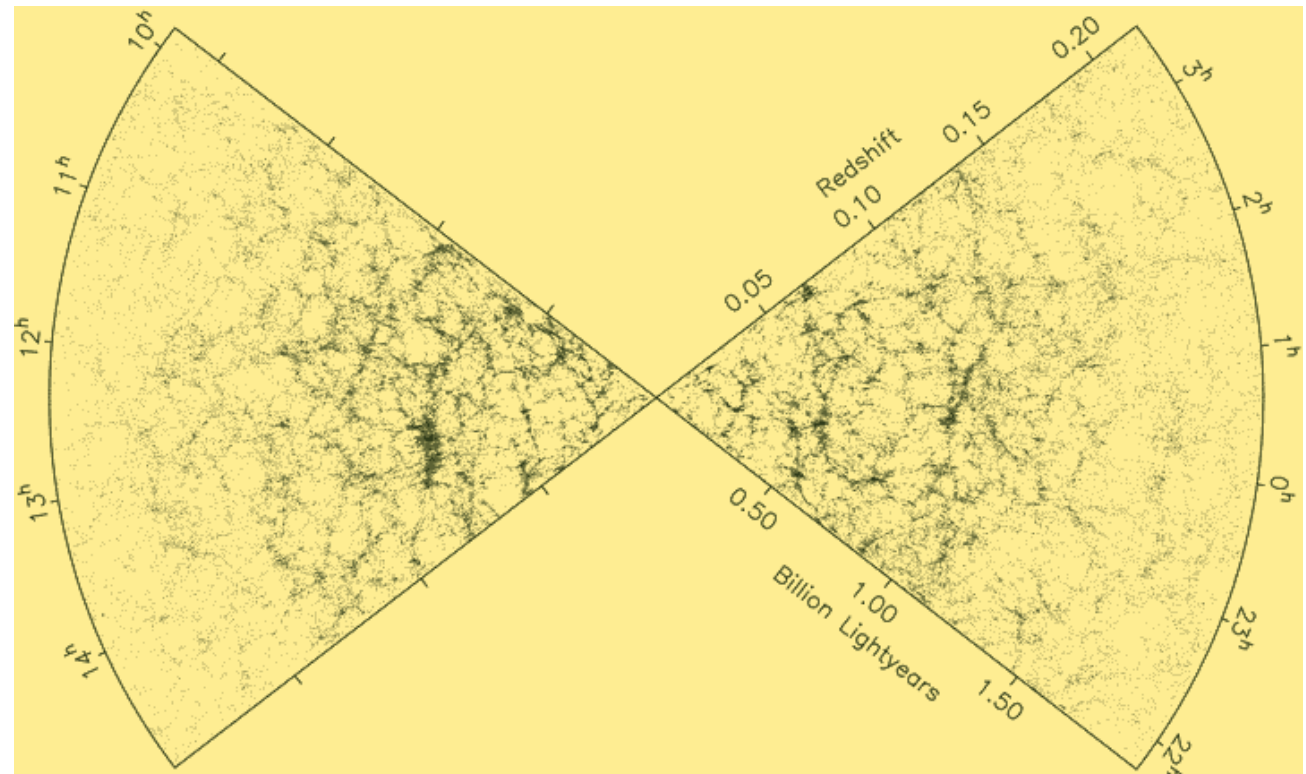
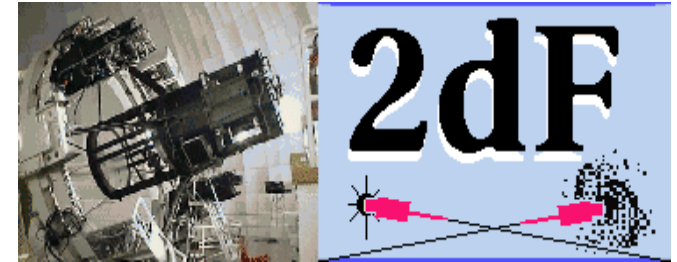
	décalage spectral	résolution	nombre d'objets
★ 	$z < 0,3$	600	~300 000
	$z < 0,3$	<b>2000</b>	<b>~2 millions</b>
★ 	$0,2 < z < 4,0$	250	~ <b>20 000</b>
<b>DEEP2</b>	$0,7 < z < 1,5$	<b>2000</b>	~10 000
<b>GDDS</b>	$1,0 < z < 2,0$	600	~1000
★ <b>zCOSMOS</b>	$0,2 < z < 4,0$	600	~10 000

## Les échantillons

### L'échantillon du 2dF Galaxy Redshift Survey

(Colless et al. 2001)

- **269 013** spectres de galaxies **proches**
- **domaine de longueurs d'onde:** 3600 – 8000 Å
- **résolution:**  $R \approx 600$
- **décalage spectral moyen:** 0,11 ( **$\approx 1$  milliard d'années**)
- *premier très grand relevé*  
(CFRS:  $\sim 1000$  objets,  
LCRS:  $\sim 20000$  objets)



-> mesures des raies d'émission obtenues par une collaboration avec M. Mouhcine, I. Lewis, S. Maddox

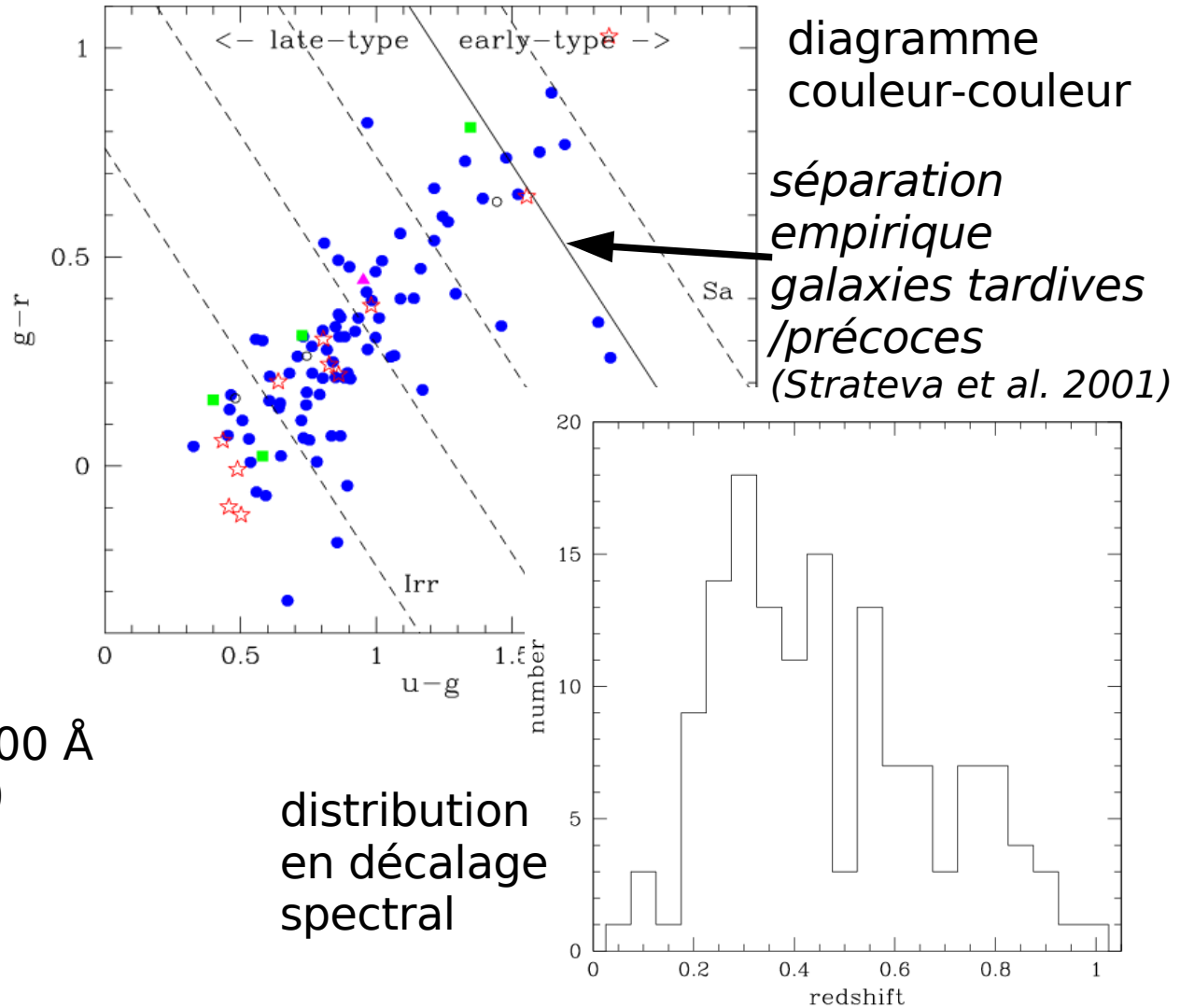
# Les échantillons

## L'échantillon LCL05 (Lamareille et al. 2006, A&A)

- 141 galaxies à raies d'émission
- sélectionnées parmi les galaxies CFRS
- nouveaux spectres obtenus au VLT avec FORS1/2
- + galaxies observées par hasard dans des programmes d'observation d'amas
- + spectres publics du relevé GDDS

- **résolution**:  $R \approx 500$
- **couverture spectrale**: 4000 à 8500 Å
- **décalages spectraux**:  $0,2 < z < 1,0$

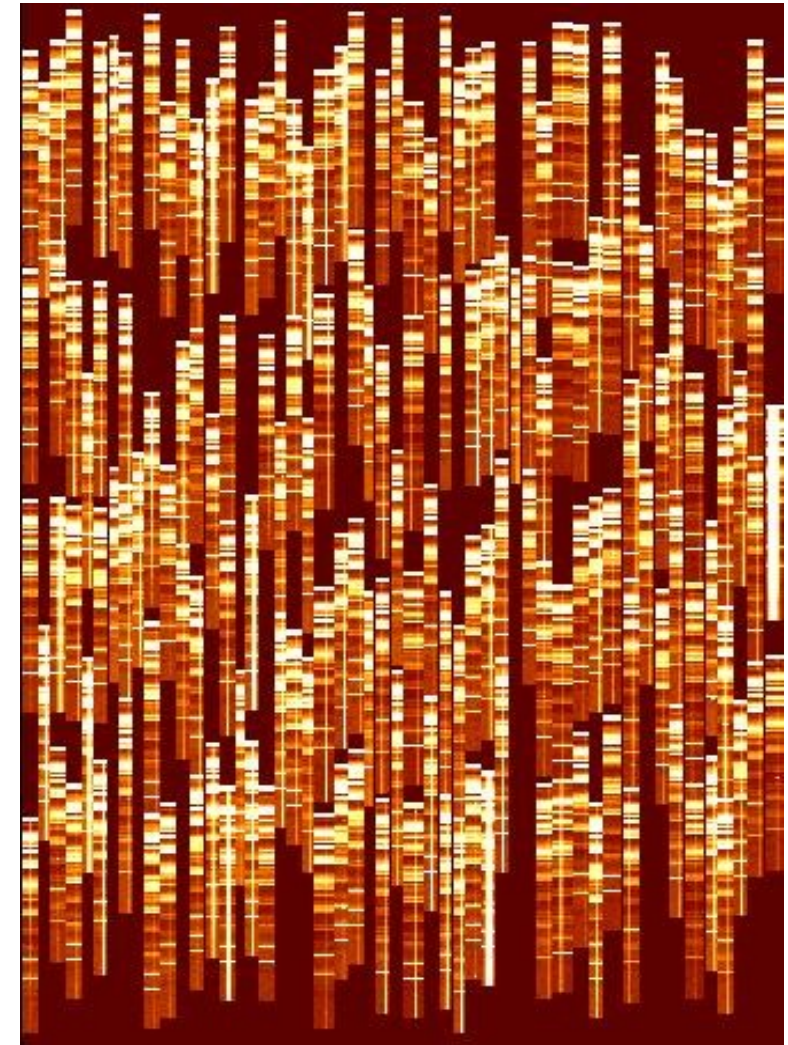
-> réduction des observations déjà réalisée au sein de l'équipe



## Les échantillons

### Le grand relevé VVDS (Le Fèvre et al. 2004)

- Collaboration franco-italienne de ~40 personnes
- ~ **10 000** spectres de galaxies ***distantes*** (relevé non encore achevé)
- **sélection:** *uniquement magnitude apparente*  
-> complétude importante
- **domaine de longueurs d'onde:** 5500 – 9500 Å
- **résolution:**  $R \approx 250$
- **décalage spectral moyen:** 0,7 ( $\approx 6$  milliards d'années)
- **Photométrie multi-bande:** visible, UV, IR, +radio et rayons X
- *plus grand relevé profond de galaxies à l'heure actuelle*
- *contribution: mesure des propriétés physiques des galaxies*





Objectifs

Données

**Méthodes  
Outils**

Univers  
local

Univers  
distant

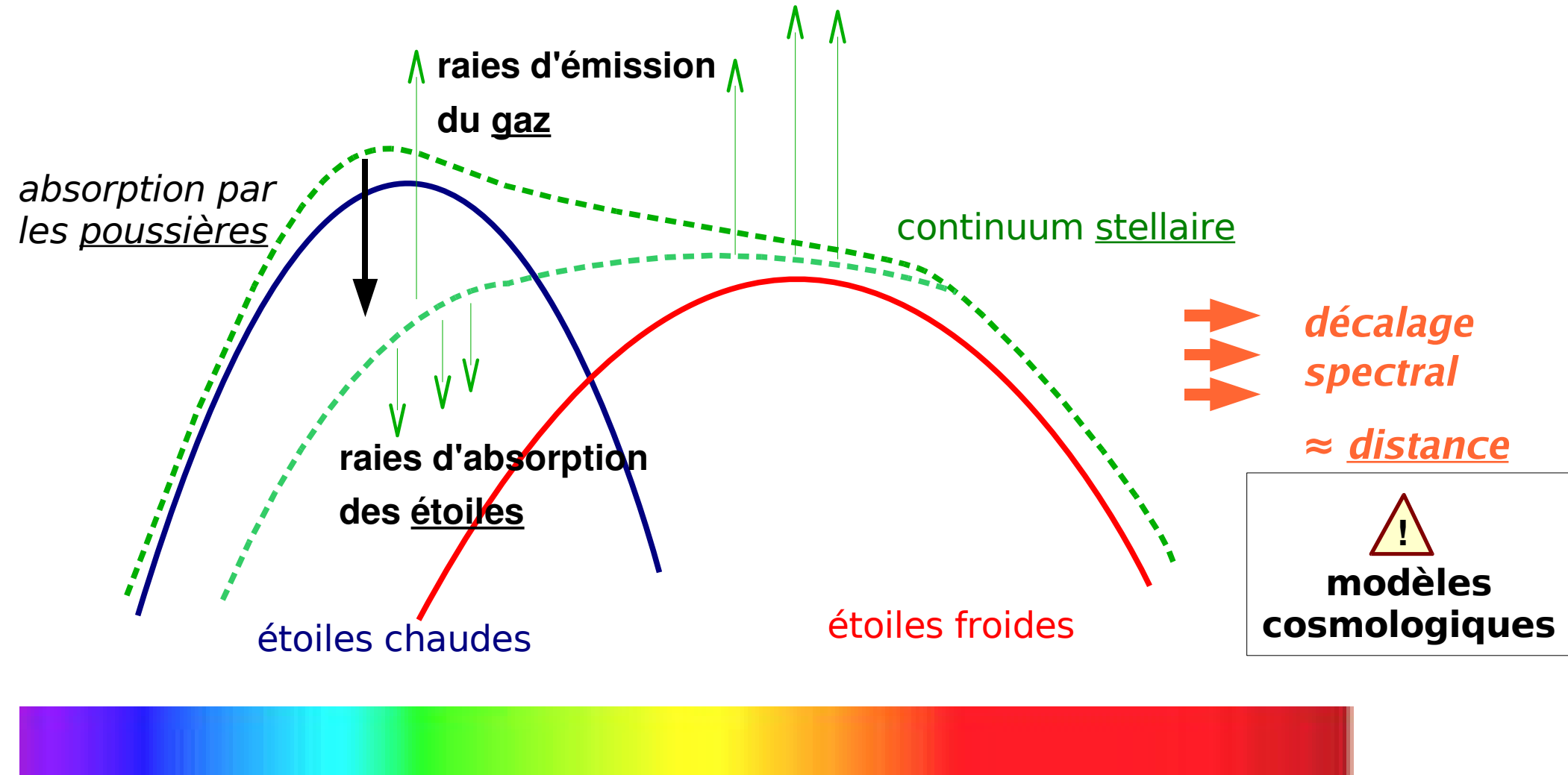
Conclusions  
Perspectives

# ***Méthodes et outils***



# Les méthodes d'observation

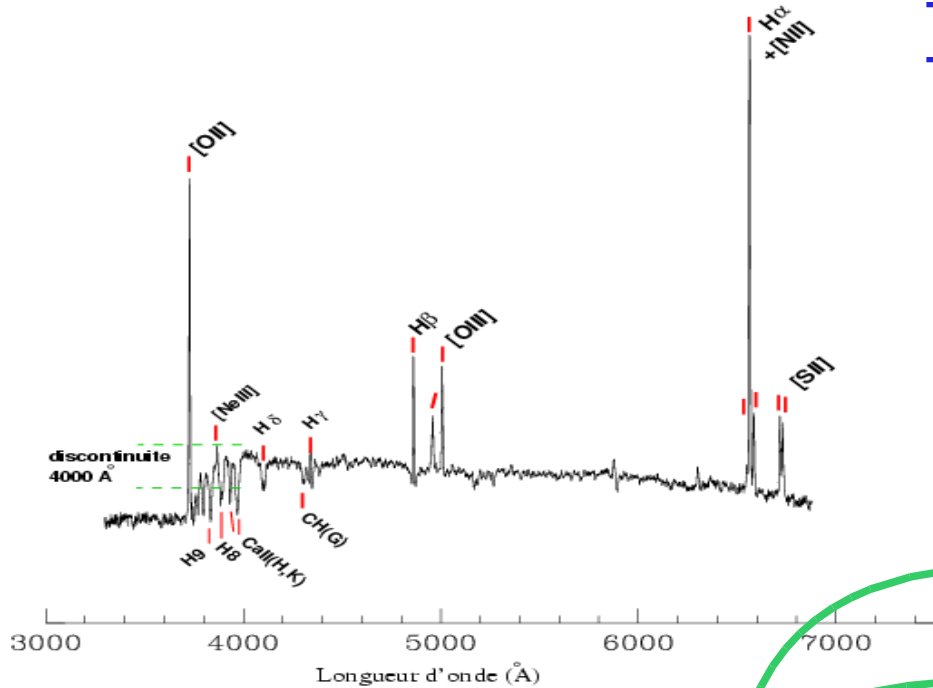
## Le spectre d'une galaxie



# Les méthodes d'observation

## Les propriétés physiques des galaxies

- Composante stellaire:  
+ **continuum (photométrie)**  
+ **raies d'absorption (spectroscopie)**



**Masse stellaire**

**Âge moyen des étoiles**

**Histoire de formation stellaire  
(Métallicité stellaire)**

**Métallicité du gaz**

**Type de source ionisante  
( étoiles jeunes / trou noir central )**

**Taux de formation d'étoiles instantané**

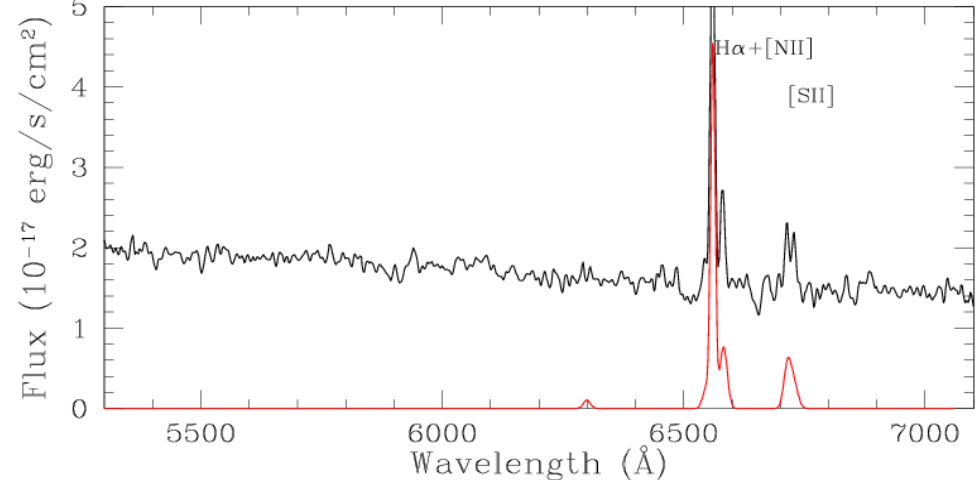
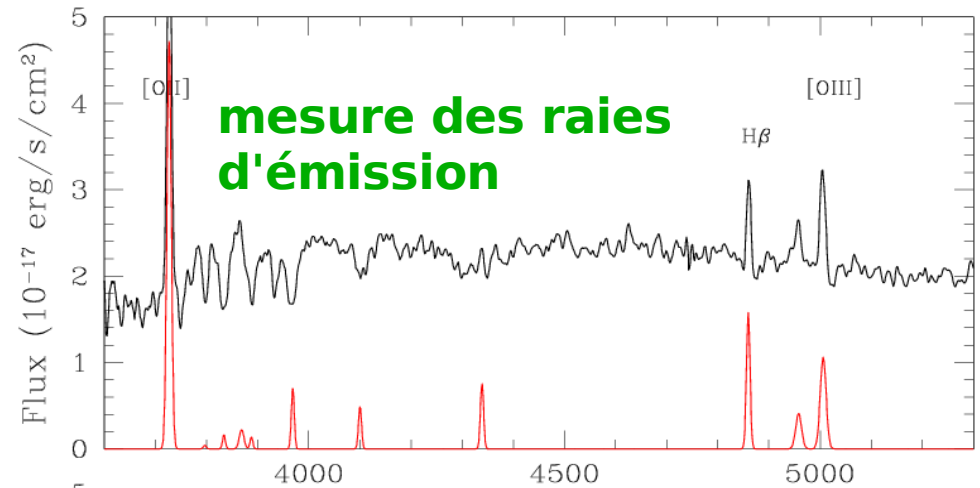
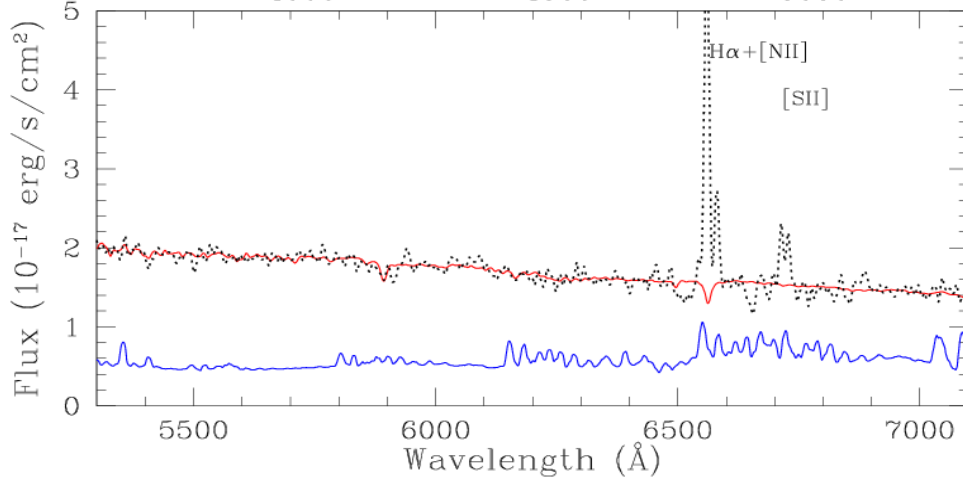
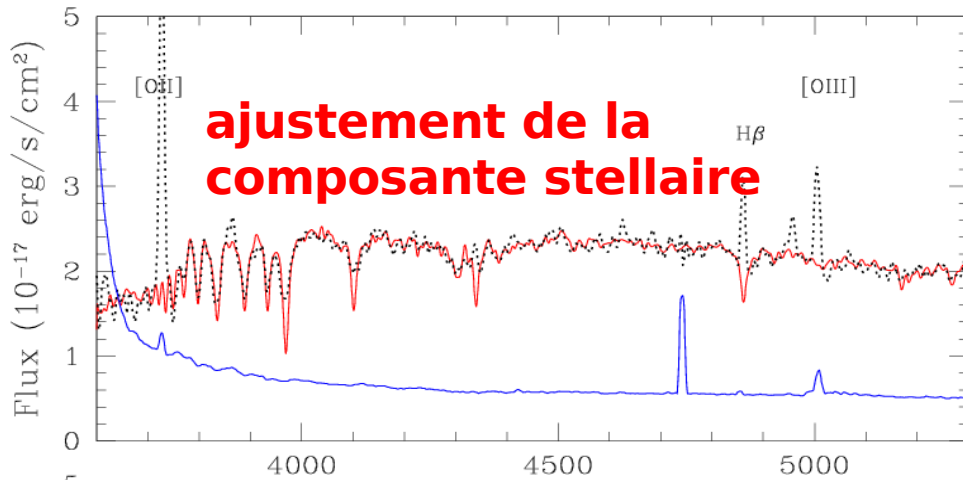
**Quantité de poussières**

- Composante nébulaire:  
+ **raies d'émission (spectroscopie)**

# Comment analyser les grands échantillons ?

## Le logiciel automatique «platefit\_VVDS»

- code original développé par **C. Tremonti** et **J. Brinchmann** pour le relevé SDSS
- adaptation en collaboration avec S. Charlot et J. Brinchmann



# Comment analyser les grands échantillons ?

## Le logiciel automatique «platefit\_VVDS»

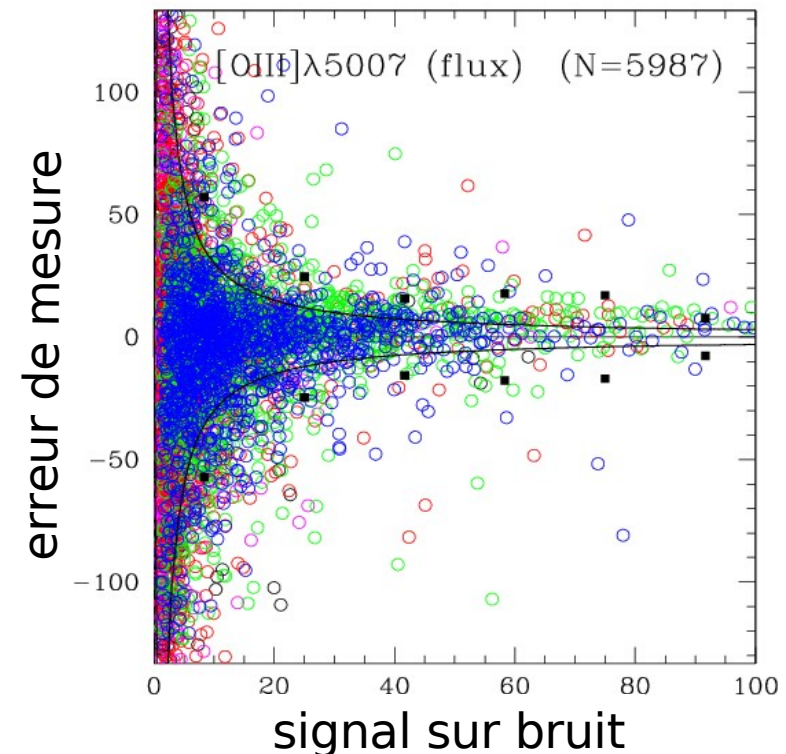
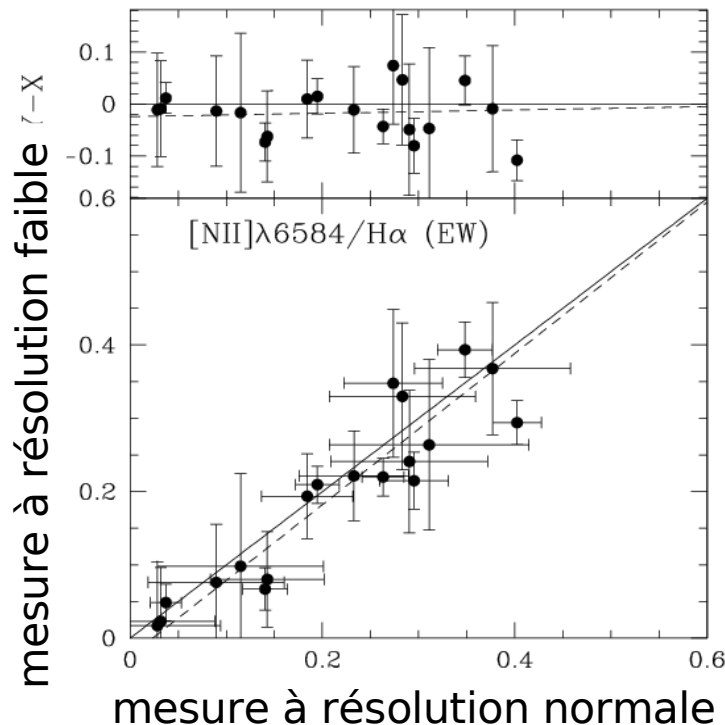
-> **travail d'adaptation à nos besoins**

spectres de moins bonne résolution et moins bon rapport signal sur bruit

-> **tests intensifs et simulations**

-> **logiciel fiable**

-> **utilisation sur les échantillons LCL05 et VVDS**



## Le logiciel automatique «Galaxie»

- calcul des propriétés physiques des galaxies à partir des indices spectraux
- utilisé sur les échantillons 2dFGRS, LCL05 et VVDS

# Comment déterminer le type de source ionisante ?

## Classification spectrale

Dans les **galaxies à noyaux actifs** les raies d'émission ne sont pas dues à la formation stellaire

-> les galaxies de Seyfert 1 sont reconnues à leurs **raies larges**

-> pour les galaxies à raies étroites on utilise les diagrammes diagnostics (Baldwin et al. 1981, Veilleux & Osterbrock 1987)

- fort degré d'ionisation



**Rapport d'une raie fortement ionisée sur une autre moins ionisée**  
ex :  $[OIII]/H\beta$

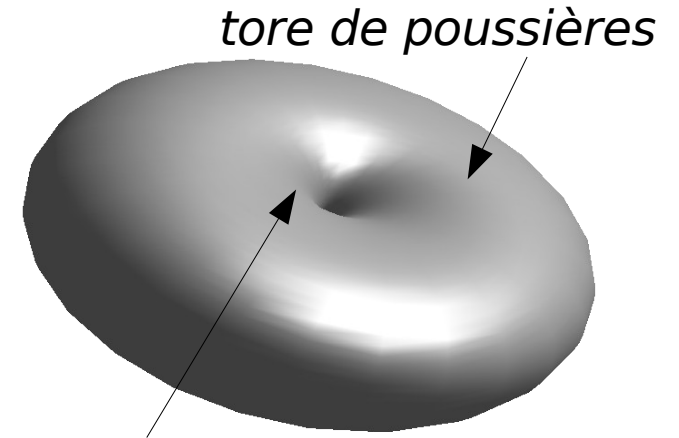
- grande intensité d'excitation collisionnelle



**Rapport d'une raie fortement collisionnelle sur une raie de recombinaison**  
ex :  $[NII]/H\alpha$  ou  $[SII]/H\alpha$



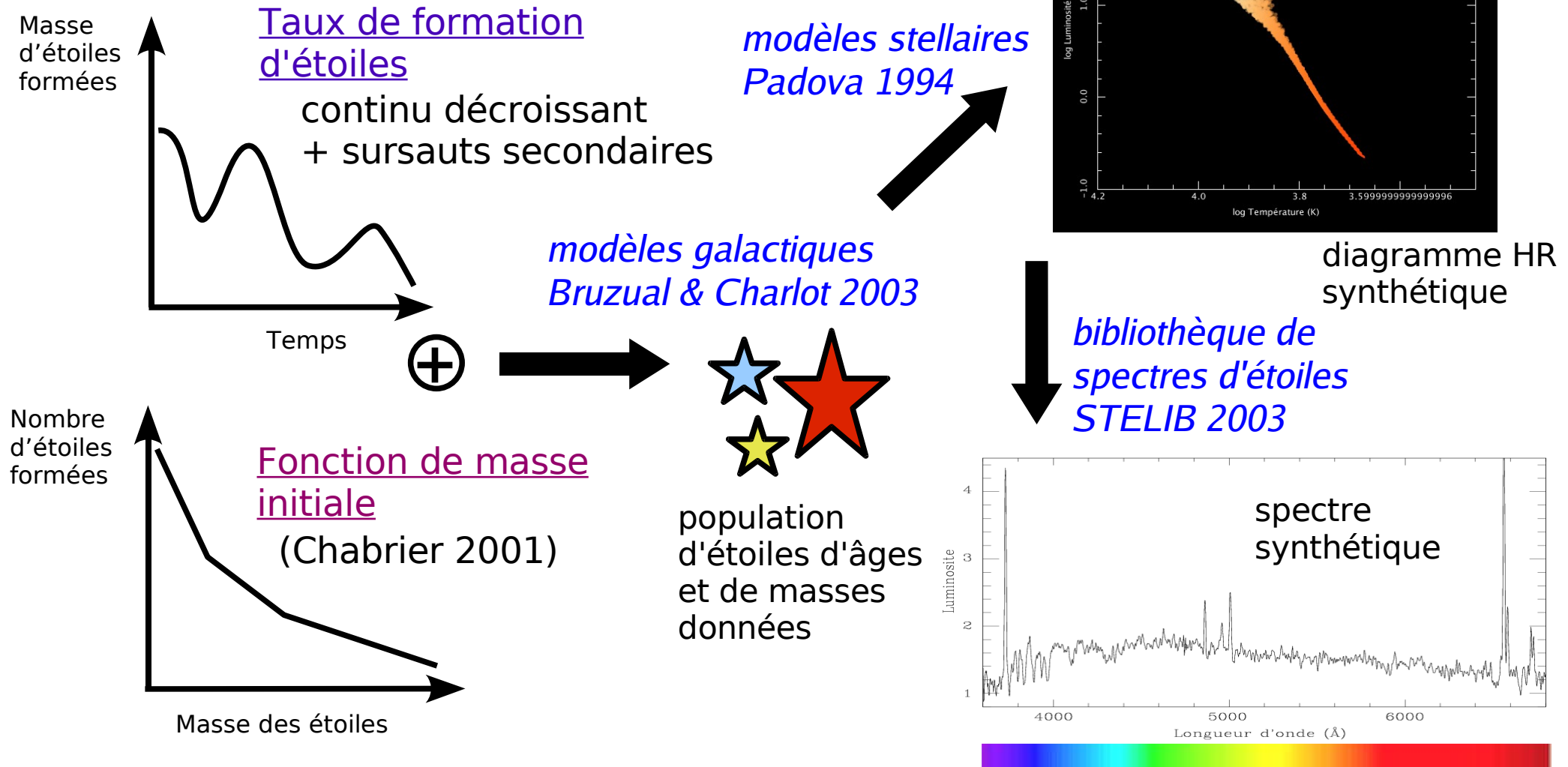
**problème à grand décalage spectral**



trou noir central:  
- disque d'accrétion en rotation rapide  
-> ionise et excite le gaz

# Comment mesurer la masse ?

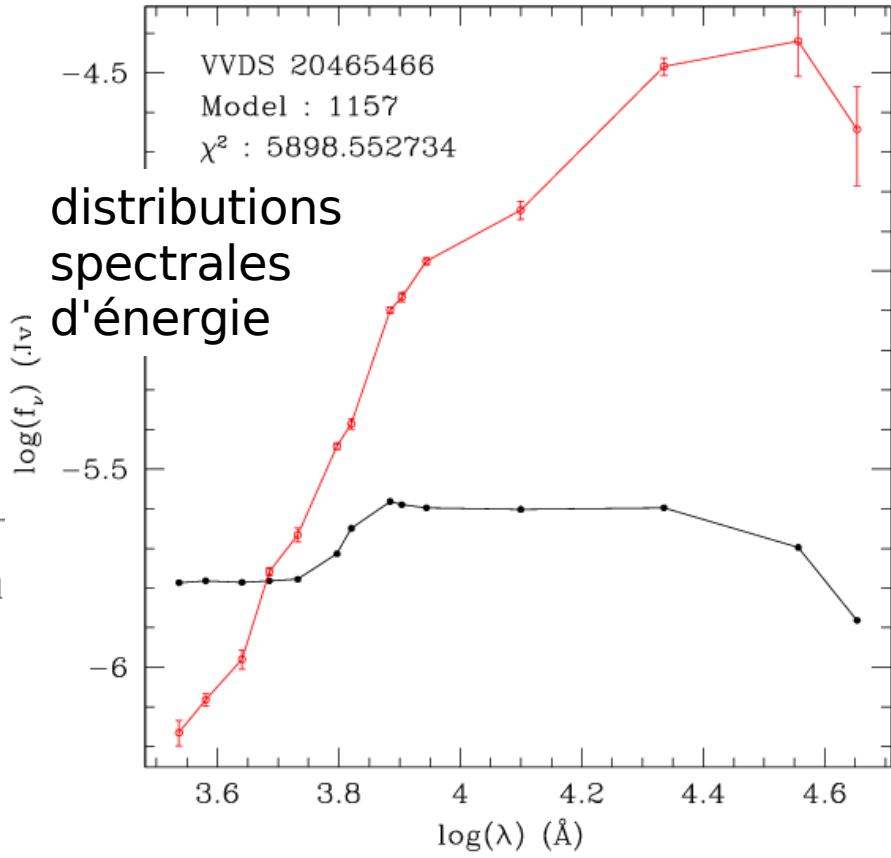
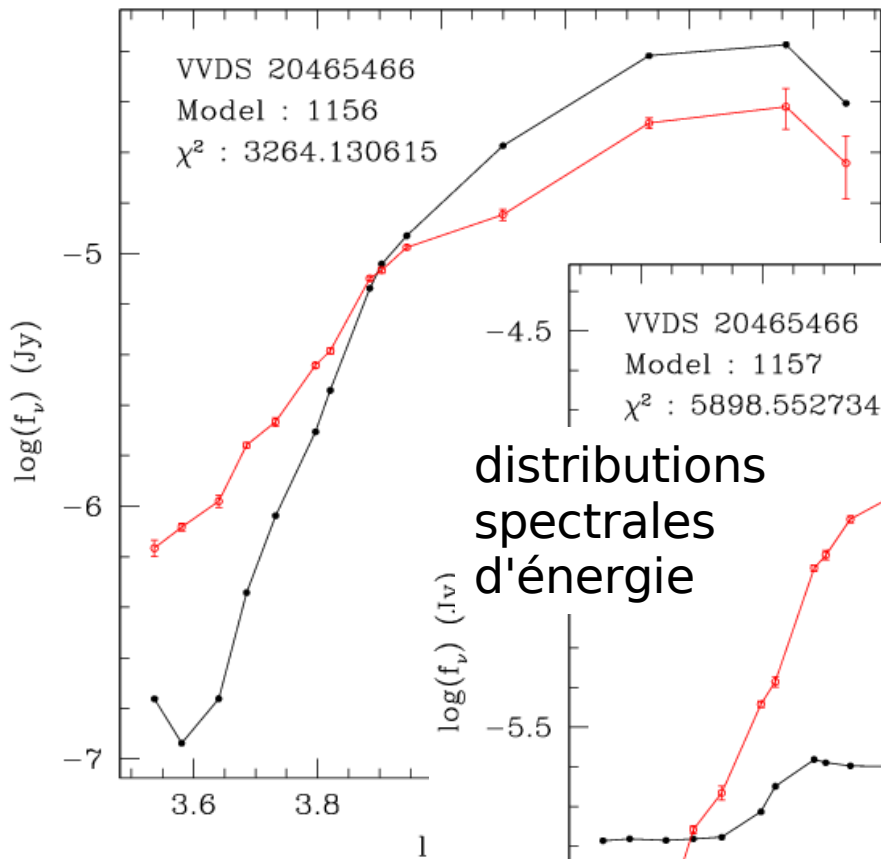
## La synthèse de population stellaire



# Comment mesurer la masse ?

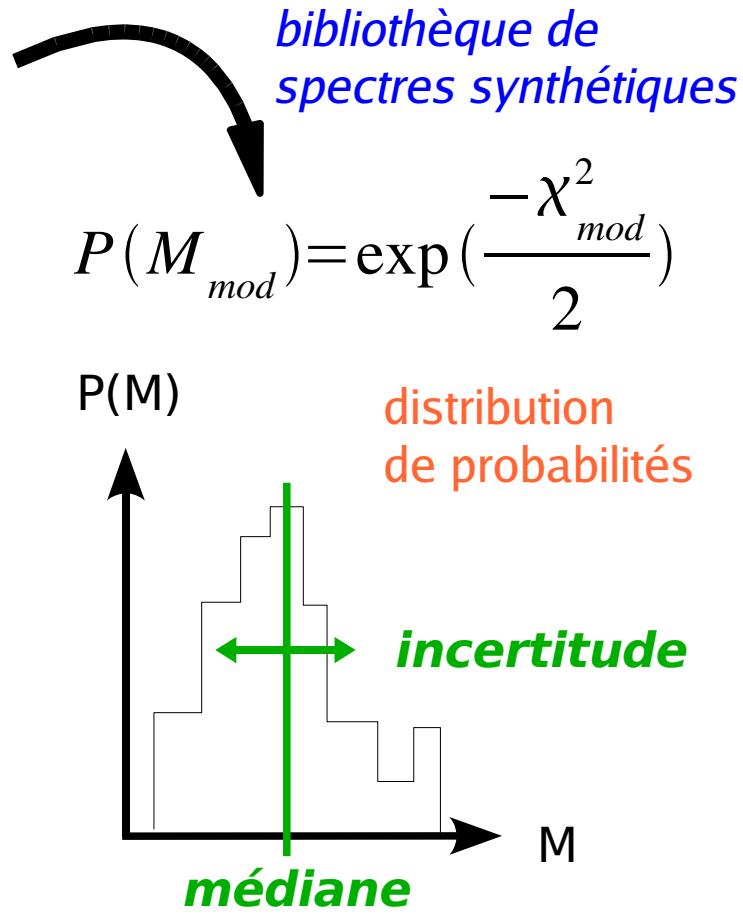
## L'optimisation bayésienne

$$\chi^2_{mod} = \sum \frac{(A \times F_{mod} - F_{obs})^2}{\sigma_{obs}^2}$$



distributions spectrales d'énergie

comparaison:  
**observations**  
vs. **modèles**



# Comment mesurer la métallicité ?

## Les méthodes semi-empiriques

**mesure de l'abondance en oxygène du gaz interstellaire.**

- Méthode directe (Osterbrock 1989):

+ rapport des raies métalliques (ex: [OII], [OIII]) sur les raies de l'hydrogène (ex: H $\alpha$ , H $\beta$ )

+ **Mais**: besoin de mesurer la température et la densité électronique (mesure faisant appel à des raies faibles et/ou confondues à basse résolution)

- Méthode semi-empirique (ex: McGaugh 1991):

+ basée sur les raies intenses de l'oxygène dont les rapports théoriques sont donnés par des **modèles de photoionisation** (ex: CLOUDY).

+ méthodes **testées et calibrées** avec les galaxies proches (comparaison avec la méthode directe)

$$\begin{cases} R_{23} = \frac{[OII]_{\lambda 3727} + [OIII]_{\lambda\lambda 4959+5007}}{H\beta} \\ O_{32} = \frac{[OIII]_{\lambda\lambda 4959+5007}}{[OII]_{\lambda 3727}} \end{cases}$$



# Comment mesurer la métallicité ?

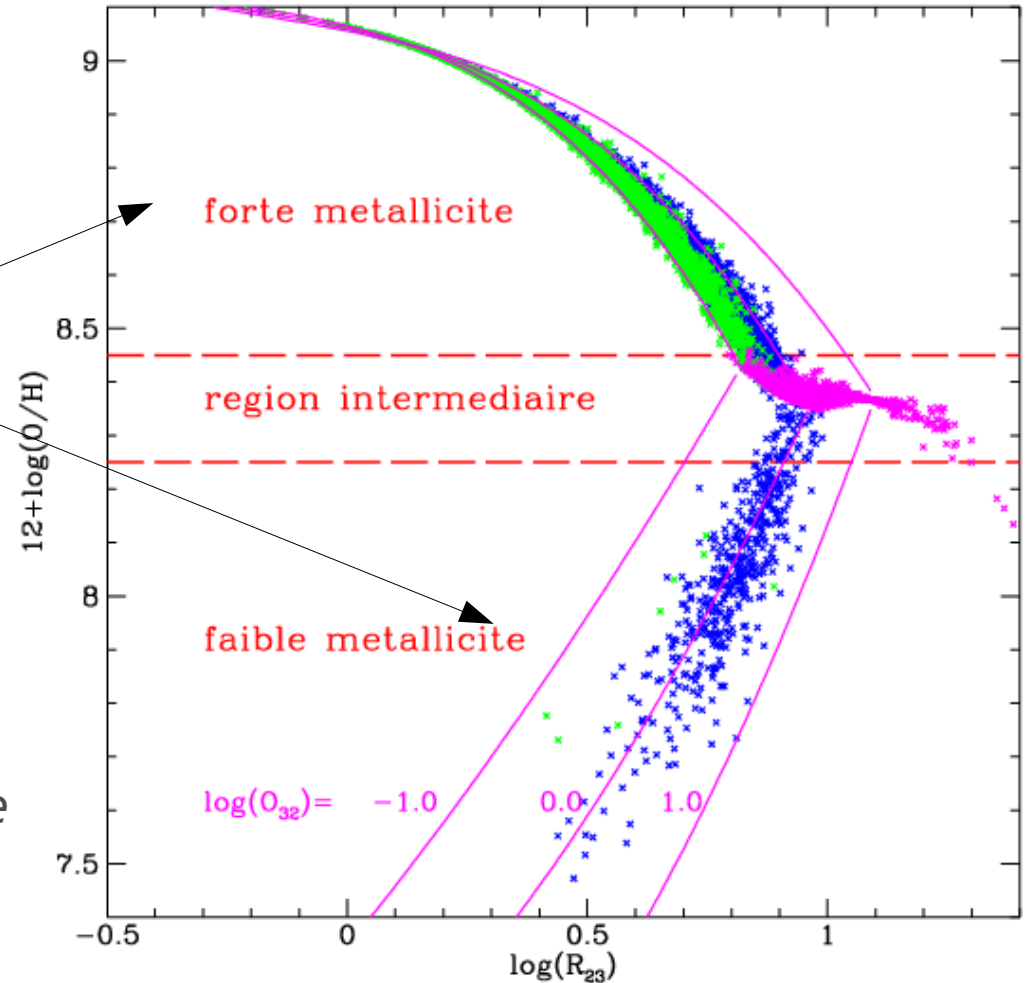
## La dégénérescence de l'abondance en oxygène

- À forte métallicité l'intensité des raies de l'oxygène décroît à cause du *refroidissement radiatif*

**choix de la branche:**  
**indicateur non-dégénéré**  
ex:  $[NII]/H\alpha$

➔ **problème à grand décalage spectral**

- galaxies de la région intermédiaire:  
le rapport  $R23$  excède sa valeur théorique  
+ erreurs de mesure  
+ incertitudes des modèles



données du 2dFGRS

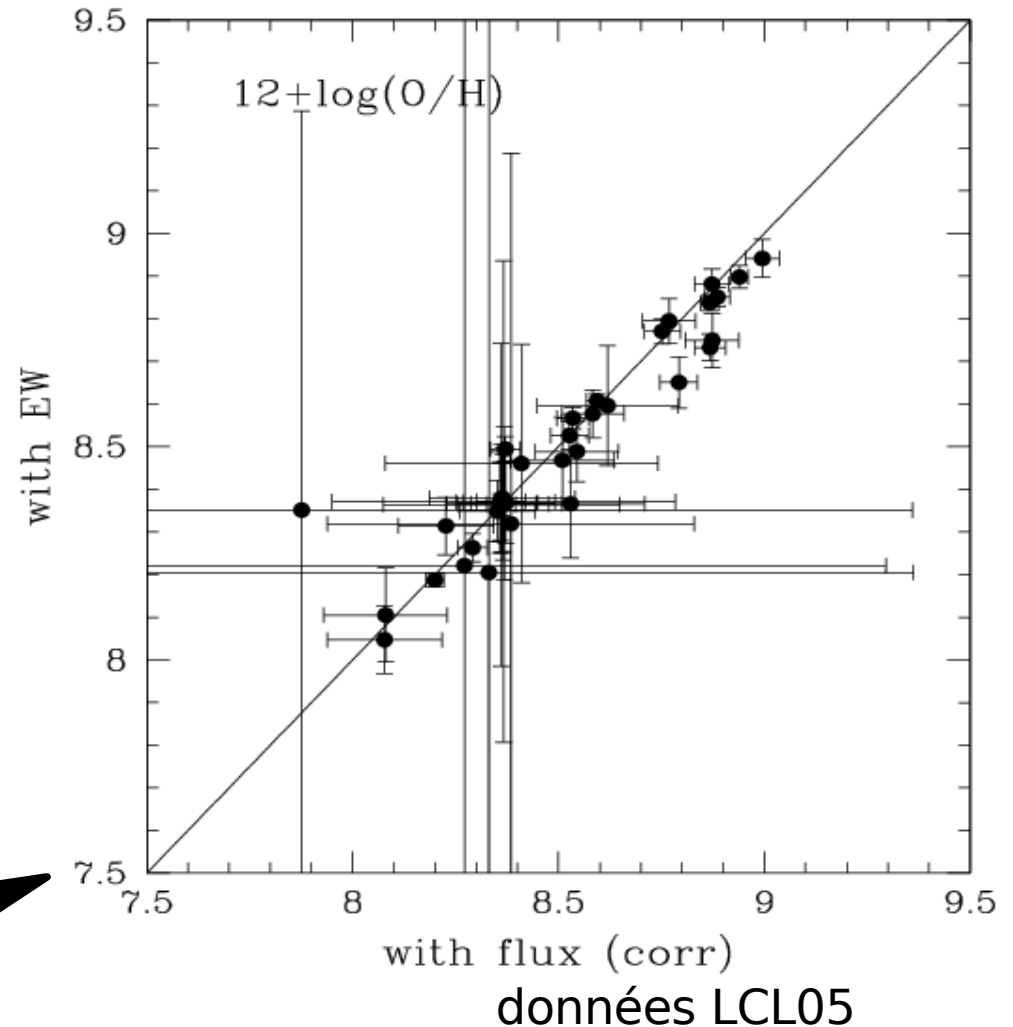
# Comment mesurer la métallicité ?

## Métallicité et extinction interstellaire

- L'absorption par les poussières augmente quand la longueur d'onde diminue
- > les raies [OIII] et [OII] sont affectées différemment par la poussière
- > les rapports R23 et O32 doivent être corrigés
- + **autre solution:** utilisation des largeurs équivalentes des raies (rapport du flux de la raie sur le continuum sous-jacent) (testé par Kobulnicky & Phillips 2003)

*résultats similaires*

- avec correction de la poussière
- avec les largeurs équivalentes





Objectifs

Données

Méthodes  
Outils

**Univers  
local**

Univers  
distant

Conclusions  
Perspectives

# ***Analyse: Univers local***

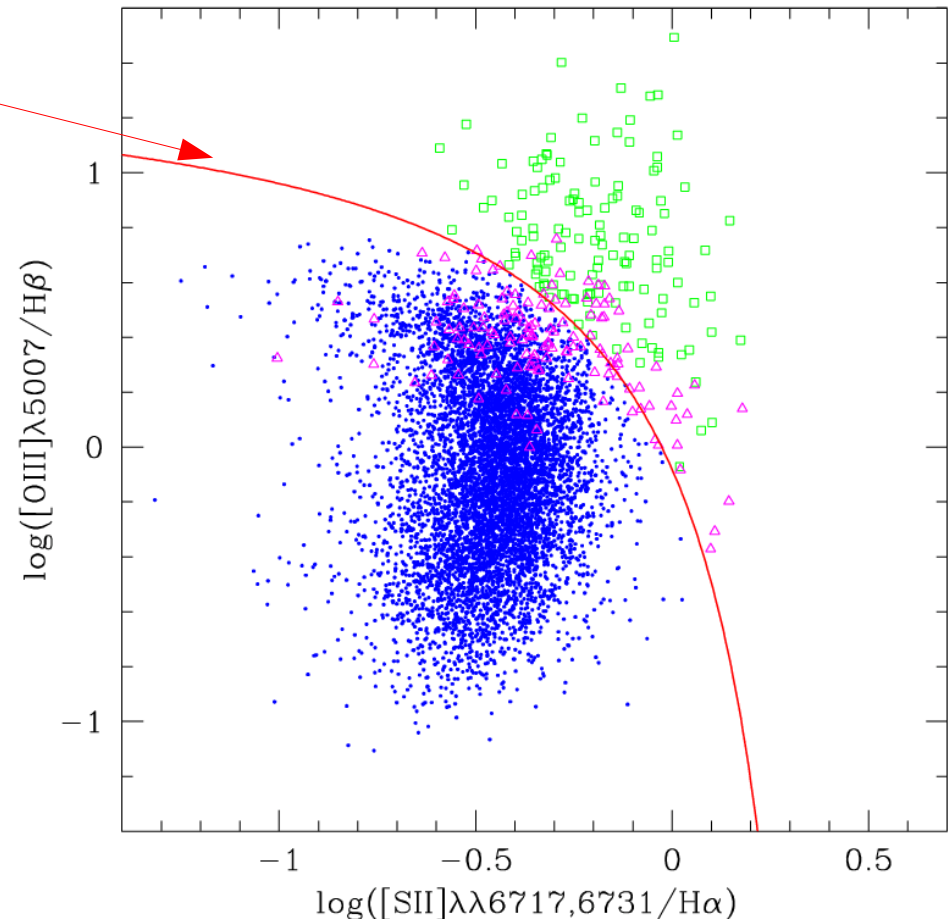
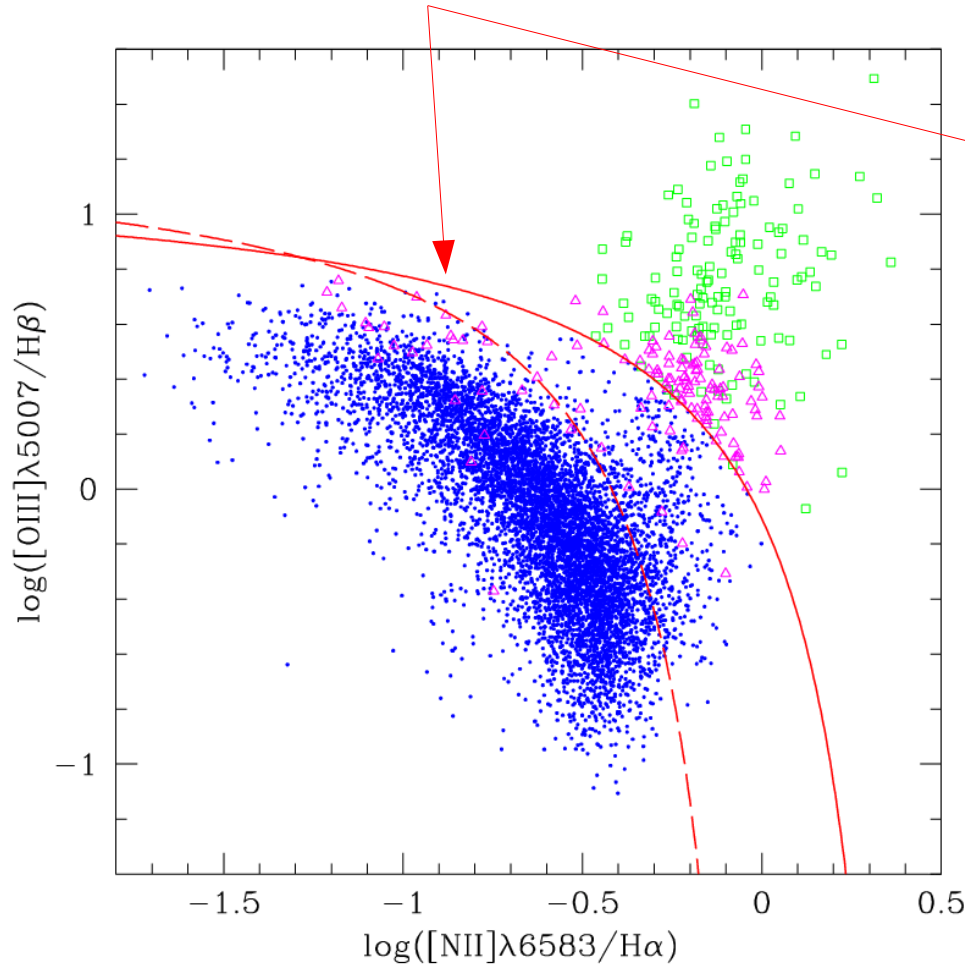
2dFGRS

# Classification spectrale

## 2dFGRS: La classification standard rouge

(modèle de Kewley et al. 2001)

7402 Galaxies à formation d'étoiles  
 133 Galaxies à noyau actif  
 135 Galaxies intermédiaires



# Classification spectrale

## 2dFGRS: La nouvelle classification bleue

(Lamareille et al. 2004, MNRAS)

7402 Galaxies à formation d'étoiles  
 133 Galaxies à noyau actif  
 135 Galaxies intermédiaires

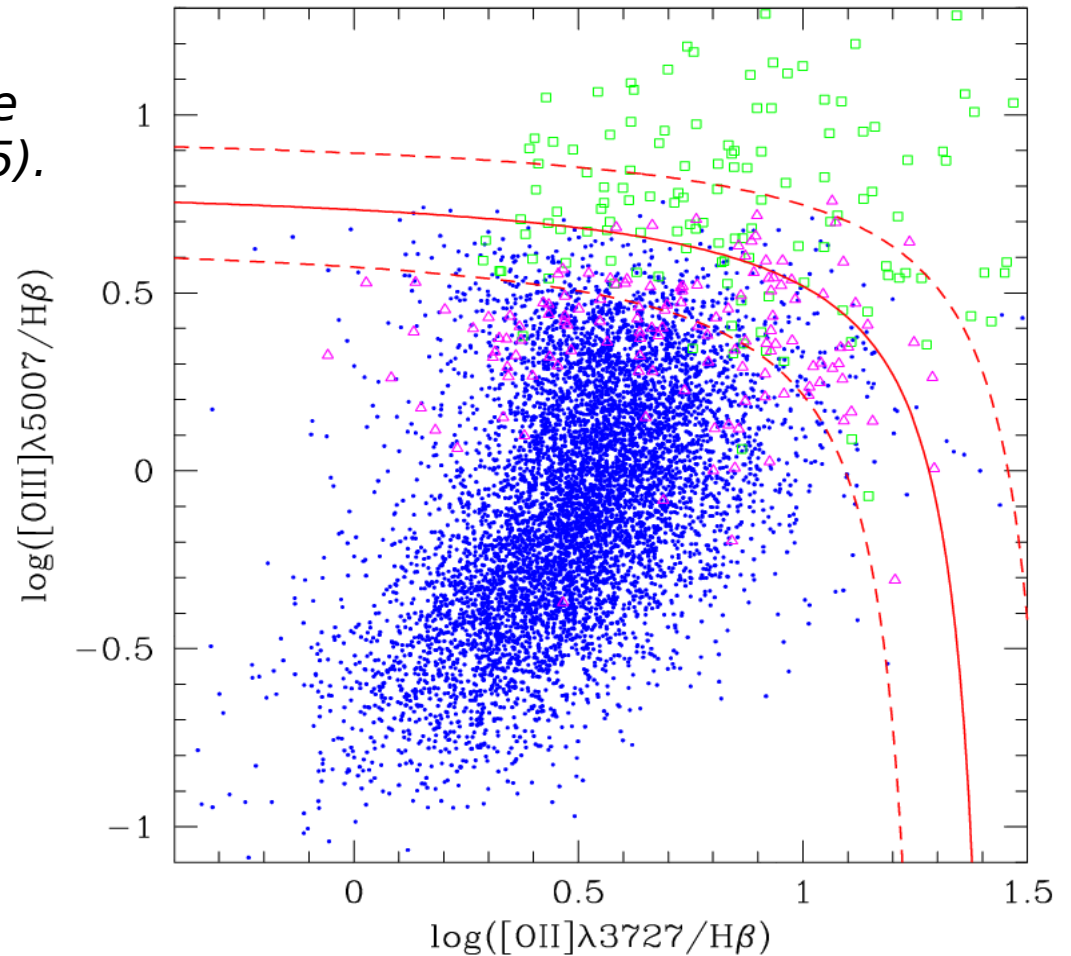
Les raies d'émission  $H\alpha$ ,  $[NII]$  et  $[SII]$  (partie rouge) sortent du domaine visible à décalage spectral intermédiaire ( $z \sim 0,5$ ).

-> utilisation des raies  $[OII]$ ,  $[OIII]$  et  $H\beta$  (partie bleue)



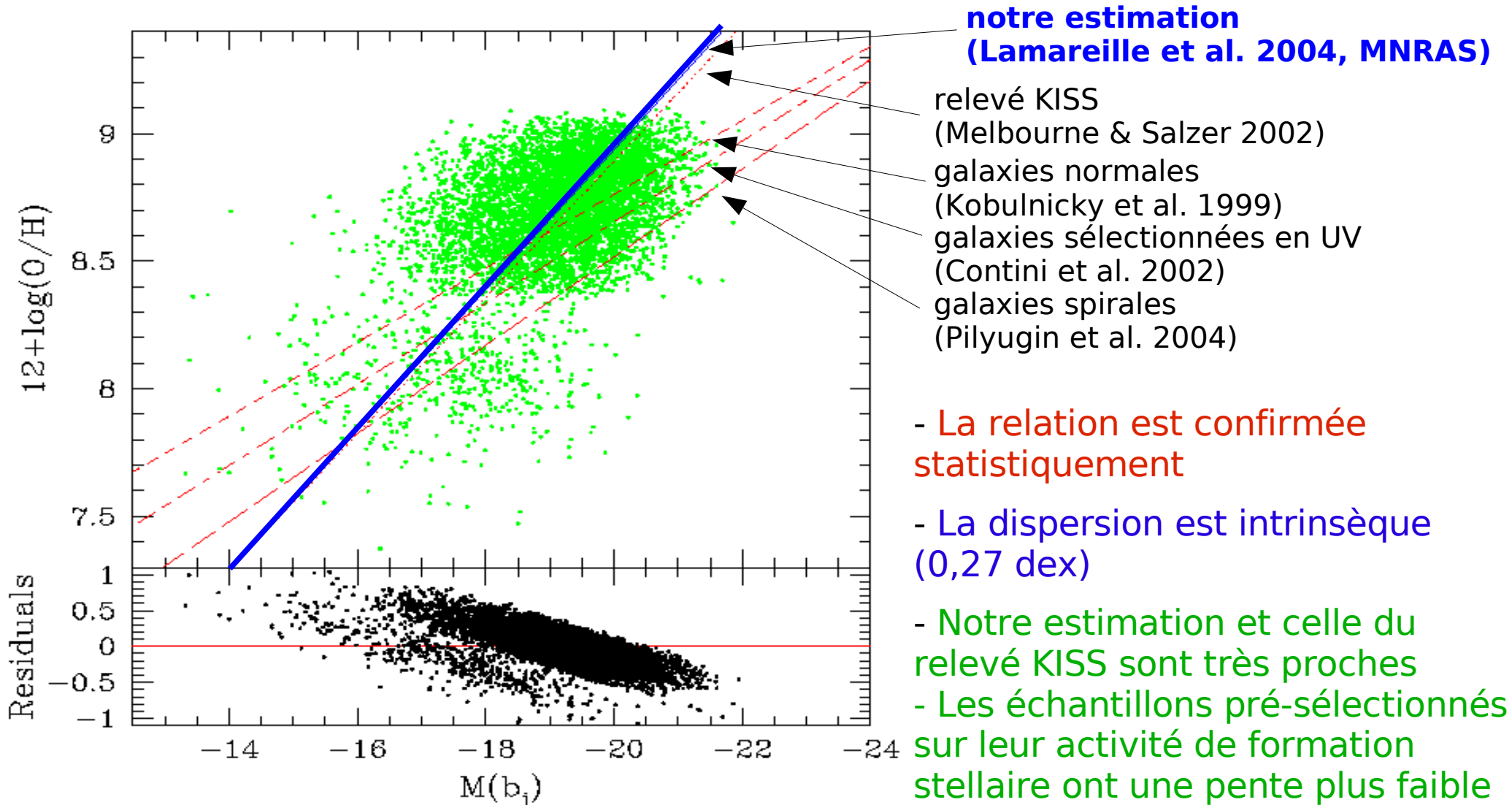
**domaine d'incertitude**

	galaxie formation d'étoiles	galaxie noyau actif
taux de succès	99,4%	84,1%
contamination	0,5%	22,1%
hors domaine inc.	0,1%	0%



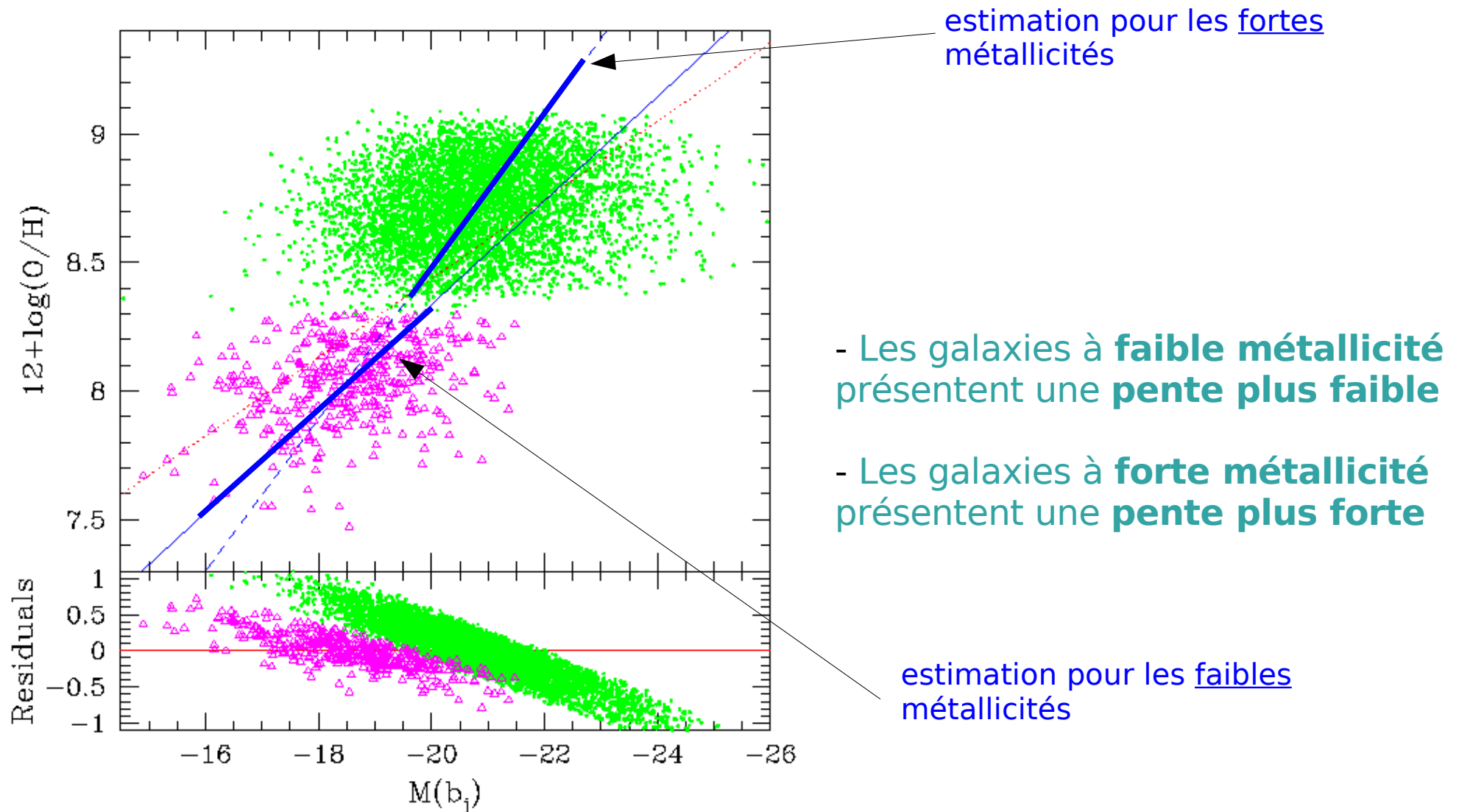
# La relation luminosité-métallicité

## La relation luminosité-métallicité de l'Univers local à partir du 2dFGRS



# La relation luminosité-métallicité

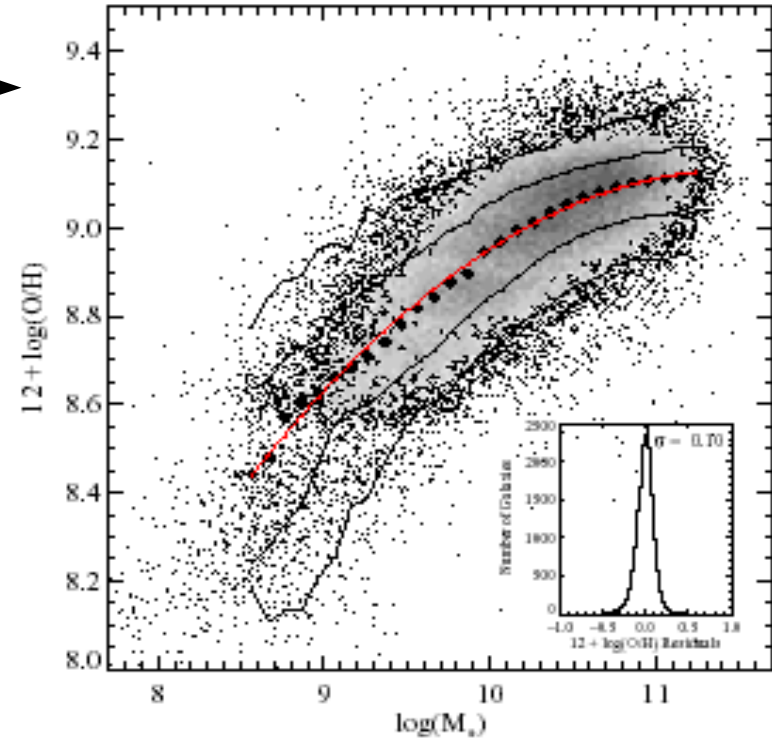
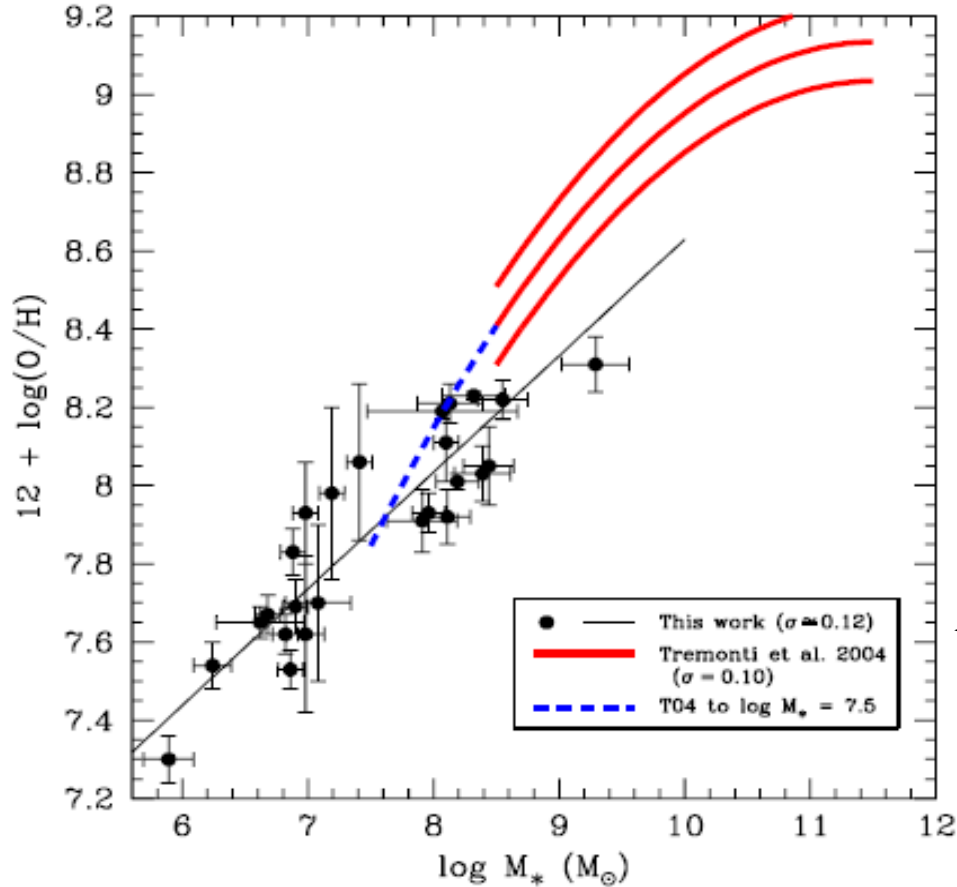
## Différents régimes de la relation luminosité-métallicité



# Comparaison avec d'autres études postérieures

## Relation masse-métallicité estimée à partir d'autres échantillons

relation M-Z confirmée sur un échantillon de ~60000 galaxies proches du relevé SDSS (Tremonti et al. 2005) →



← - galaxies naines observées dans le proche infrarouge (Lee et al. 2006)

- confirmation de l'augmentation de la pente avec la masse stellaire



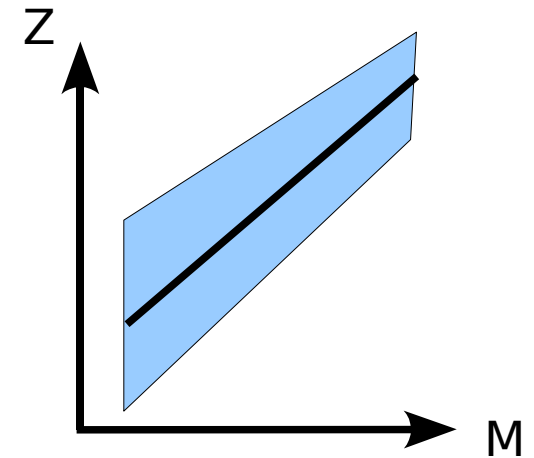
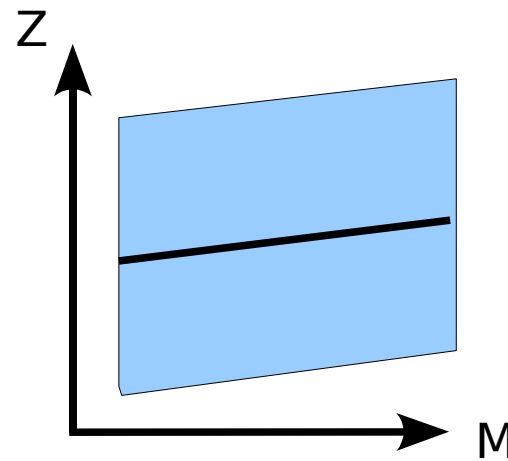
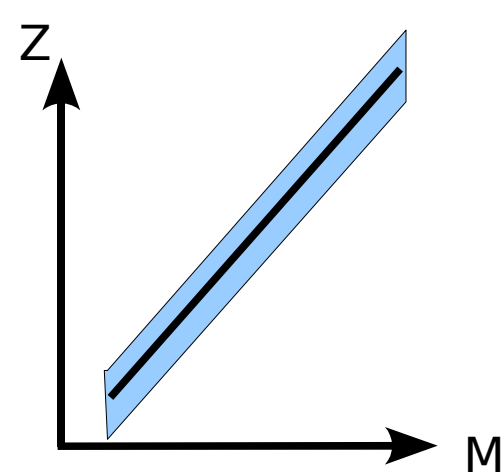
# Interprétation

## Forme théorique de la relation M-Z

modèles monolithiques  
 boîte fermée                      boîte ouverte

Masse totale constante

modèle hiérarchique



pente: due à la formation stellaire et l'enrichissement en métaux de concert

dispersion: faible, le taux de production total est une constante physique

pente: faible, enrichissement en métaux inefficace

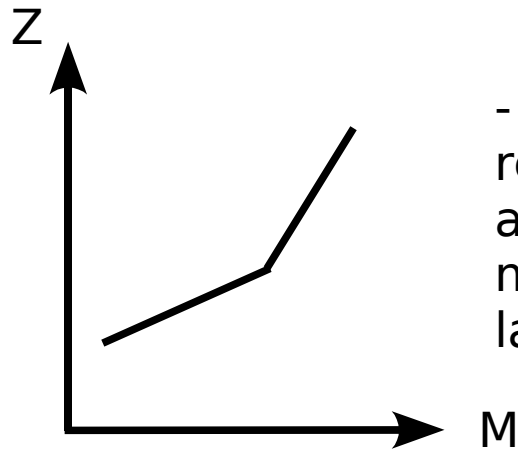
dispersion: forte, la quantité de métaux piégés dépend de la masse totale + interactions avec l'environnement

pente: due à l'augmentation de la masse totale avec la masse stellaire: métaux de mieux en mieux retenus

dispersion: forte mais diminue avec la masse

# Interprétation

## Contraintes sur les modèles de formation et d'évolution des galaxies

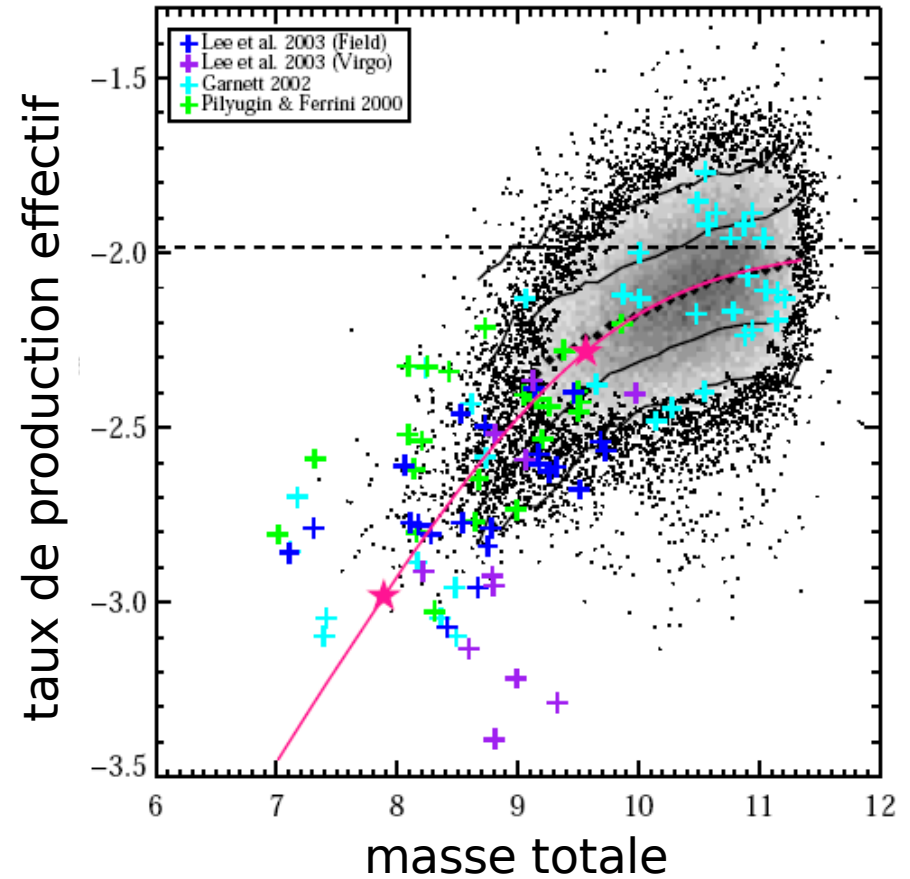


- La pente de la relation M-Z (ou L-Z) augmente avec la masse stellaire et la métallicité

**+ augmentation du taux de production effectif avec la masse stellaire**

**-> augmentation de la masse totale (potentiel gravitationnel) en même temps que la masse stellaire**

-> indice en faveur du modèle hiérarchique



Tremonti et al. 2005



Objectifs

Données

Méthodes  
Outils

Univers  
local

**Univers  
distant**

Conclusions  
Perspectives

# ***Analyse: Univers distant***

LCL05  
VVDS

# La relation luminosité-métallicité

## Classification spectrale de l'échantillon LCL05

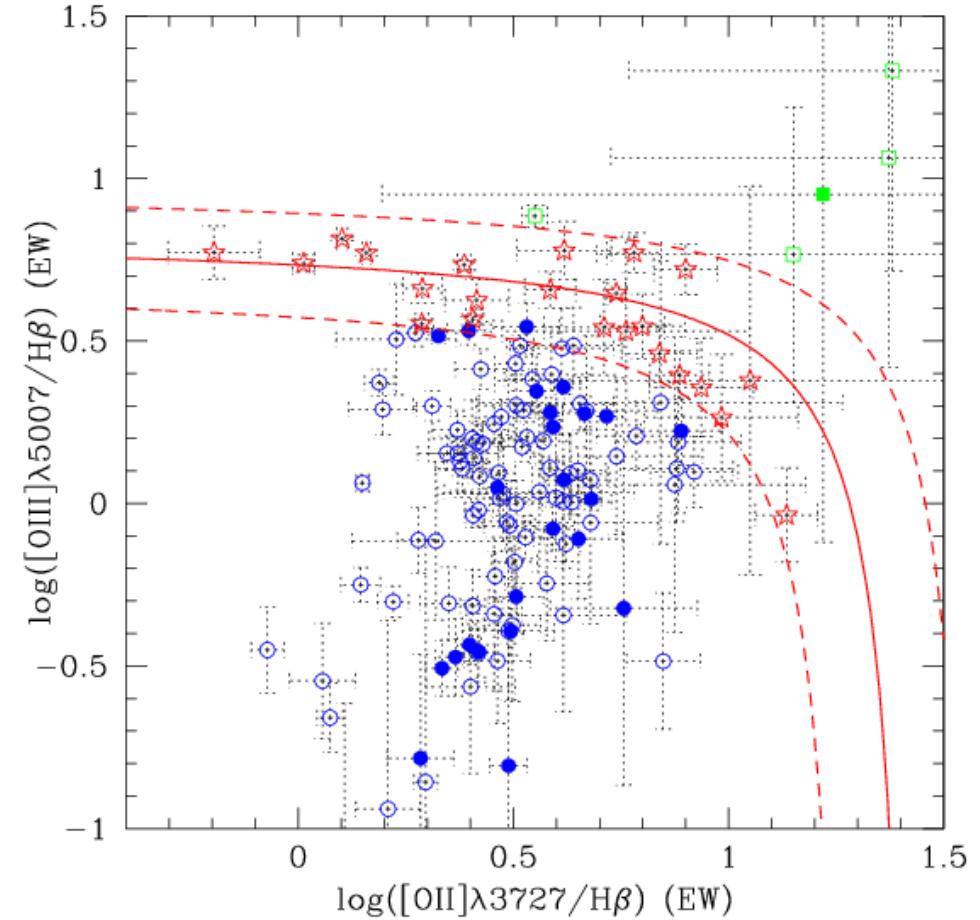
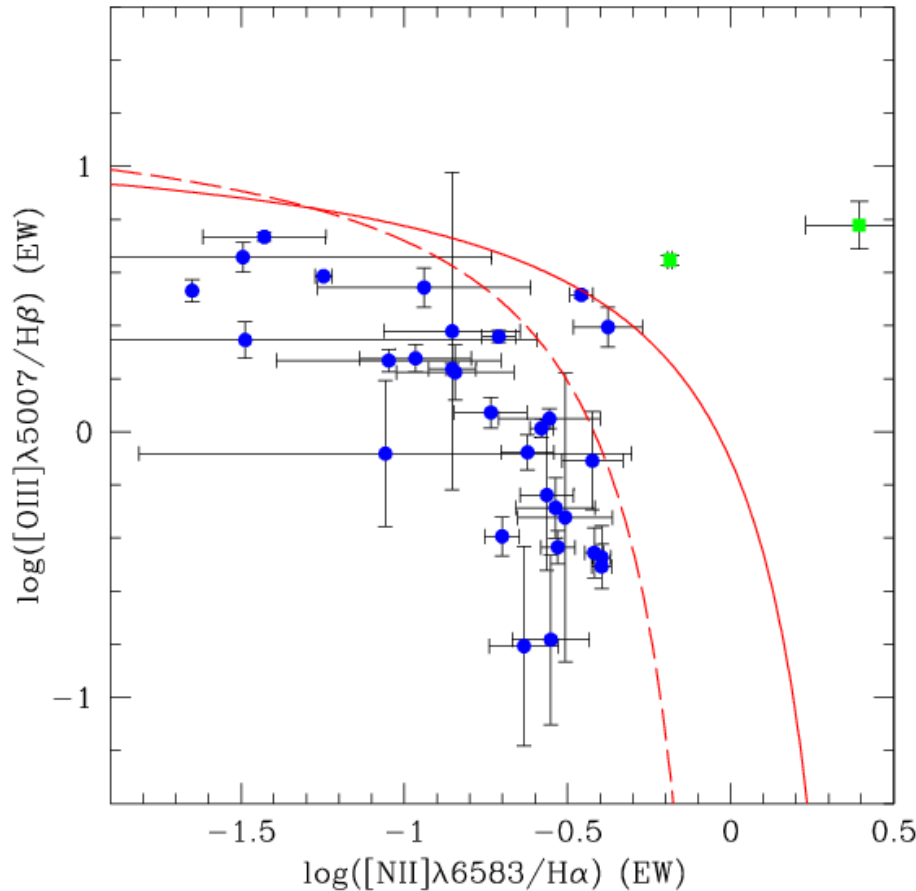


diagramme rouge  
(37 objets)

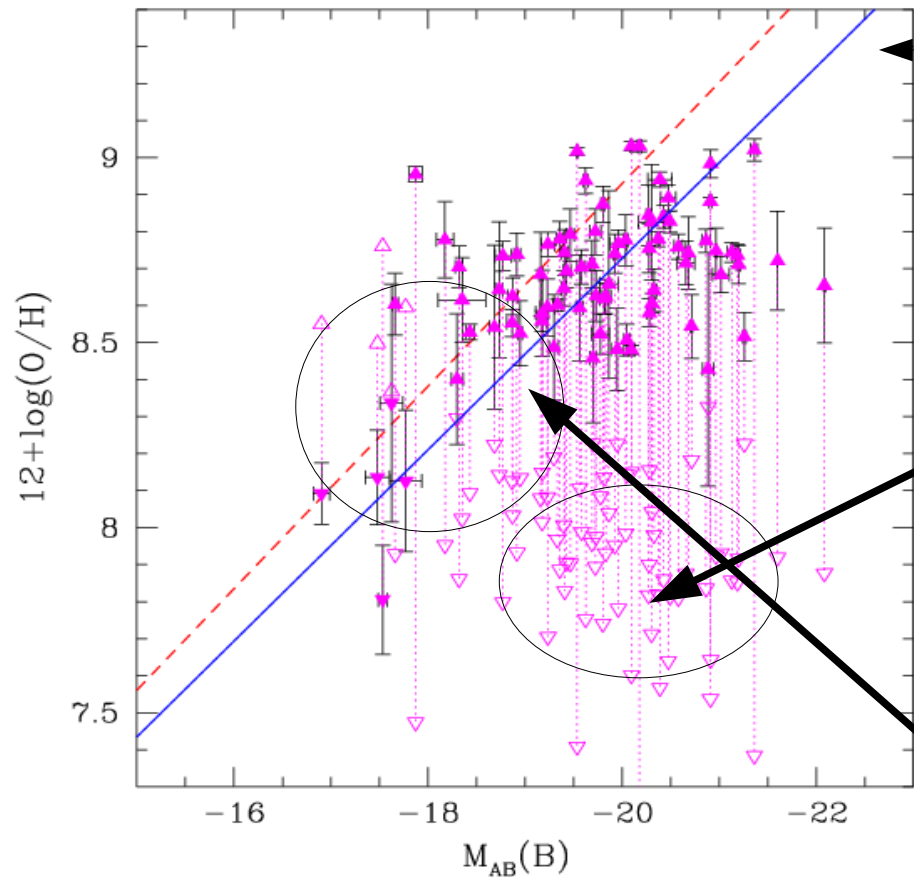
**115 galaxies à formation d'étoiles**  
**7 galaxies à noyaux actifs**  
**16 galaxies incertaines**

diagramme bleu  
(104 objets)

# La relation luminosité-métallicité

## Levée la dégénérescence en oxygène sans indicateur secondaire

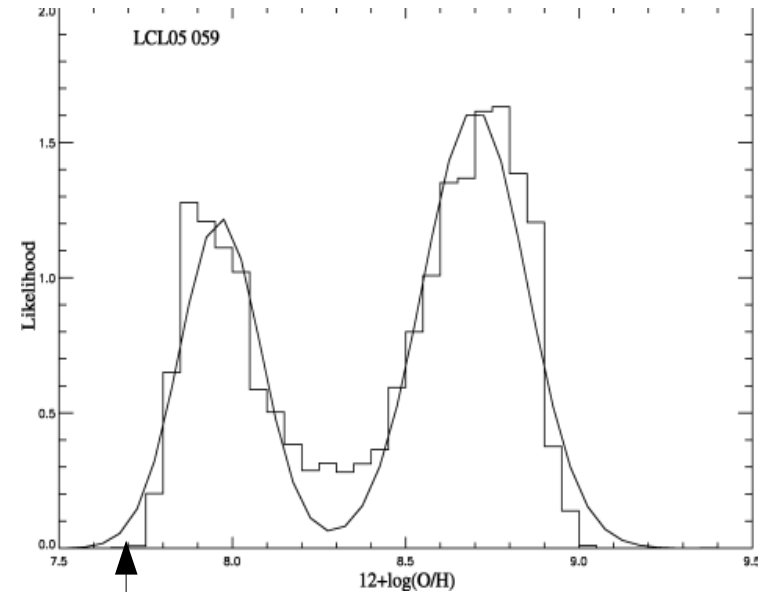
- Pour 75% des galaxies [NII] et H $\alpha$  sont en dehors du domaine spectral du spectroscopie



utilisation de la relation luminosité-métallicité de référence

- fiable si la différence est grande

- peu fiable dans la zone intermédiaire  
- mais pas d'influence sur le résultat final

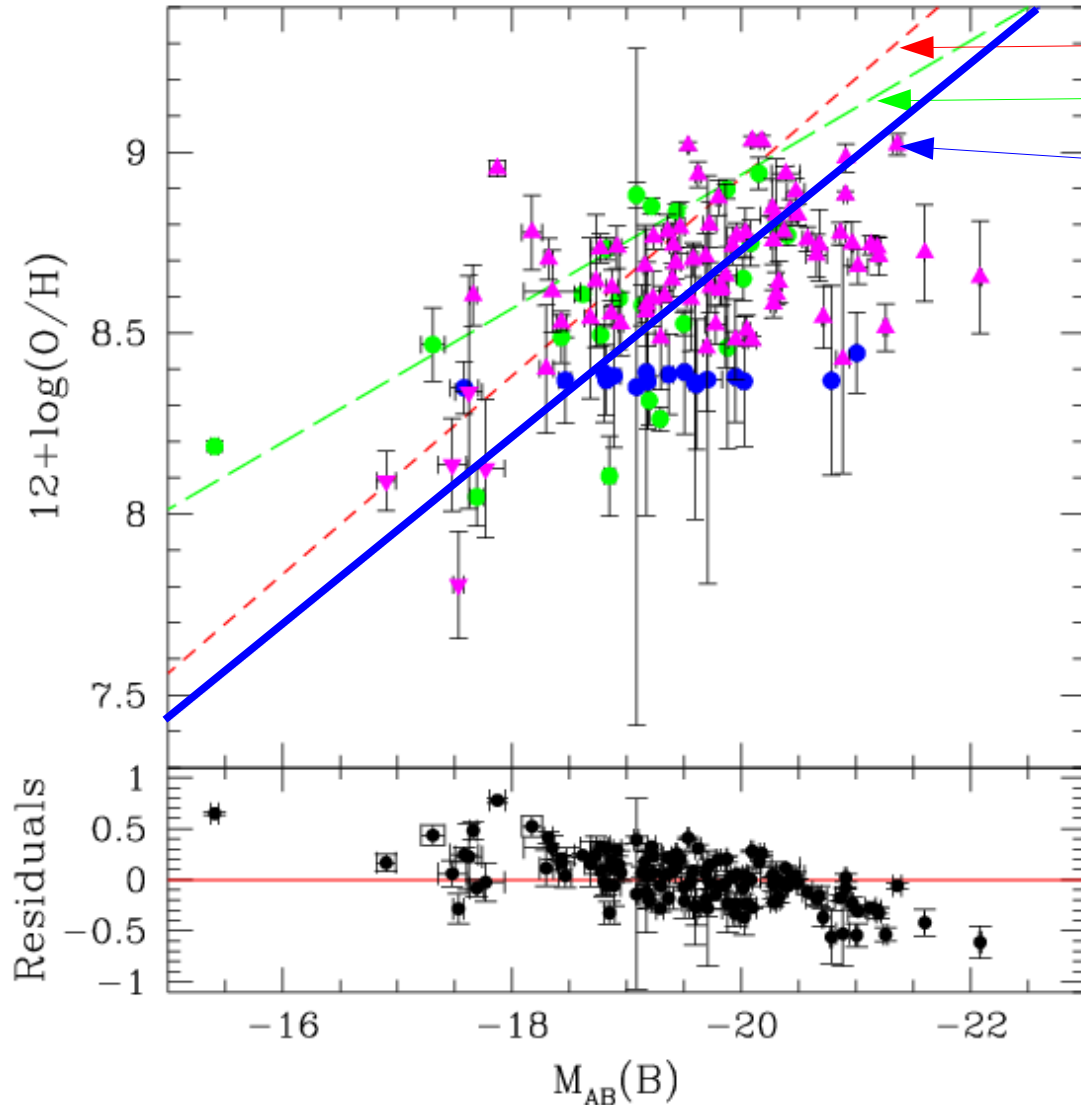


métallicités calculées avec l'optimisation bayésienne (Charlot & Longhetti 2001):

+ prise en compte de l'extinction et du degré d'ionisation  
+ choix du pic le plus probable

# La relation luminosité-métallicité

## La relation luminosité-métallicité à décalage spectral intermédiaire



relation standard 2dFGRS

relation standard SDSS

**estimation  
(Lamareille et al. 2006, A&A)**

- relation confirmée à décalage spectral intermédiaire

- pas d'évolution de la pente  
- pas d'évolution *significative* de la valeur moyenne

● métallicité avec l'indicateur  $[NII]/H\alpha$

● métallicité avec le diagnostique L:

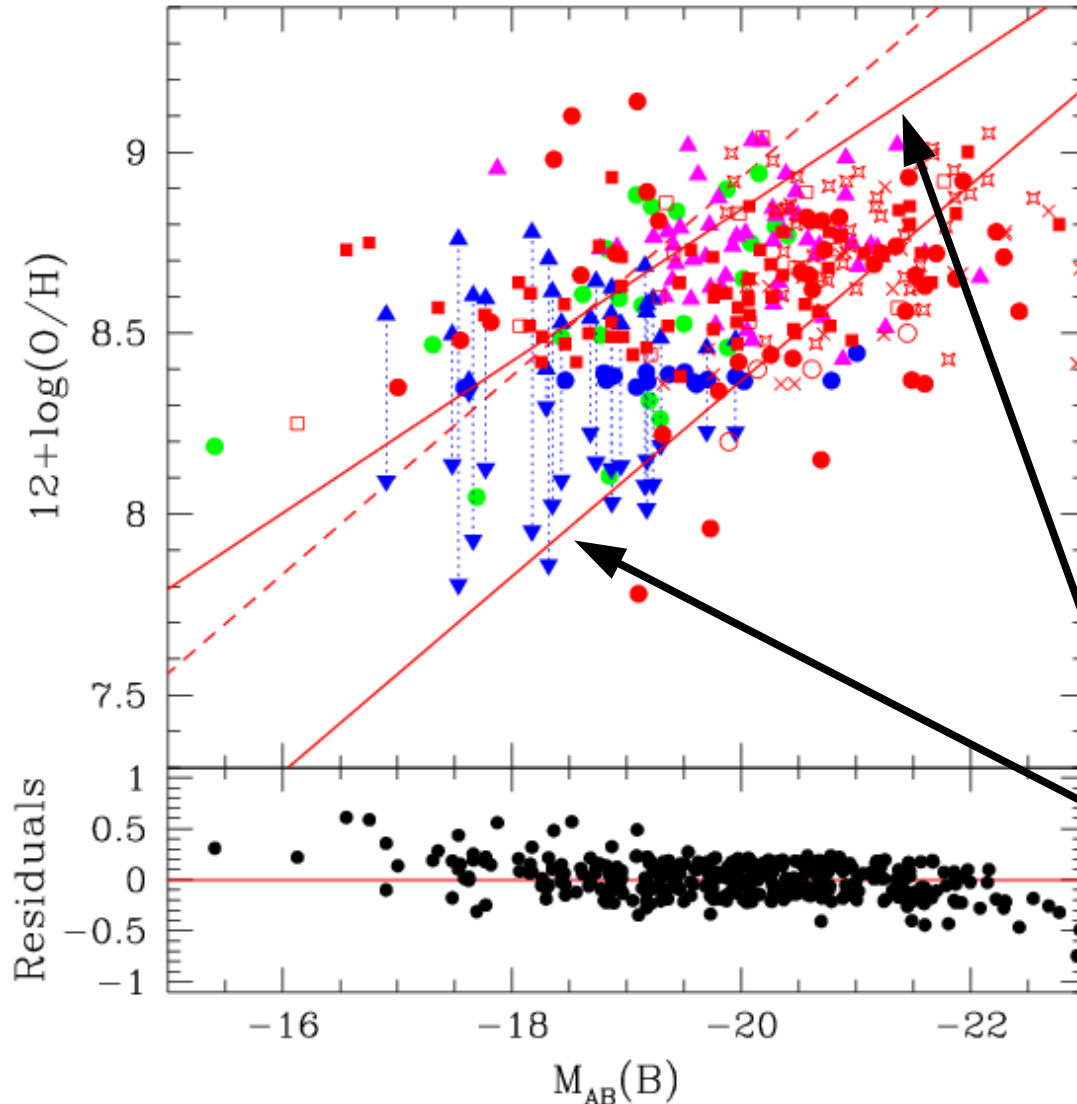
▲ forte métallicité

▼ faible métallicité

● objets de la région intermédiaire (rapport R23 limite)

# La relation luminosité-métallicité

## Comparaison avec d'autres échantillons



*en rouge:*

autres échantillons de galaxies  
à formation d'étoiles à décalage  
spectral intermédiaire  
(Kobulnicky et Zaritsky 1999, Kobulnicky  
et al. 2003, Hammer et al. 2001, Liang et  
al. 2004, Lilly et al. 2003, Contini et al. 2002)

**-> métallicité moyenne plus  
faible de 0,32 dex par rapport  
à l'univers local**

encadrement par deux  
ajustements limites:

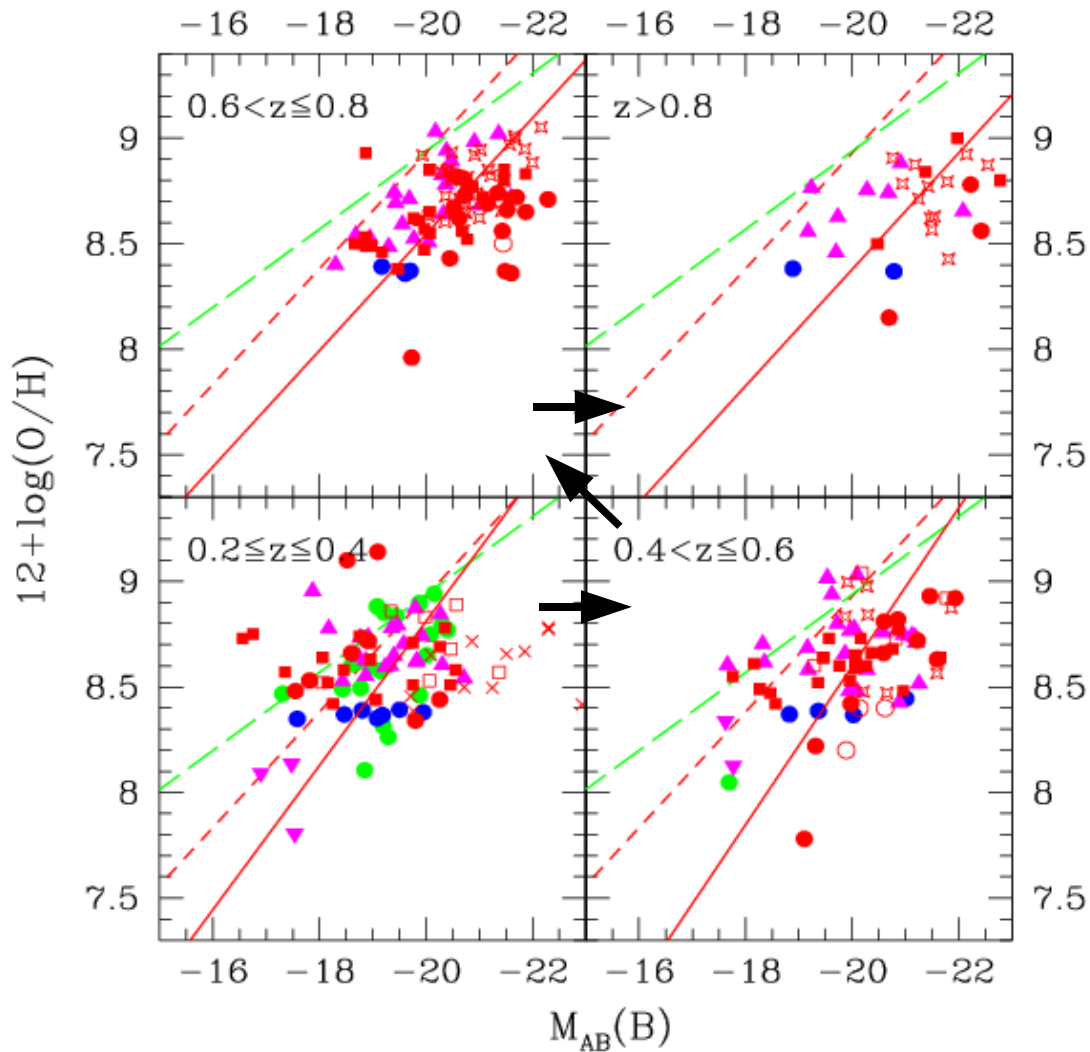
- galaxies riches en métaux
- galaxies pauvres en métaux

+ diminution de la dispersion avec  
la masse stellaire

-> potentiel gravitationnel plus fort

# La relation luminosité-métallicité

## Évolution en fonction du décalage spectral



- pas d'évolution significative de la pente
- calcul de la métallicité moyenne en supposant une pente constante
- en prenant en compte l'évolution en luminosité (Ilbert et al. 2005):

	log	lin
$0,2 < z < 0,4$	-0,08	1,17
$0,4 < z < 0,6$	-0,14	0,93
$0,6 < z < 0,8$	-0,14	0,83
$0,8 < z < 1,0$	-0,28	0,64

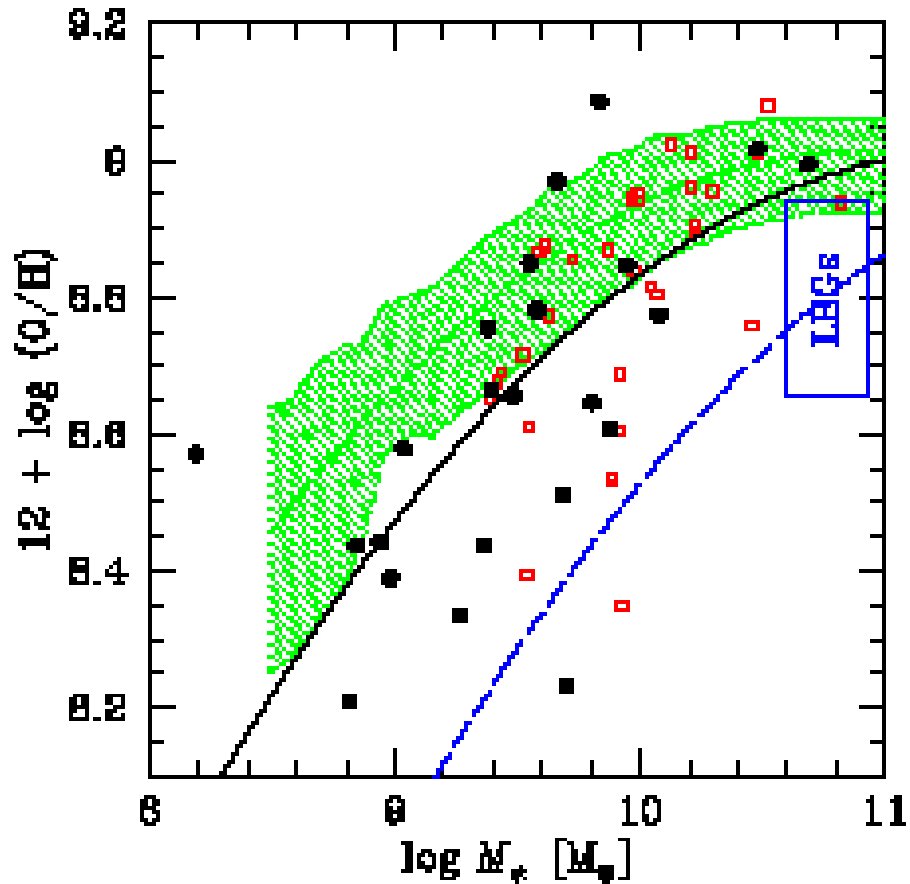
-> les galaxies à  $z \sim 1,0$  (environ 8 milliards d'années) contiennent 2/3 des métaux contenus dans les galaxies similaires proches

**-> contrainte forte sur les modèles d'évolution chimique**



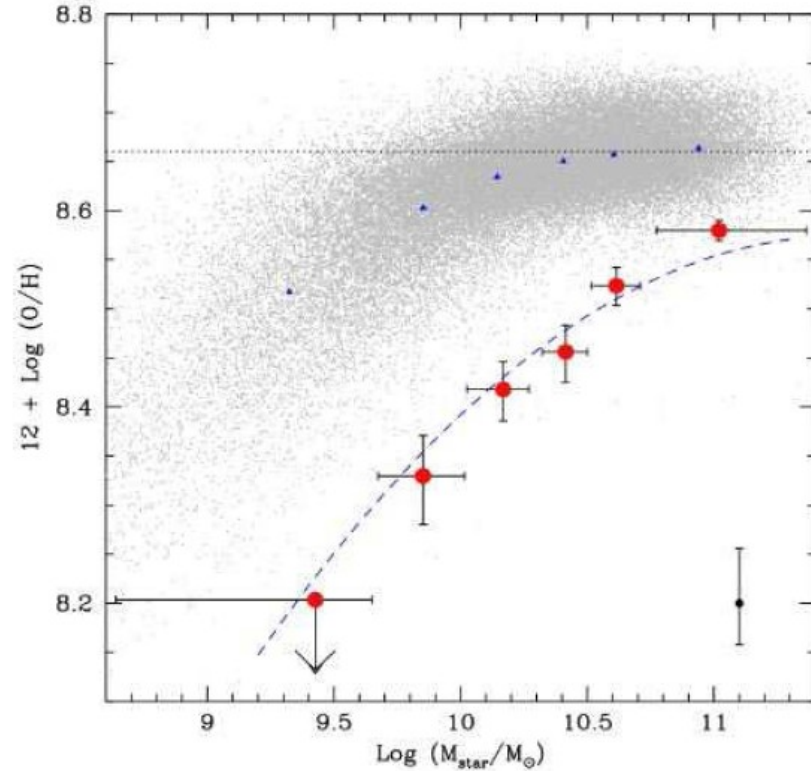
# La relation masse-métallicité

## Autres études portant sur de petits échantillons



GDDS:  $z \sim 0,7$  (Savaglio et al. 2005)

- métallicité plus faible en moyenne
- pente plus forte -> **boîte fermée**

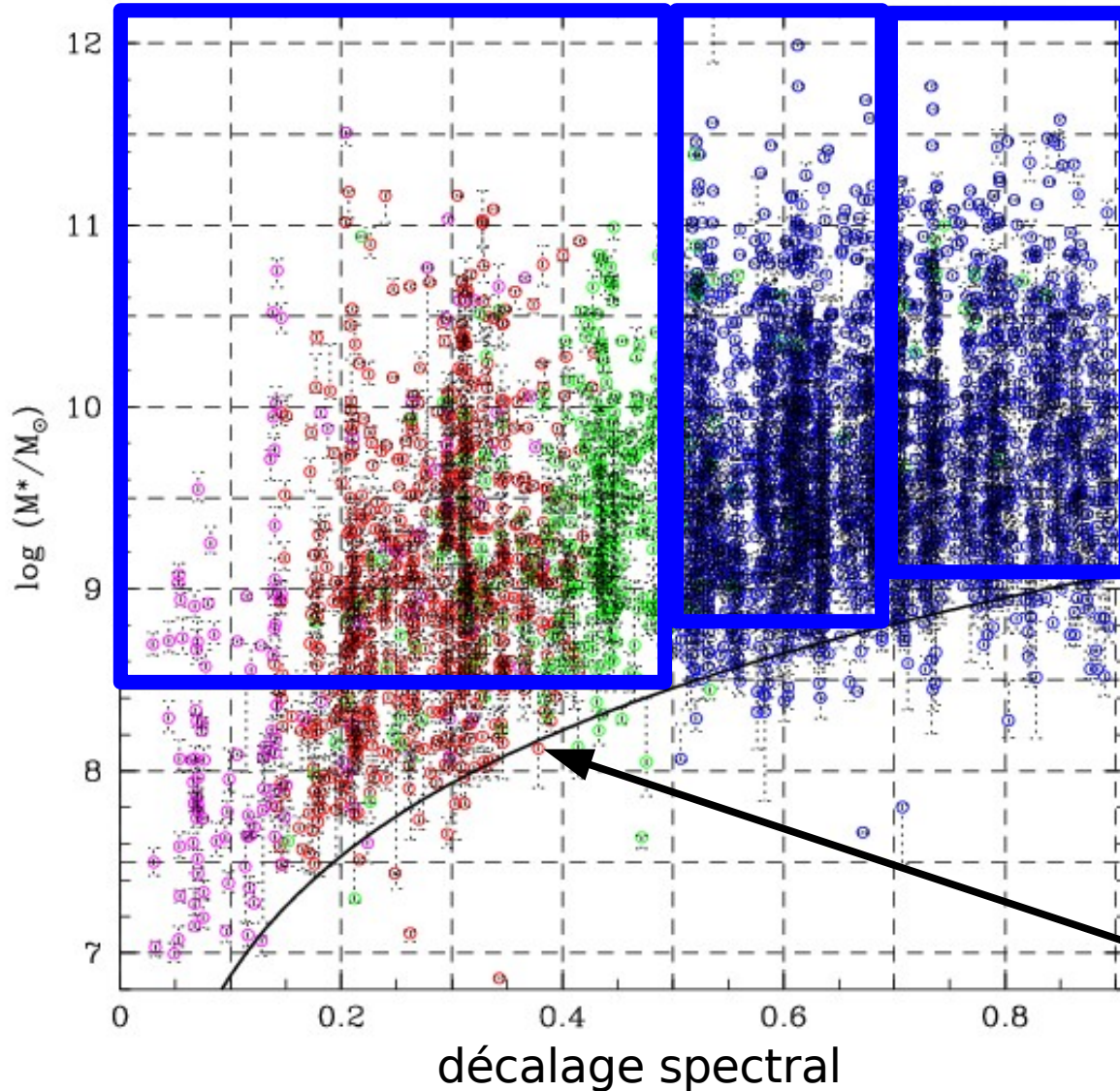


galaxies observées en IR:  $z \sim 2$   
(Erb et al. 2006)

- métallicité plus faible de 0,5 dex
- taux de production effectif plus faible pour les galaxies massives
- > **boîte ouverte**

# La relation masse-métallicité

## Les masses des galaxies du VVDS



- déterminées avec une grande précision par optimisation bayésienne des points photométriques (visible+IR)

- on définit trois échantillons limités en masse et en volume:

$0,0 < z < 0,5$ :  $\log(M^*) > 8,45$

$0,5 < z < 0,7$ :  $\log(M^*) > 8,8$

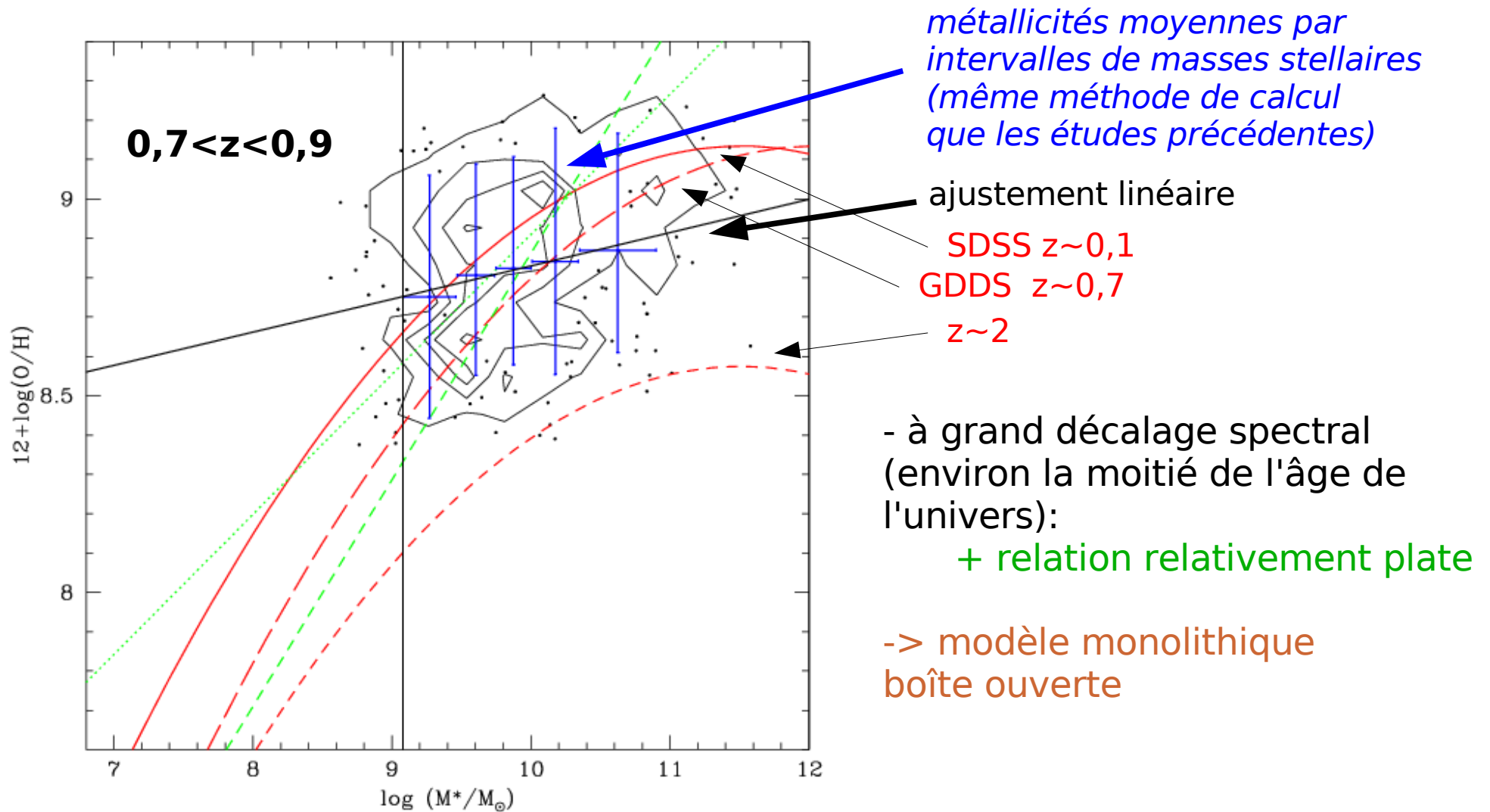
$0,7 < z < 0,9$ :  $\log(M^*) > 9,1$

- **pour  $z > 0,9$ : les raies nécessaires à la mesure de la métallicité ne sont plus visibles**

*courbe de l'effet de sélection en magnitude apparente*

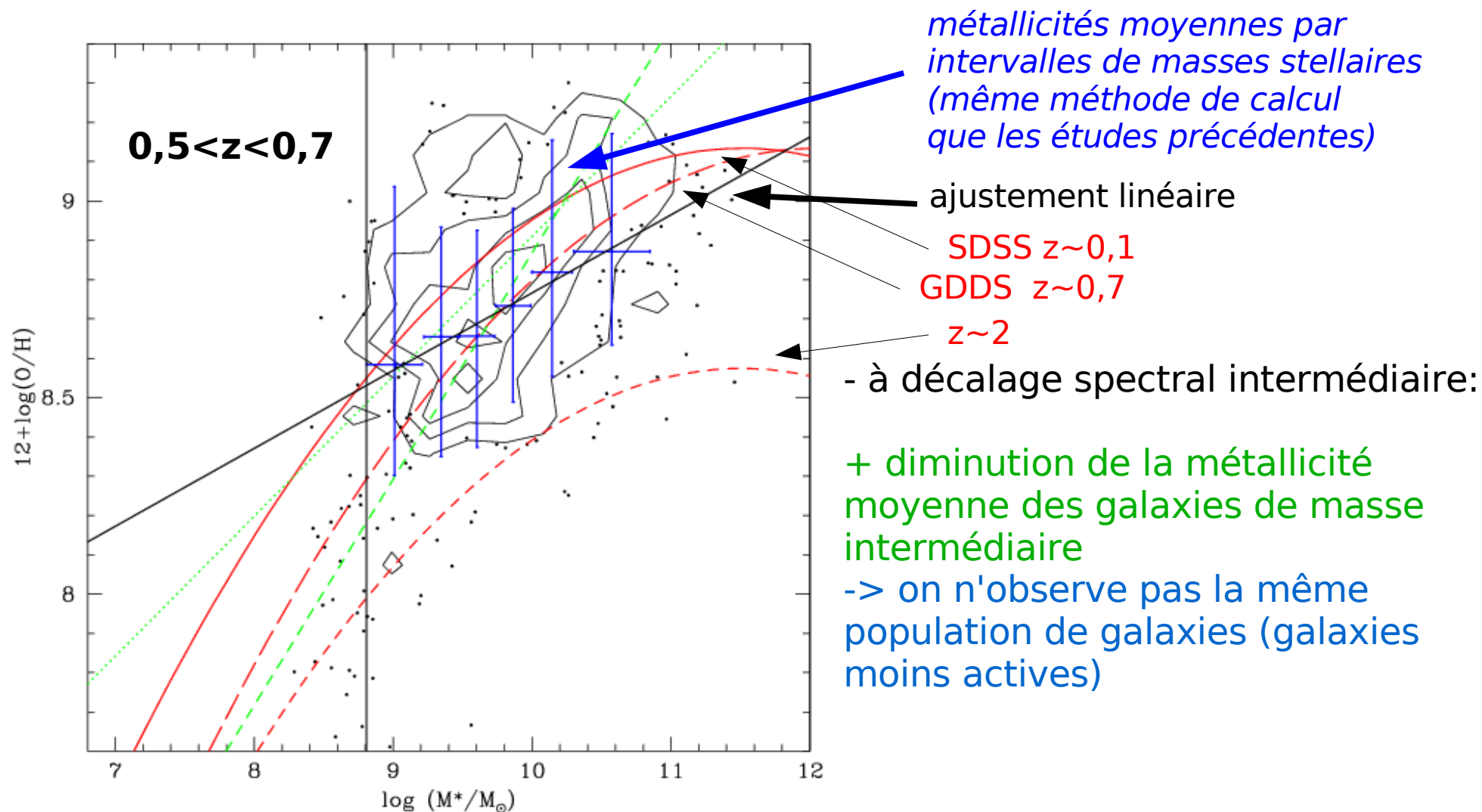
# La relation masse-métallicité

## Évolution de la relation masse-métallicité dans l'Univers distant



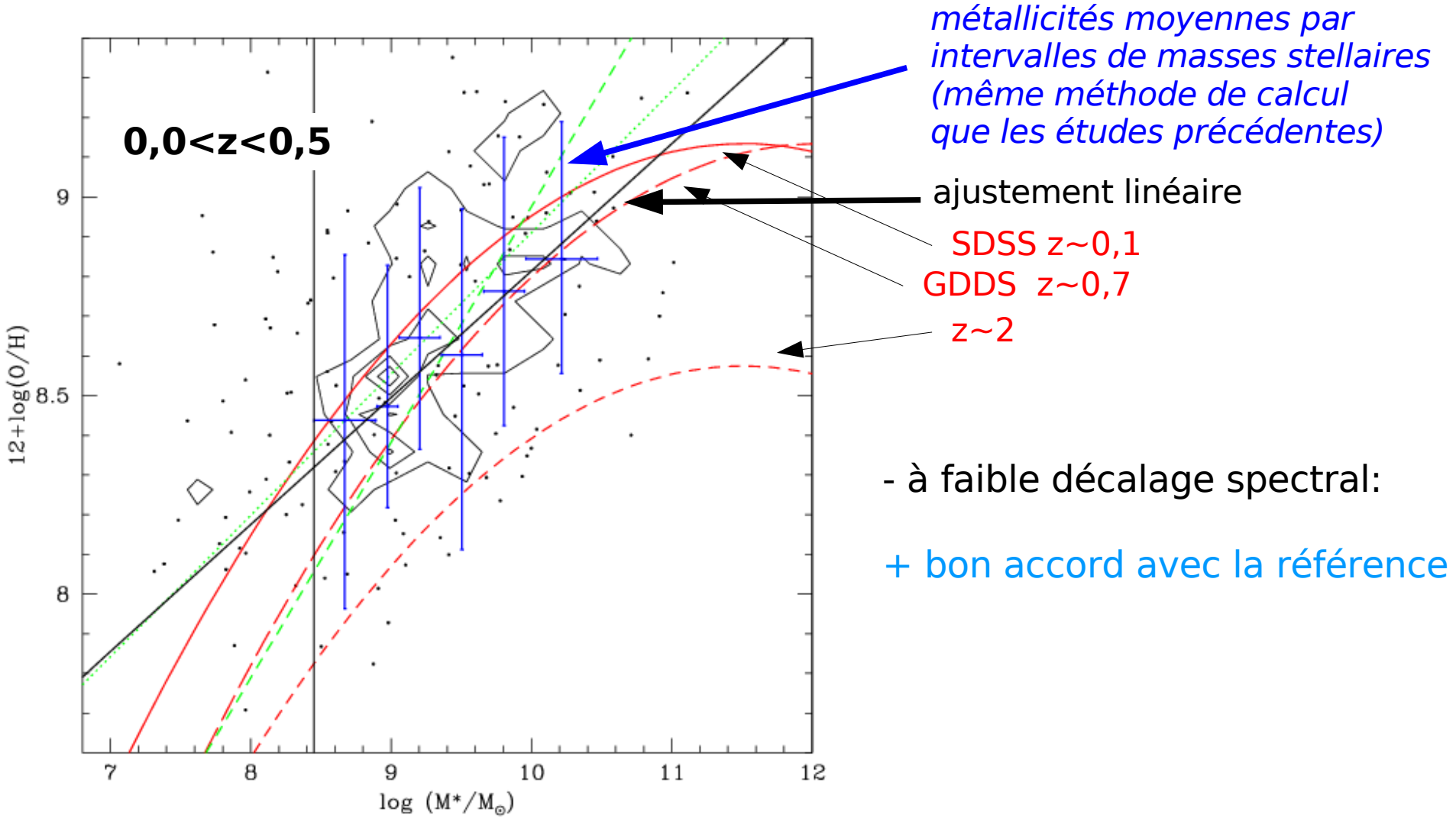
# La relation masse-métallicité

## Évolution de la relation masse-métallicité dans l'Univers distant



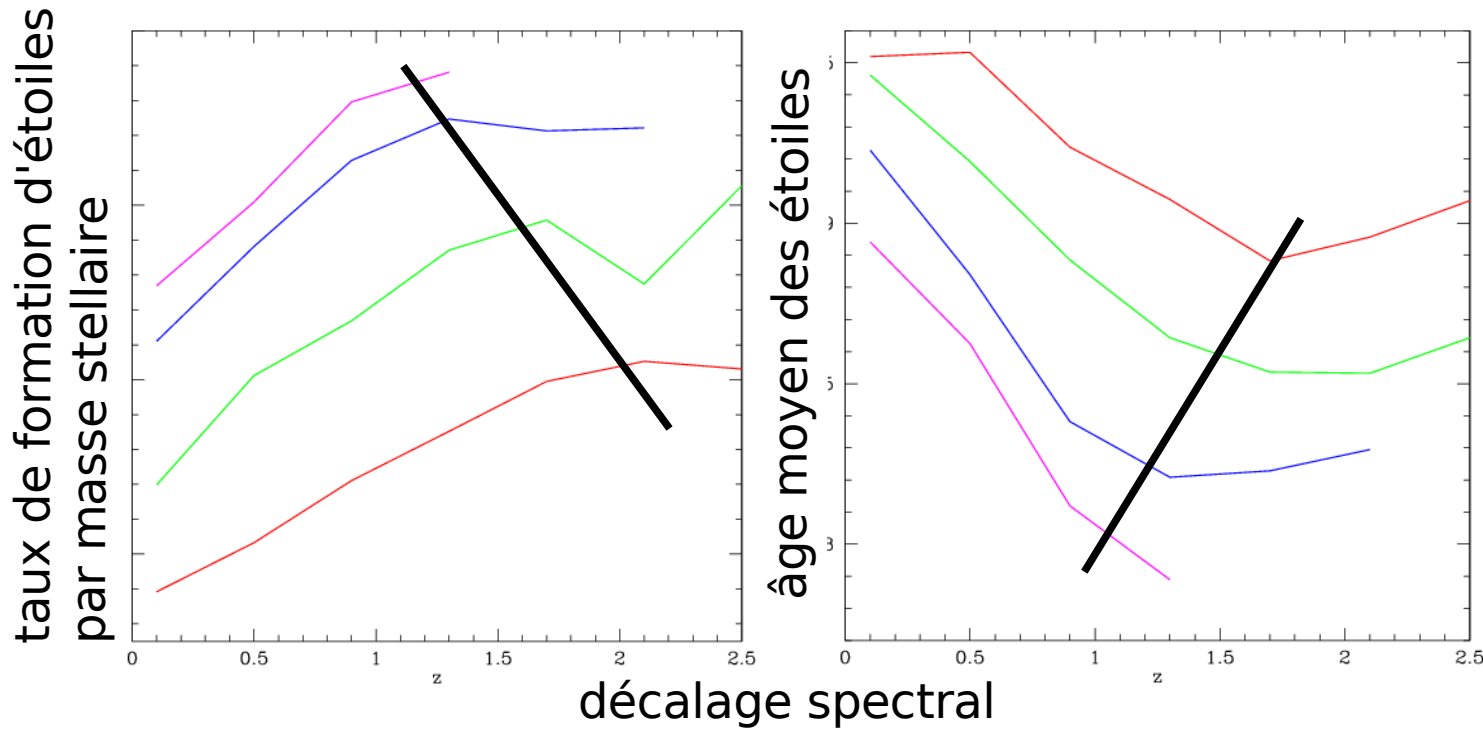
# La relation masse-métallicité

## Évolution de la relation masse-métallicité dans l'Univers distant



# Interprétation

## La réduction de masse caractéristique



$8 < \log(M^*) < 9$   
 $9 < \log(M^*) < 10$   
 $10 < \log(M^*) < 11$   
 $11 < \log(M^*) < 12$

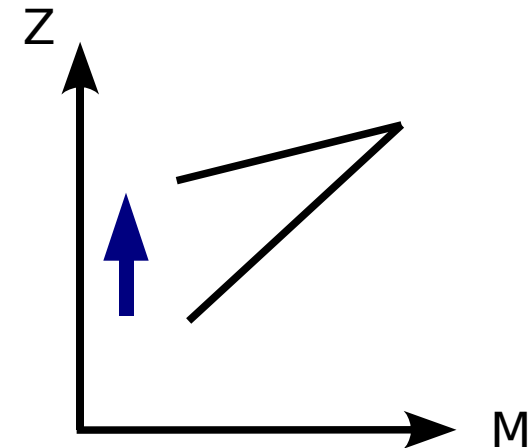
- + Le **taux de formation d'étoiles** était plus fort et l'**âge moyen** plus faible *dans le passé*
- + Le maximum et le minimum sont situés plut tôt dans l'histoire des galaxies les plus massives

# Interprétation

## La réduction de masse caractéristique

### Conséquence sur l'évolution de la relation M-Z:

- pour  $z < 2,0$ :
  - > les galaxies massives sont déjà formées
  - > les galaxies naines évoluent
- dans l'hypothèse monolithique boîte fermée:  
augmentation de la métallicité des galaxies naines  
-> pente plus importante dans le passé



**nous observons une pente plus faible à grand décalage spectral**

**-> indice en faveur du modèle hiérarchique  
(taux de production effectif faible des galaxies naines)**

**-> diminution de l'activité des galaxies de masse intermédiaire  
pour  $z < 1,0$  en accord avec la réduction de masse caractéristique**



Objectifs

Données

Méthodes  
Outils

Univers  
local

Univers  
distant

**Conclusions  
Perspectives**

# ***Conclusions et perspectives***





## Résultats obtenus durant cette thèse

- Étude la relation masse-métallicité / luminosité-métallicité et de son évolution:

**outils puissant pour tester les modèles de formation et d'évolution des galaxies**

- + **première** référence statistique dans l'univers local (2dFGRS)
- + nombreux **indices** en faveur du modèle hiérarchique:
  - > passage du modèle boîte ouverte au modèle boîte fermée avec la masse stellaire
  - > relation plus plate à grand décalage spectral
- + **contraintes quantitatives** sur les modèles d'évolution chimique



## Résultats obtenus durant cette thèse

### - Autres résultats:

+ nouvelle **classification spectrale** pour distinguer les galaxies à noyaux actifs des galaxies à formation d'étoiles

+ nouvelle **calibration** du taux de formation d'étoiles

+ adaptation du **logiciel** «platefit\_VVDS» et développement du **logiciel** «Galaxie»

+ mesure des **propriétés physiques** des galaxies du relevé VVDS



# Perspectives

## Perspectives pour le VVDS:

- Étude de la relation **masse-métallicité** en fonction d'autres paramètres (**environnement**, histoire de formation stellaire, ...)
- Étude de l'évolution du **taux de formation d'étoiles spécifique** en fonction du décalage spectral
- Nombreuses applications du **catalogue de mesures** des indices spectraux et des paramètres physiques (catalogue maintenu à Toulouse)



## Perspectives

- Observations en cours avec SINFONI (spectroscopie intégrale de champ dans le domaine infrarouge installé au VLT)  
(Lemoine-Busserole et al.)

+ mesure des métallicités et des taux de formation d'étoiles des galaxies à **grand décalage spectral** ( $z > 1,0$ )

+ mesure directe de la **masse dynamique** des galaxies (potentiel gravitationnel)

- Le grand relevé zCOSMOS (Lilly et al.) est en cours de réalisation

+ utilisation des mêmes logiciels d'analyse pour déterminer les propriétés physiques des galaxies

+ études des relations physiques en fonction de la **morphologie** (observée avec le télescope spatial Hubble)

-> Post-doc à Bologne