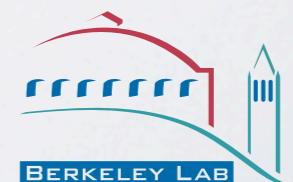


Analyse spectrale des données SNFactory



The Nearby Supernovae Factory

Arnaud CANTO
LPNHE Paris
JJC 2010



PLAN DE L'EXPOSÉ

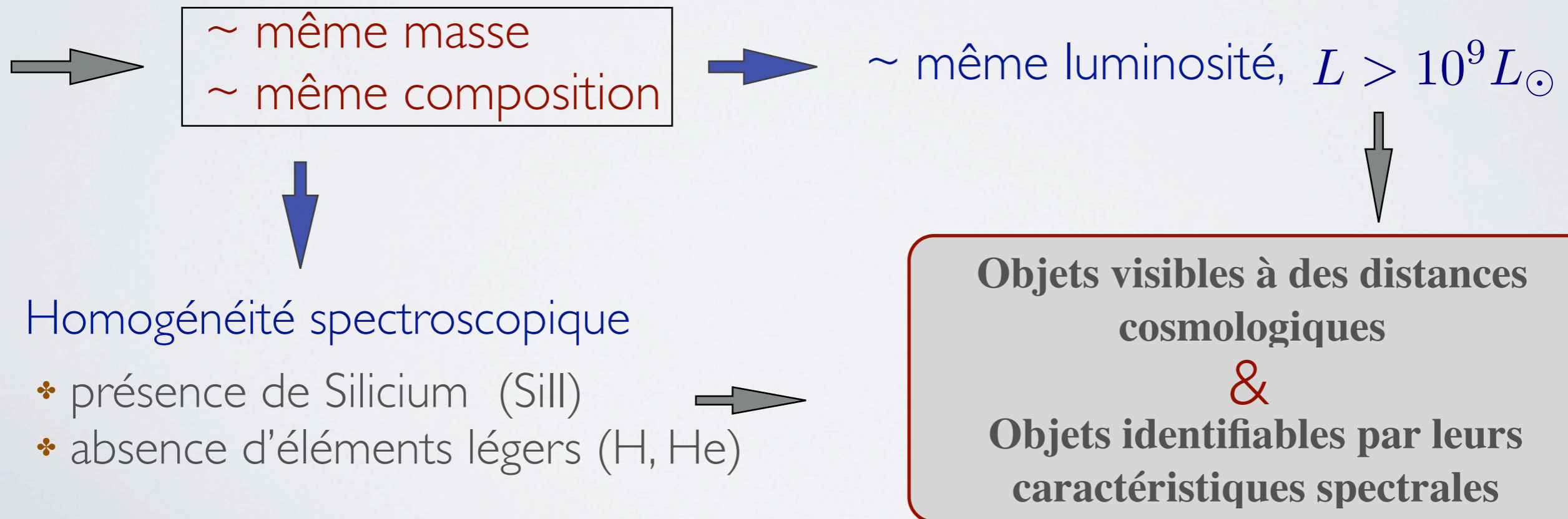
- ❖ Supernovae de type Ia et cosmologie
 - ❖ Modèle d'explosion des SNIa
 - ❖ Chandelles standardisables
 - ❖ Cosmologie observationnelle
- ❖ The Nearby Supernovae Factory
- ❖ Analyse spectrale figures d'absorption
 - ❖ Indicateurs spectraux
 - ❖ Relations de couleur

MODÈLE D'EXPLOSION

- ★ Naine blanche (C+O) en système binaire serré accrétant la masse de son compagnon
- ★ approche la masse limite de Chandrasekhar ($\sim 1,4 M_{\odot}$)
- ★ augmentation de la température (pression de dégénérescence reste cste)
- ★ déclenchement et emballement de la fusion thermonucléaire du C et O donnant **Ni, Si, S, Ca**



Vue d'artiste



MODÈLE D'EXPLOSION DES SNIA

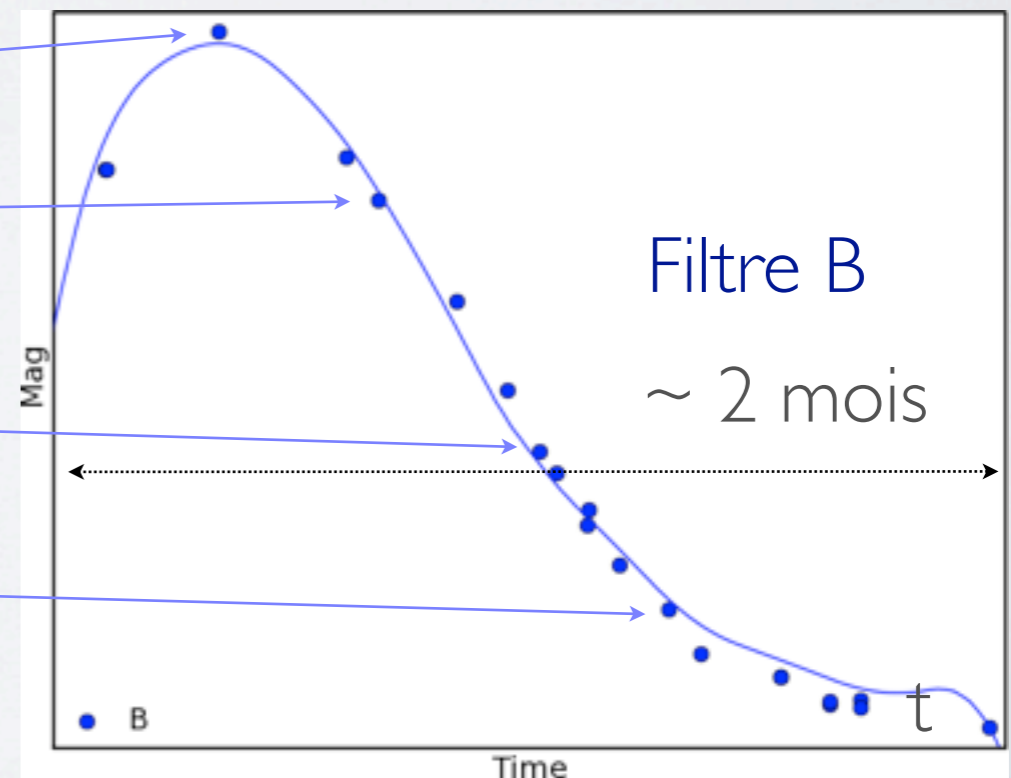
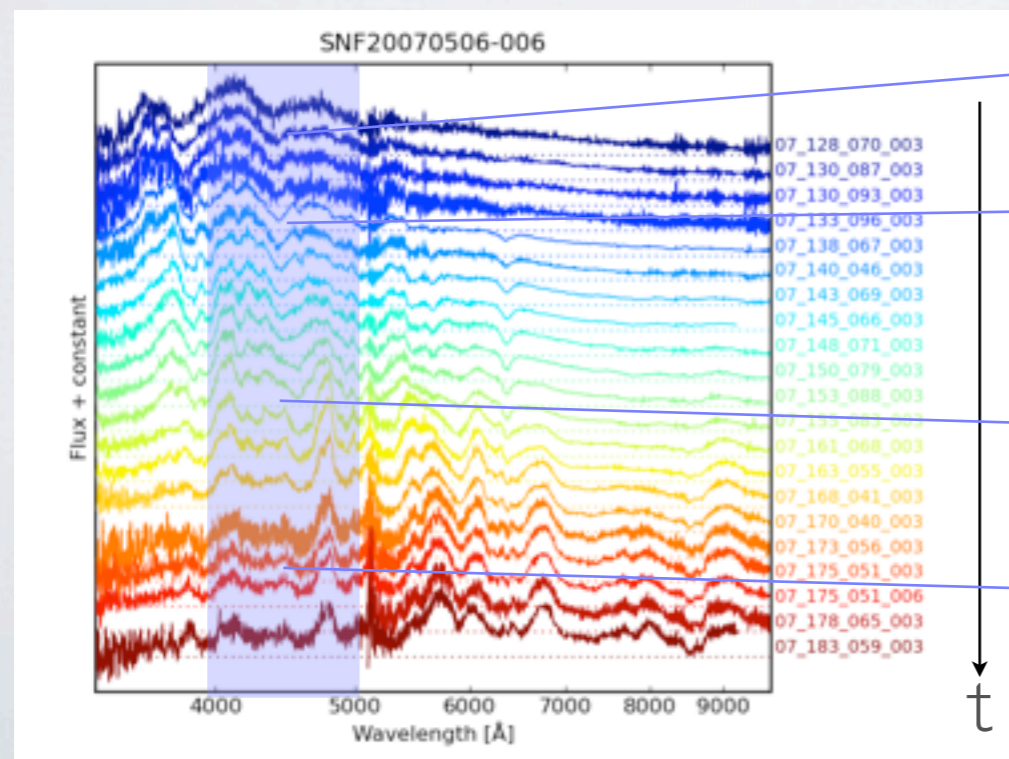
Évolution de l'opacité de l'enveloppe en expansion et du taux de désintégration nucléaire dans le coeur de la SN :

- ❖ Évolution de la contribution des différents éléments dans le spectre: **série temporelle**
- ❖ Évolution de la luminosité: **courbe de lumière**, décroissance liée aux périodes radioactives des éléments présents dans le coeur de la SN la



série temporelle

courbe de lumière



Expansion de l'enveloppe



Diminution de l'opacité



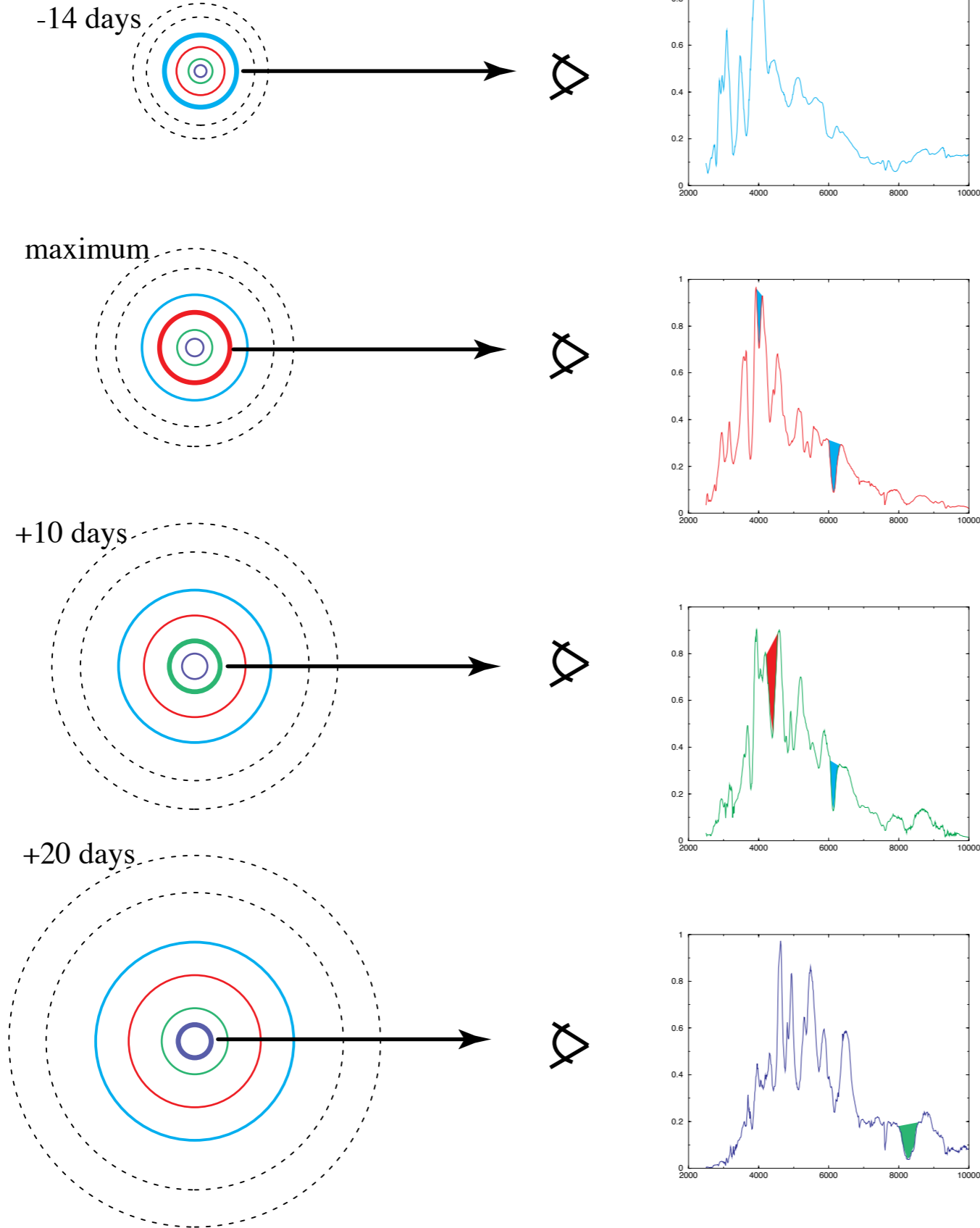
Accès aux couches profondes de la SNIa



Accès aux éléments les plus profonds



Évolution du spectre observé



Typical SN Ia Spectral Feature at max



SNEIA : CHANDELLES STANDARDISABLES

- ❖ **L'homogénéité** des SNe Ia au moment de l'explosion leur confère le caractère de **chandelles quasi-standards**
- ❖ Sources de **variabilité intrinsèques** à chaque SN Ia (stretch):
 - ❖ lieu d'allumage des réactions nucléaires et propagation turbulente de la flamme de combustion
 - ❖ composition du progéniteur?
- ❖ Source de **variabilité extrinsèque**:
 - ❖ absorption du milieu interstellaire de la galaxie hôte (couleur)

supernova 1994D



→ Dispersion d'environ 40% sans aucune correction

Possibilités de réduire la dispersion par des **corrections empiriques**

STANDARDISATION PAR LA PHOTOMÉTRIE

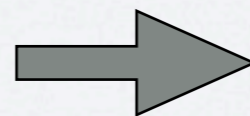
- ❖ SALT2 : Paramétrisation empirique d'ajustement de courbe de lumière de SNIa déterminant 3 paramètres par SN :
 - ❖ m_b , magnitude B au maximum
 - ❖ x_l , correction de stretch (Étirement)
plus large = plus brillante (intrinsèque)
 - ❖ c , correction de couleur (B-V)
plus bleue = plus brillante (extinction)

Diminution de la dispersion moyenne après correction de stretch et de couleur :

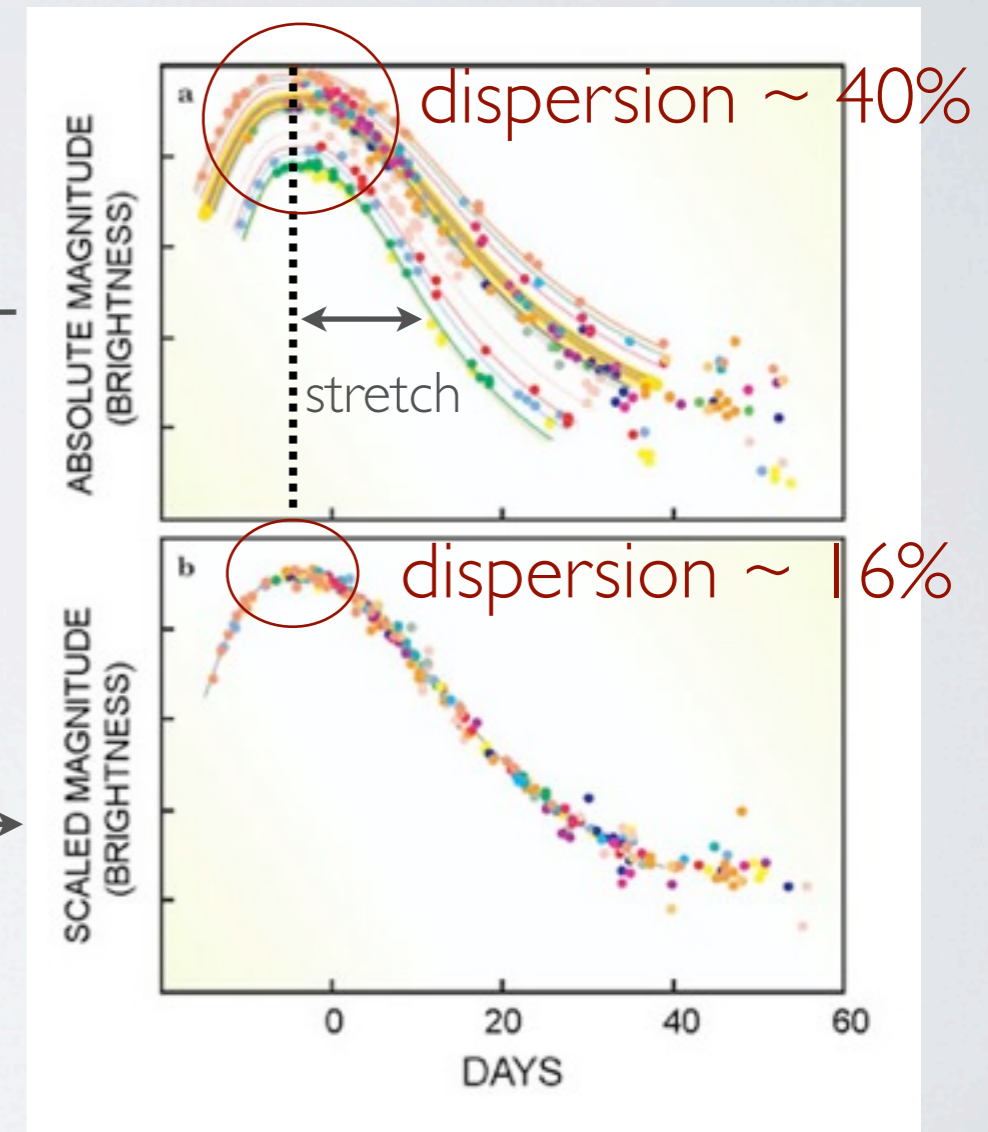
Chandelles standardisables

&

Objets visibles à des distances cosmologiques



Utilisation en Cosmologie



Cosmologie et SNIa

❖ Cosmologie observationnelle avec des **chandelles standard**:

- ♦ mesure du décalage vers le rouge (*redshift*) des SNIa
- ♦ mesure de la *magnitude apparente* des SNIa

magnitude absolue des SNIa

$$\mu_B = m_B - M_B = 5 \log(d_L) - 5$$

module de distance

♦ distance de luminosité

redshift

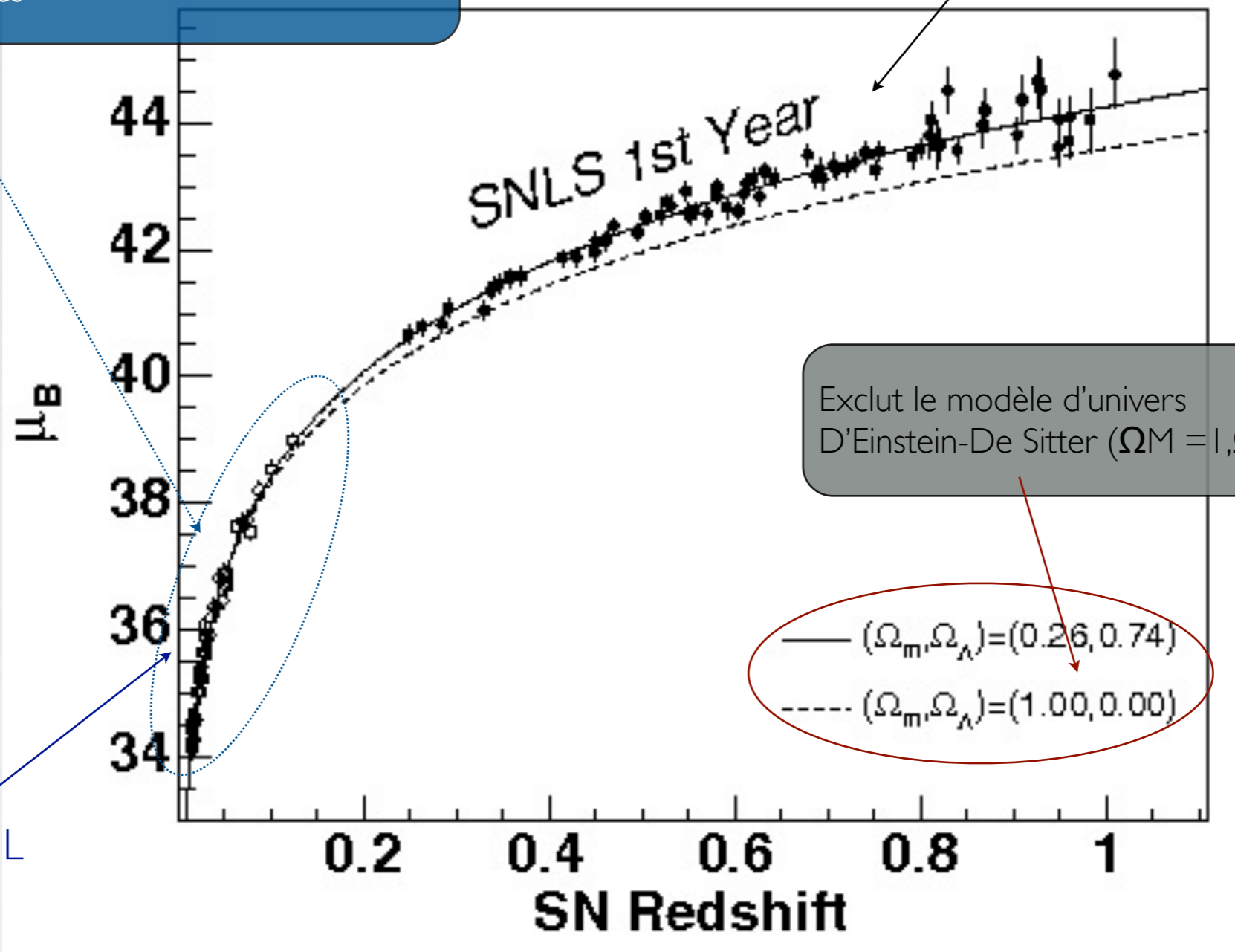
$$d_L = \frac{1 + z}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\sum_i \Omega_i^{(0)} (1 + z')^{3(1 + \omega_i)}}$$



Paramètres cosmologiques

SNe lointaines mesurent l'expansion et les paramètres cosmologiques

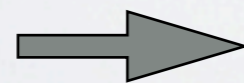
Seulement 44 SNe à bas décalage vers le rouge dans ces données



Exclut le modèle d'univers D'Einstein-De Sitter ($\Omega_M = 1, \Omega_\Lambda = 0$)

SNe proches contraignent le luminosité absolue L

Étude des SNe Ia à faible décalage vers le rouge utile pour diminuer les erreurs systématiques : besoin d'une bonne statistique



Nearby Supernova Factory

COSMOLOGIE OBSERVATIONNELLE

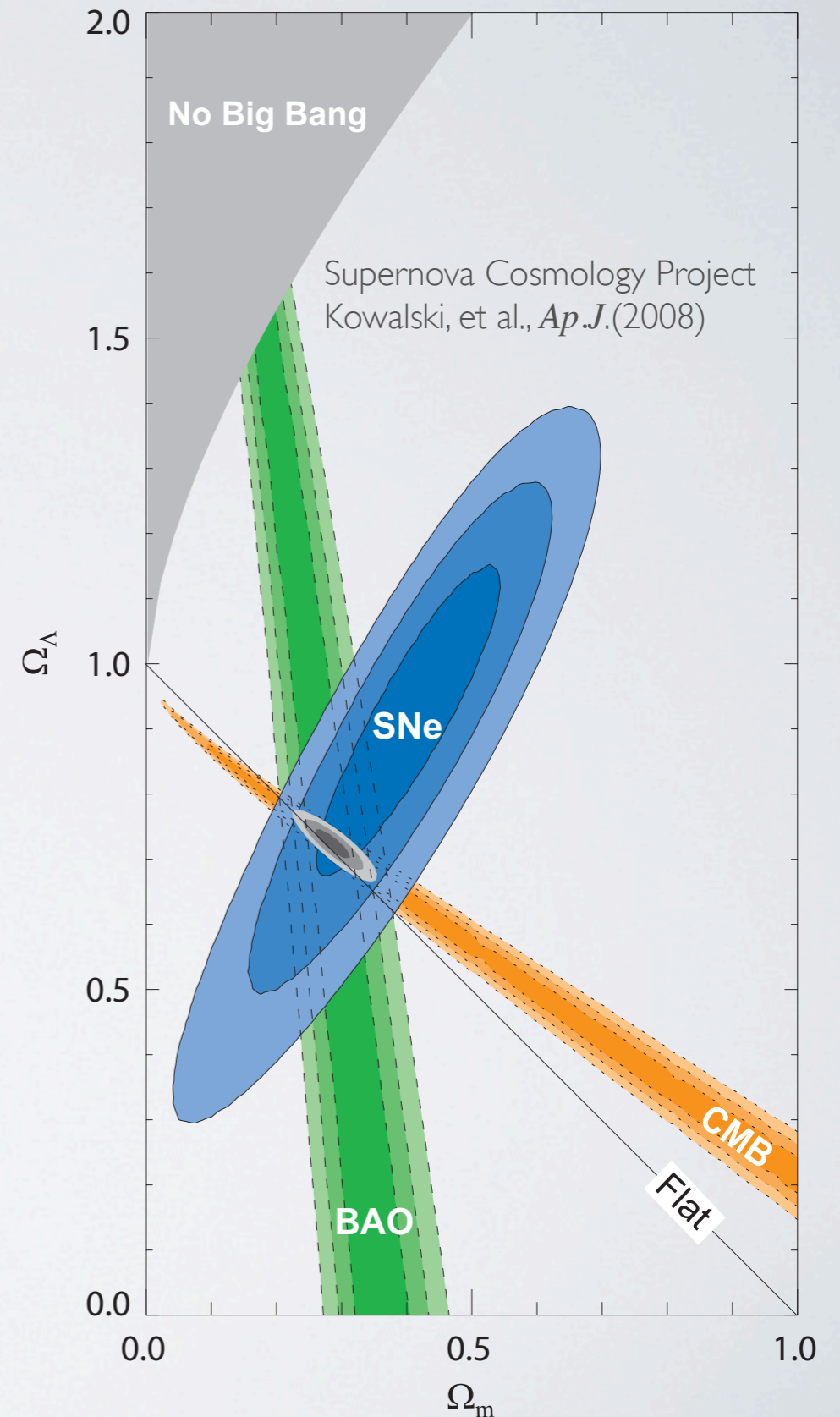
Trois méthodes principales
(SNe, BAO, CMB) donnent:

$$\Omega_M \approx 0.285 \pm 0.030$$

$$\Omega_\Lambda \approx 0.73 \pm 0.04$$

kowalski 08

- ❖ Ω_M densité de matière
- ❖ Ω_Λ densité d'énergie noire
- ❖ $w = p/\rho = -1.001 \pm 0.015$



SNFACTORY : LA COLLABORATION



~30 personnes dans 6 laboratoires
LPNHE: 2 chercheurs, 1.5 doctorant

SNFACTORY : OBJECTIFS

- ❖ Augmenter l'échantillon de SNIa proches ($0,01 < z < 0,12$) pour améliorer la **statistique** utilisée
- ❖ Engendrer un large échantillon de séries temporelles étalonnées en flux pour améliorer le contrôle des **systematiques** et la standardisation
- ❖ Améliorer la compréhension de la **physique** entourant les SNIa:
 - ❖ contraintes sur les **modèles d'explosion**,
 - ❖ types de **progéniteurs**,
 - ❖ **environnement**, caractéristiques de l'hôte (extinction)

SNFACTORY : OBSERVATIONS

I. Découverte

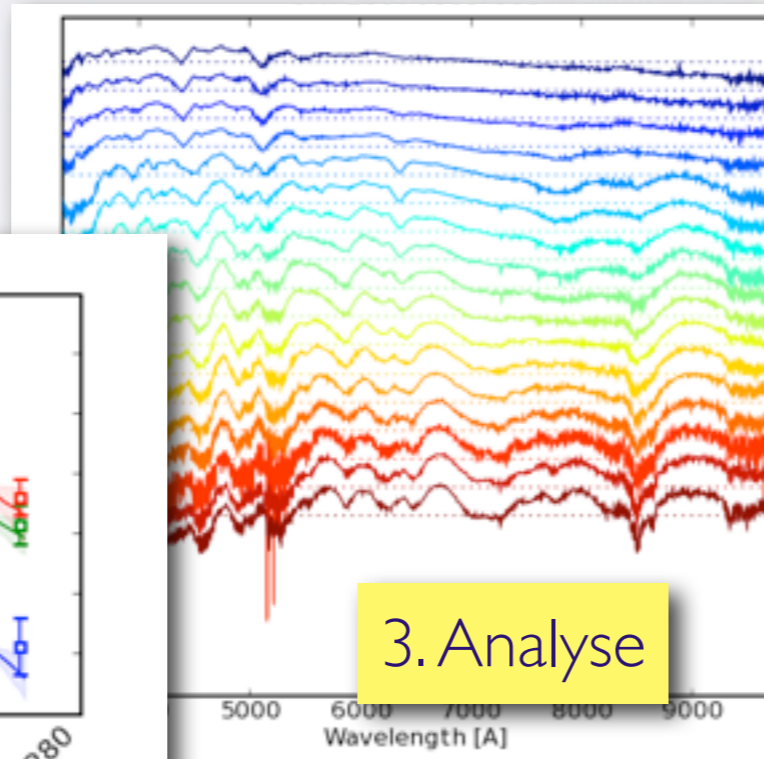


Terminée fin 2008



= $\sim 10^{-7}$ de la surface observée par nuit

couverture spectrale:
3000-10000 Å [SN2009ig](#)

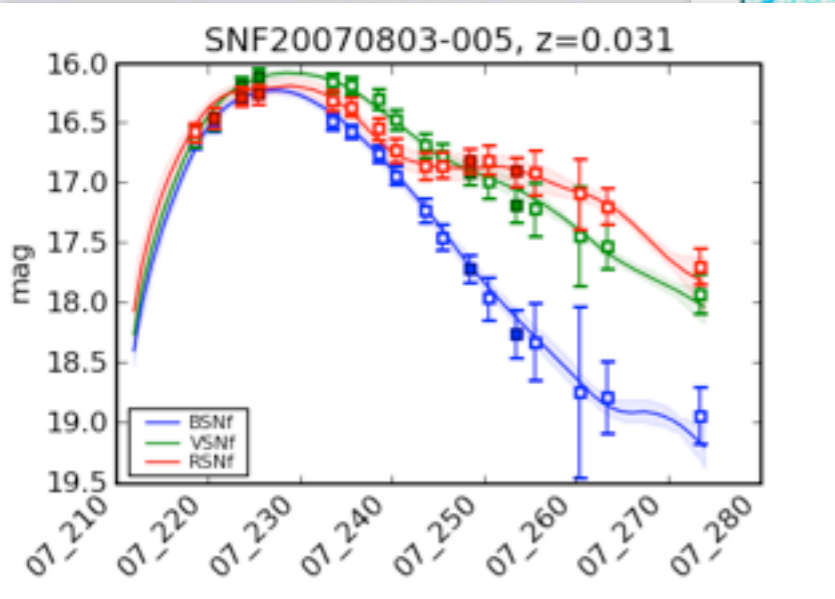


2. Observation

Typage et suivi des objets

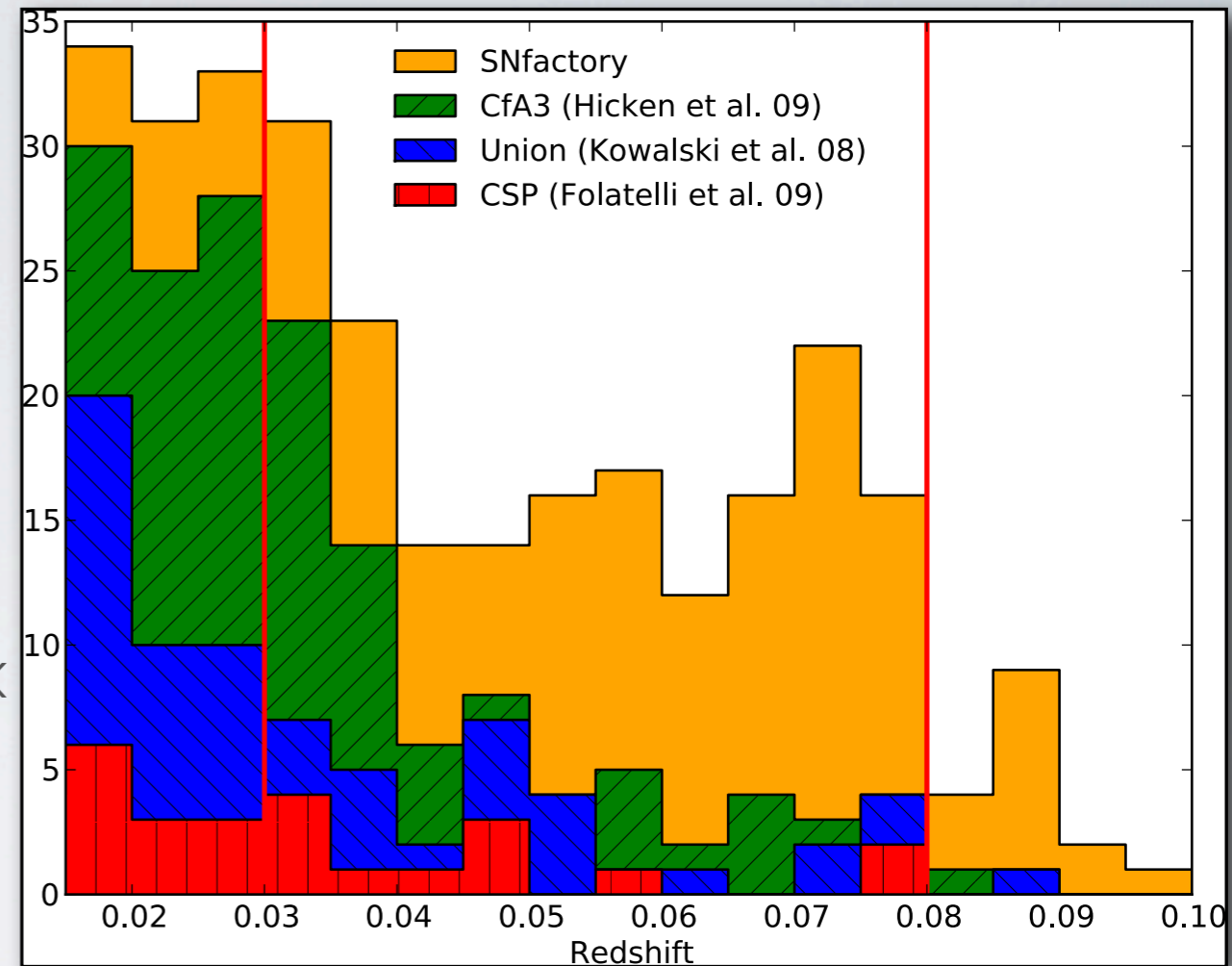


Spectromètre unique conçu pour les observations de SNe proches



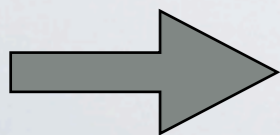
SNFACTORY : LES DONNÉES

- ❖ ~195 SNeIa, ~15 spectres par SN
- ❖ ~ 3500 spectres de -15 a +40 jours / max
- ❖ ~180 spectres proches du max (+/- 2.5 j)



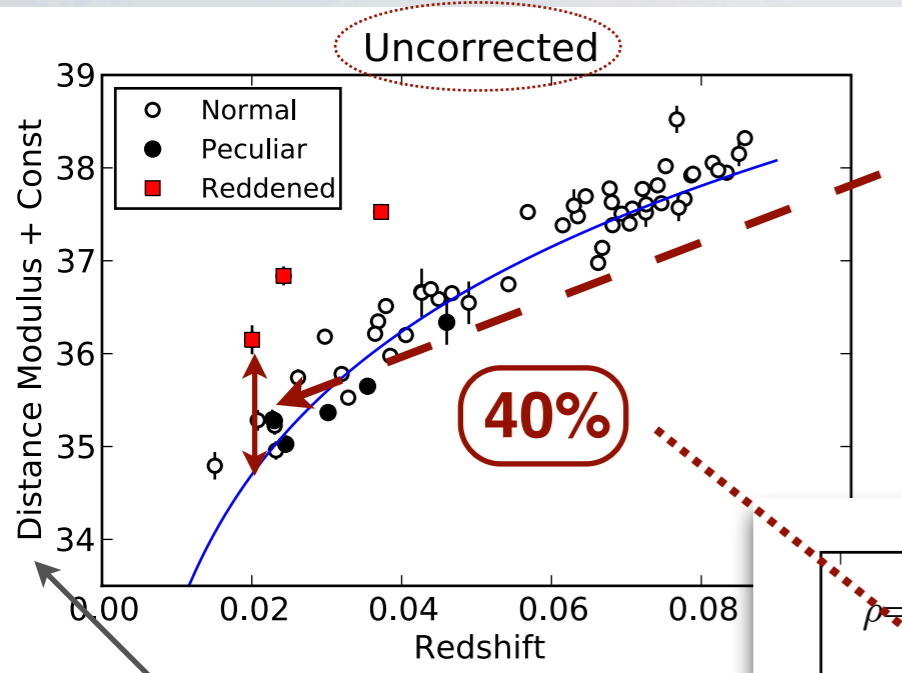
❖ Actuellement:

- ❖ 58 objets pour lesquels seront déterminés avec le modèle SALT2:
 - ♦ magnitude au maximum dans le filtre B
 - ♦ paramètre de stretch (x_1) (diversité des objets)
 - ♦ paramètre de couleur (c) (absorption galaxie hôte)



Analyse primaire des 58 spectres proches du maximum
Comparaison des données spectrales aux paramètres SALT2

Diagramme de Hubble proche

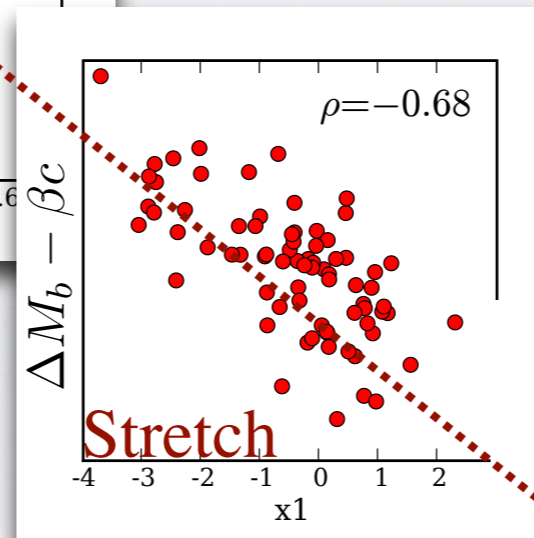
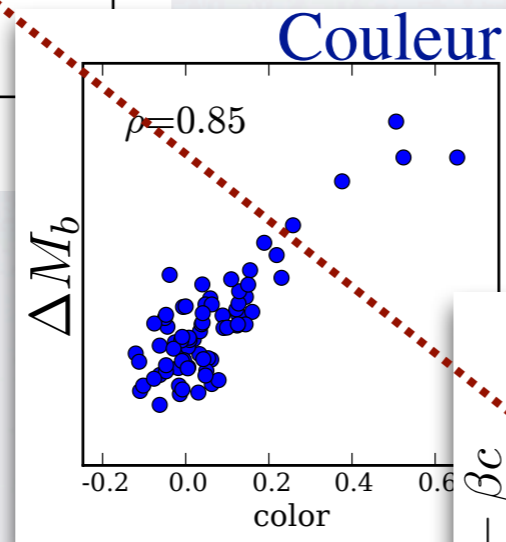


$\Delta M_b \longrightarrow$ Écart à la courbe de Hubble

Corrections classiques:

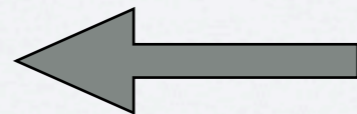
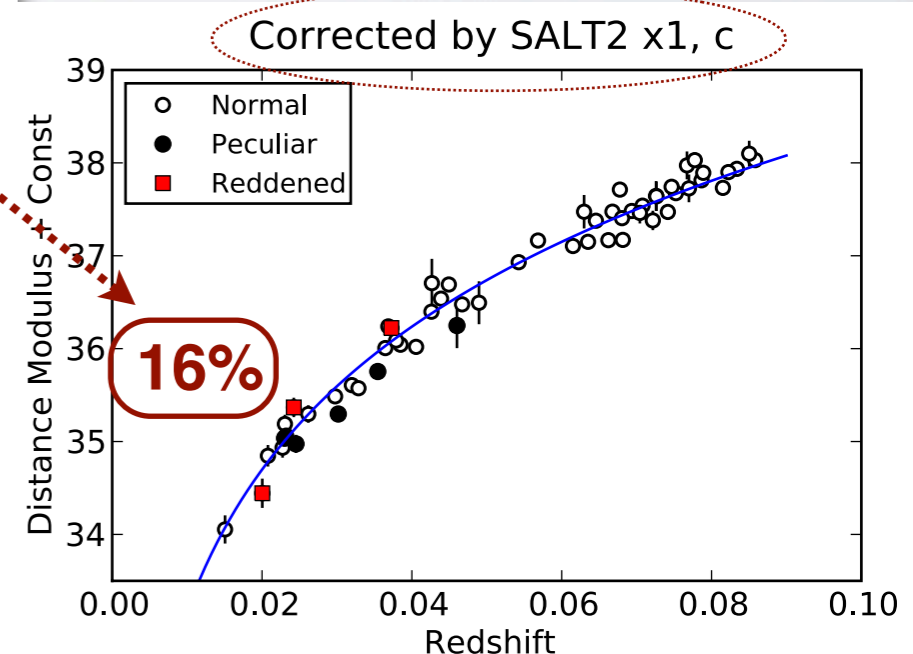
$$\Delta M_b^{corr} = \Delta M_b + \alpha x_1 - \beta c$$

α et β optimisés pour réduire la dispersion

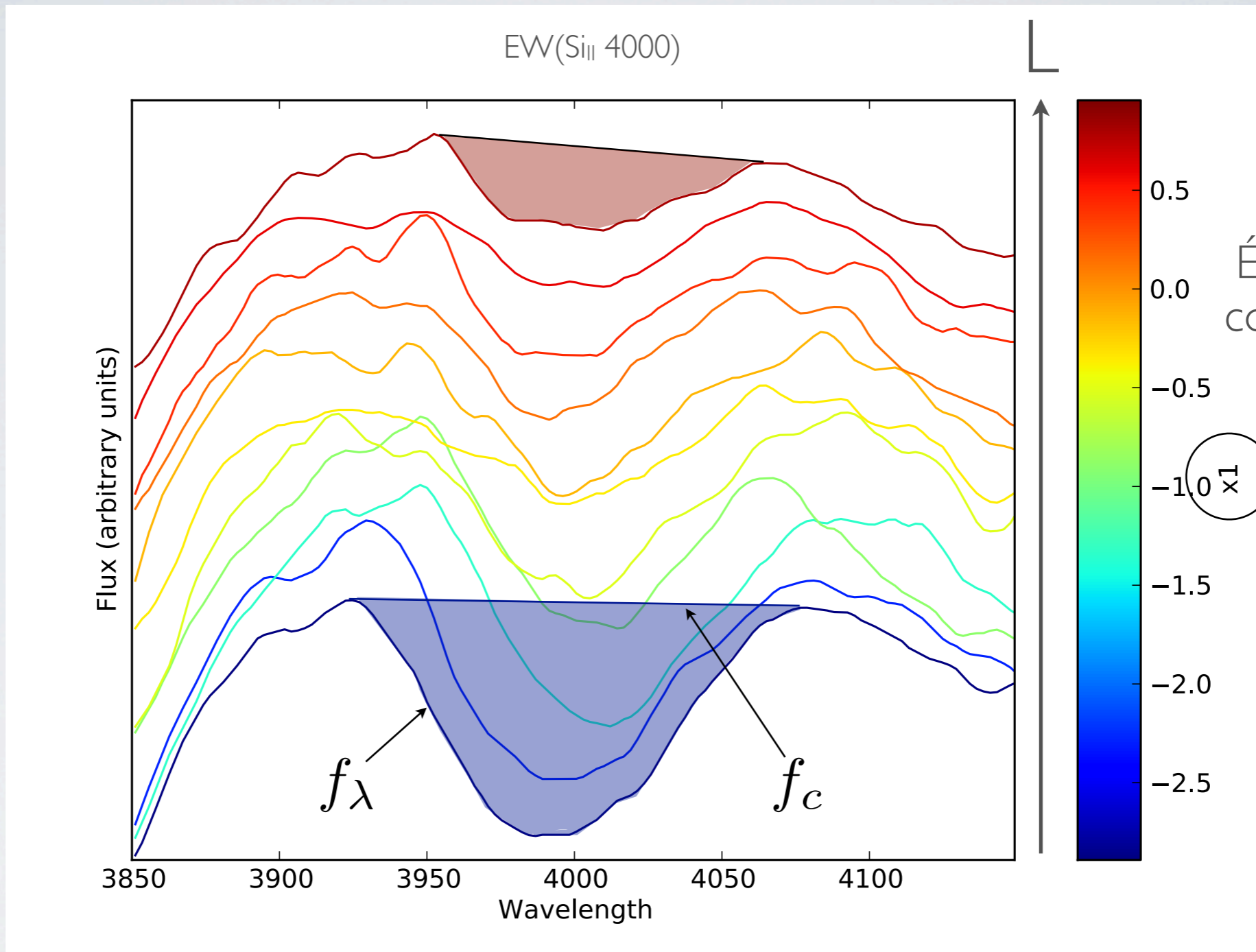


$\mu_B = m - M$
Module de distance

- ❖ Réduction de la dispersion
- ❖ Peut on mieux faire avec les indicateurs spectraux?
- ❖ Quelles sont les corrélations entre tous ces paramètres?



ÉVOLUTION DES SPECTRES



$$EW = \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{f_\lambda(\lambda_i)}{f_c(\lambda_i)} \right) \Delta\lambda_i$$

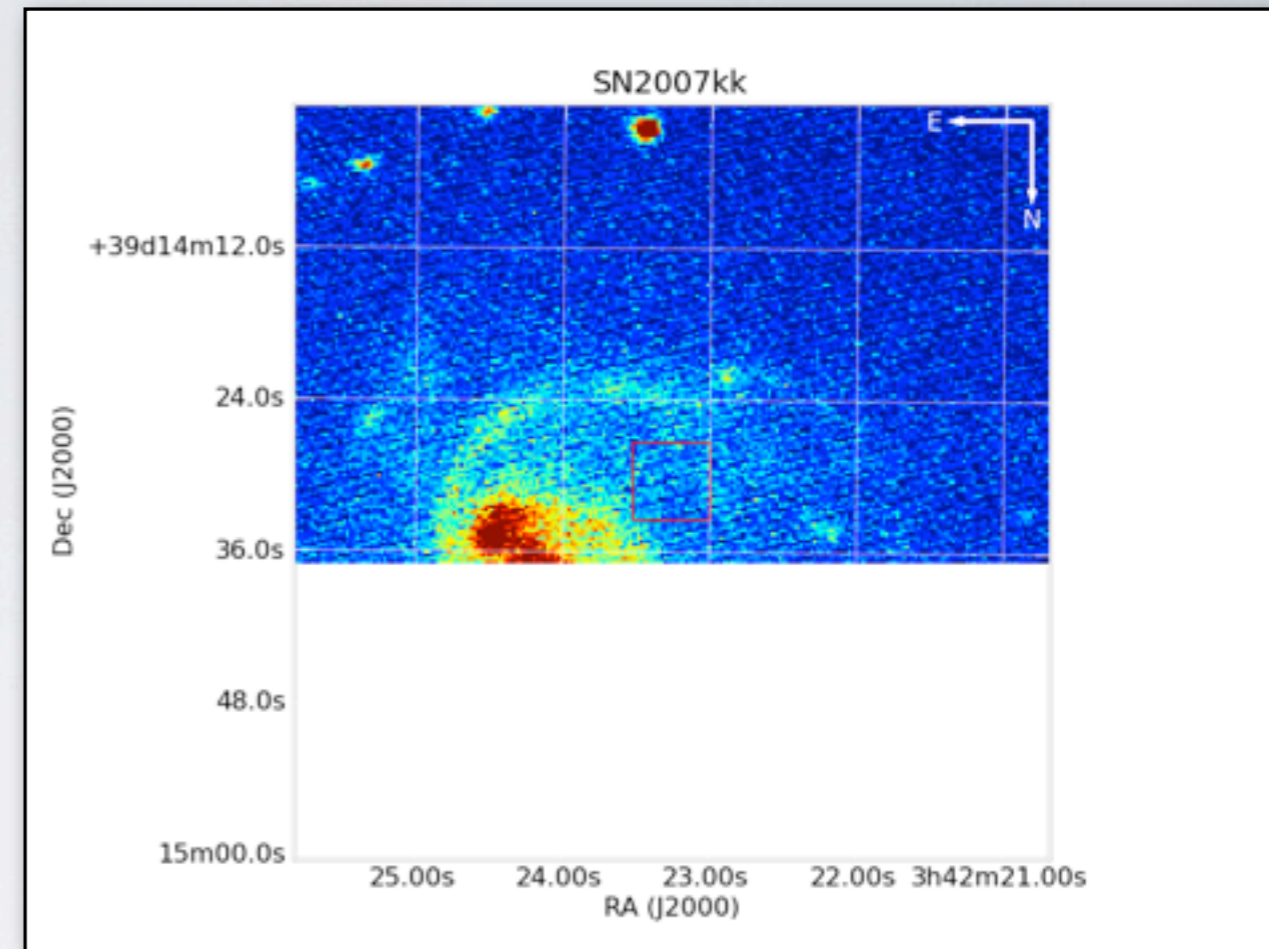
17

BUTS SCIENTIFIQUES NA-ID

- Comprendre les comportements de l'extinction des SNe Ia
- Sonder les poussières du CSM ou de l'ISM
- Obtenir des informations concernant la galaxie hôte et le progéniteur de la SN.

DESCRIPTION DE L'ÉCHANTILLON

- On effectue une soustraction galactique sur l'ensemble des 196 SNe présentes dans l'échantillon spectral total (via DDT)



- Parmi les 196 SNe, on choisit les objets pour lesquels la qualité des fits des courbes de lumière est la meilleure (+ au moins cinq nuits d'observations différentes)
- L'échantillon obtenu se compose de 121 objets que l'on sépare de manière homogène en un échantillon d'entraînement (60 SNe) et un échantillon de validation (61 SNe).

CARACTÉRISTIQUES DE LA COADDITION

Renormalisation du flux en fonction du redshift:

1- On effectue une renormalisation de tous les spectres en flux sur la base d'un redshift de 0.05 (sans changement de l'axe en longueur d'onde)

2- On renormalise le flux par un flux moyen de $10^{-15} \text{ erg.s}^{-1} . \text{cm}^{-2}$ pour avoir des valeurs de flux de l'ordre de 1.

But: Pouvoir comparer les valeurs d'intégrales mesurées d'un objet à l'autre.

Méthode de coaddition: coaddition pondérée par l'inverse des variances:

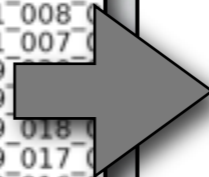
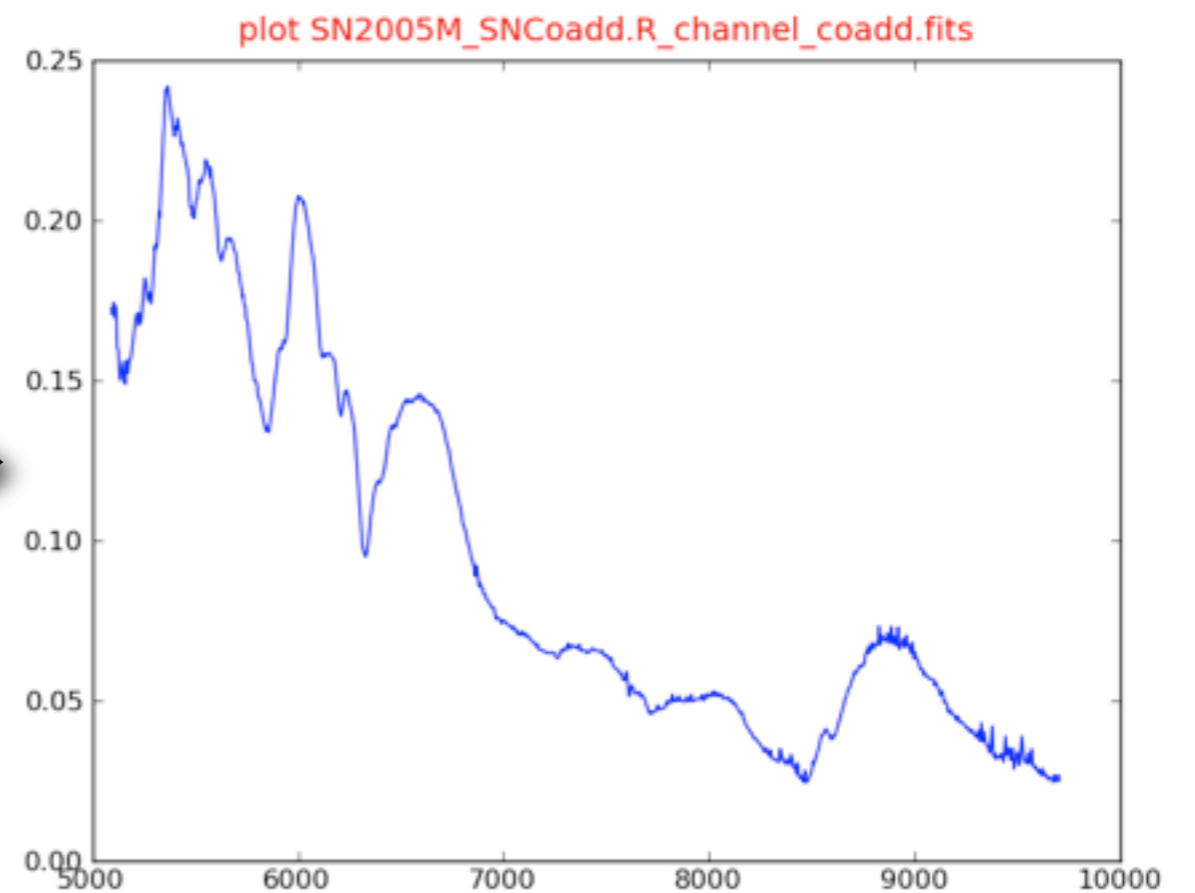
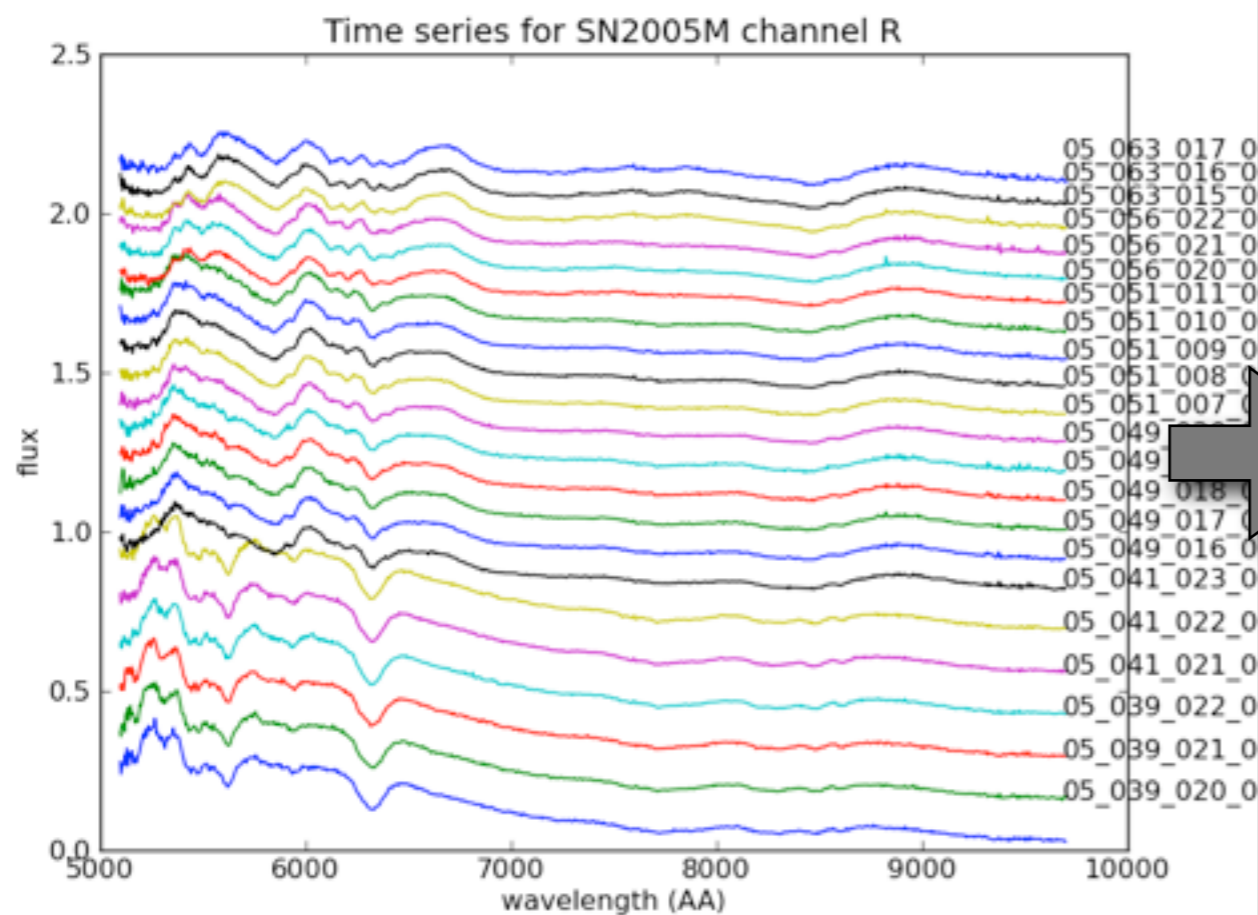
$$F_{coadd}(\lambda_i) = \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{W} F(\lambda_i) \quad , \text{ avec } \begin{cases} W = \sum_{i=1}^N w_i \\ w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \end{cases}$$

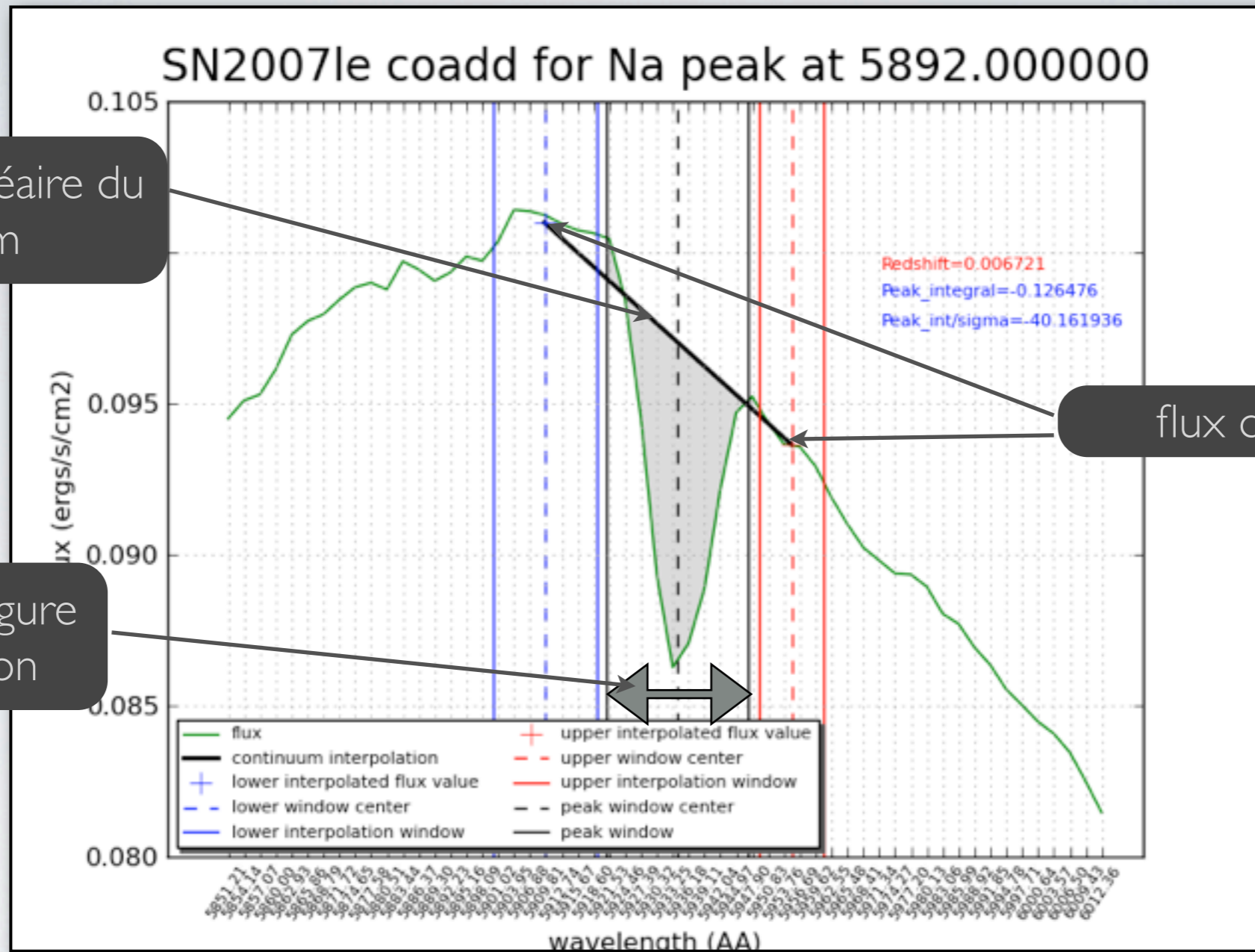
Coaddition : sans rebinning pour éviter tous les effets de bords (entre 4500 et 5100 Å) puis analyse voie par voie des figures spectrales d'absorption ou d'émission.

COADDITION DE SERIES TEMPORELLES SPECTRALES

But principal: Amélioration du rapport signal sur bruit pour faciliter les détections et les mesures des intégrales des figures d'émission et d'absorption (et dans certains cas leur apparition)

Coaddition De la voie R





Interpolation linéaire du continuum

flux d'intepollation

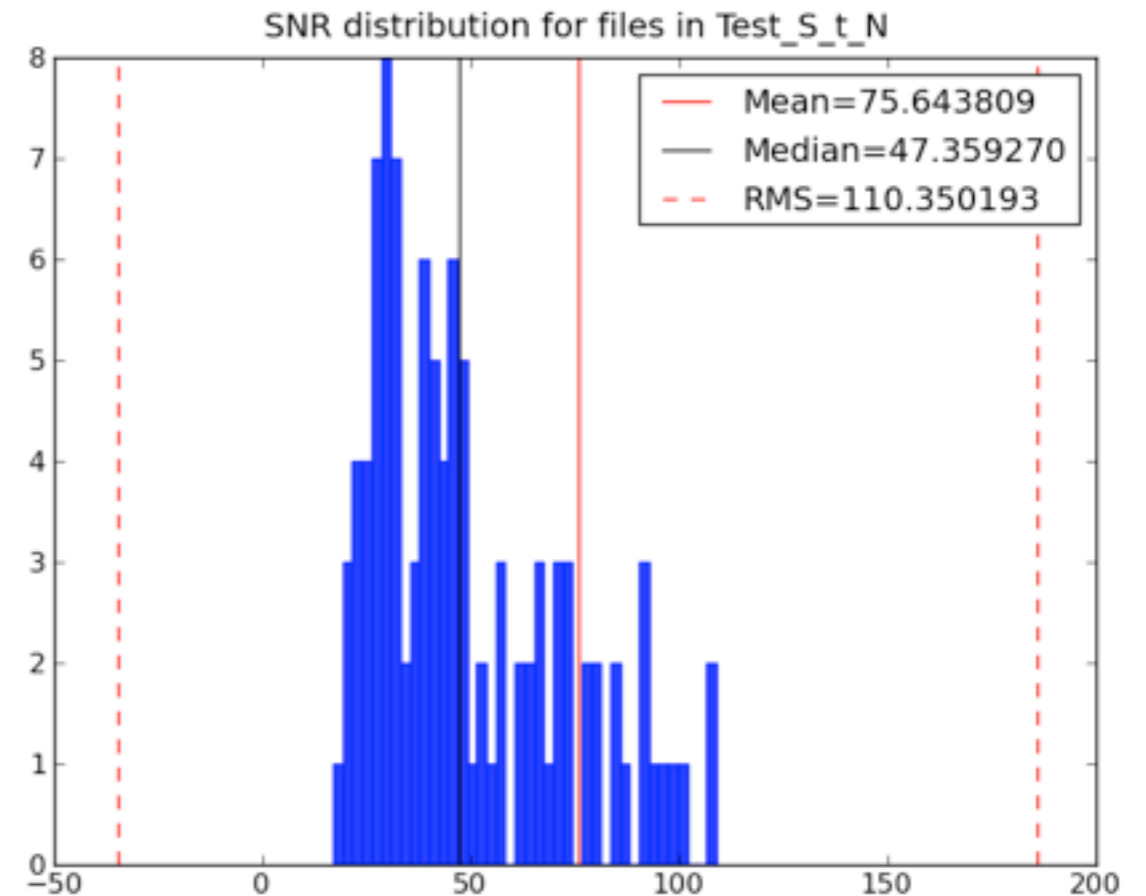
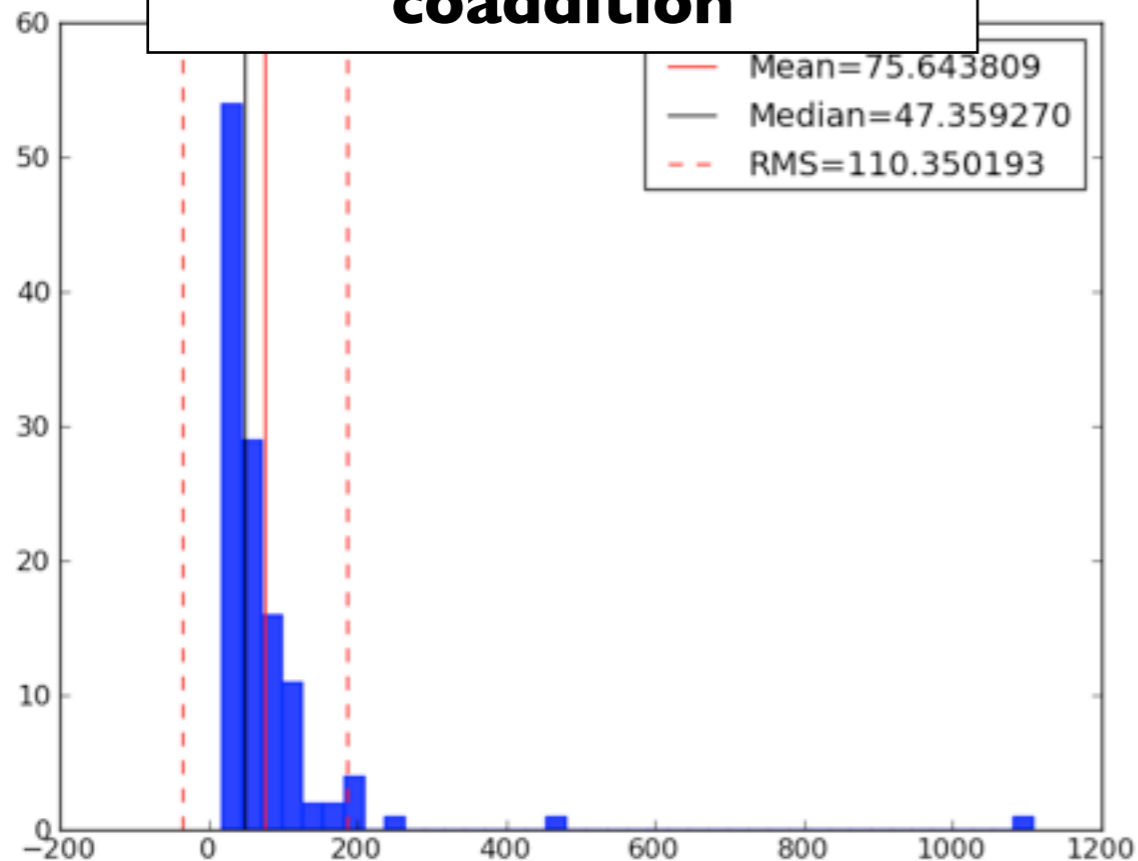
zone de la figure d'absorption

- Mesure de l'intégrale de la figure spectrale (méthode de soustraction par continuum linéaire)
 - 1 2 fenêtres (de tailles et positions définies arbitrairement) de part et d'autre de la zone de la figure d'absorption ou d'émission.
 - 2 L'intégrale du flux sous le continuum est calculée linéairement en prenant comme référence les flux moyens précédents (en tenant compte des erreurs)
 - 3 L'intégrale du spectre est calculée (toujours en tenant compte des erreurs)
 - 4 Le flux intégré de la figure spetrale est obtenu par soustraction du flux integre du continuum au flux intégré du spectre.

TESTS MONTE-CARLO DE LA METHODE

Distributions des signaux sur bruit pour l'échantillon total (121 spectres de coaddition)

Distribution des SNR des spectres de coaddition

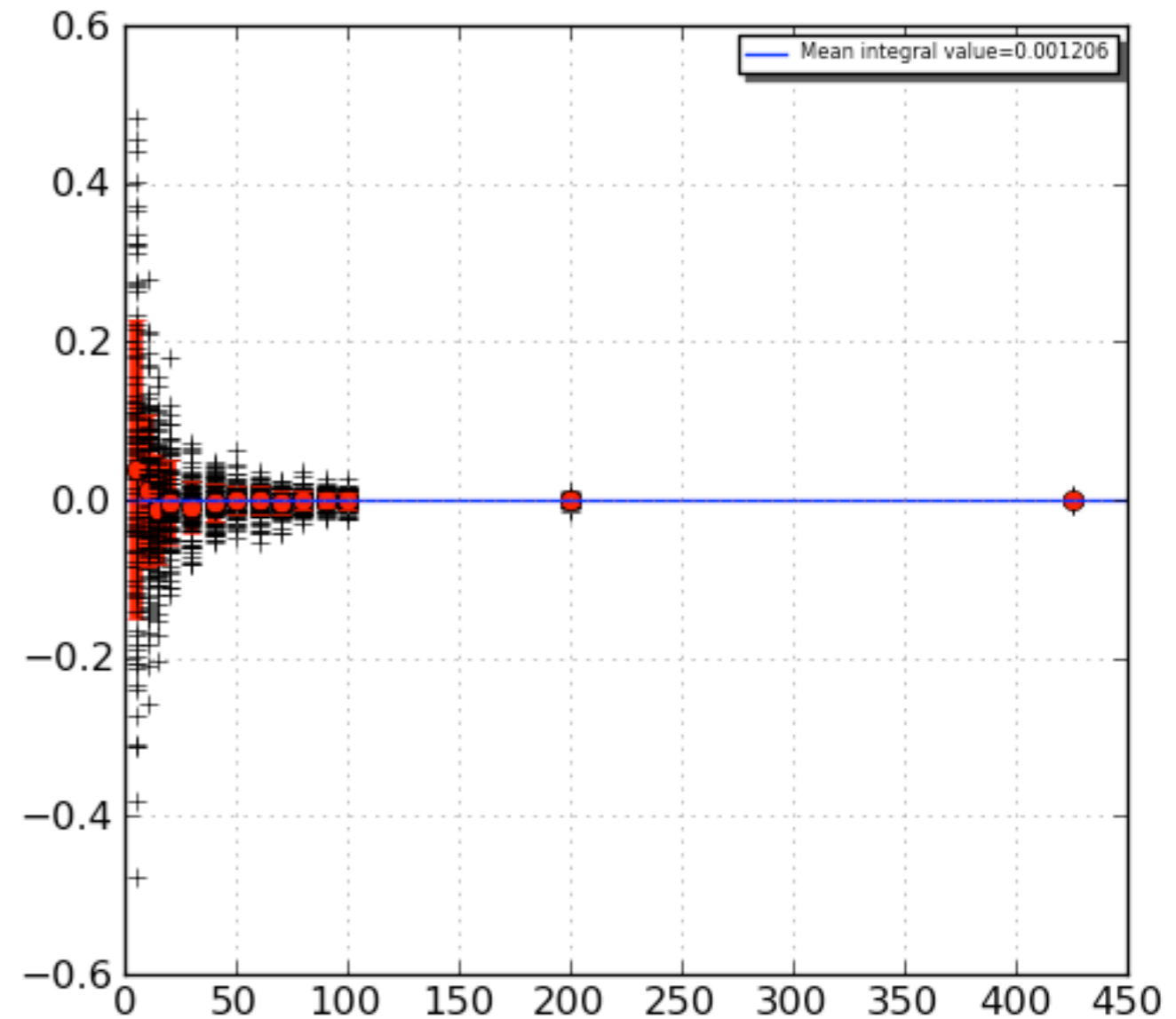
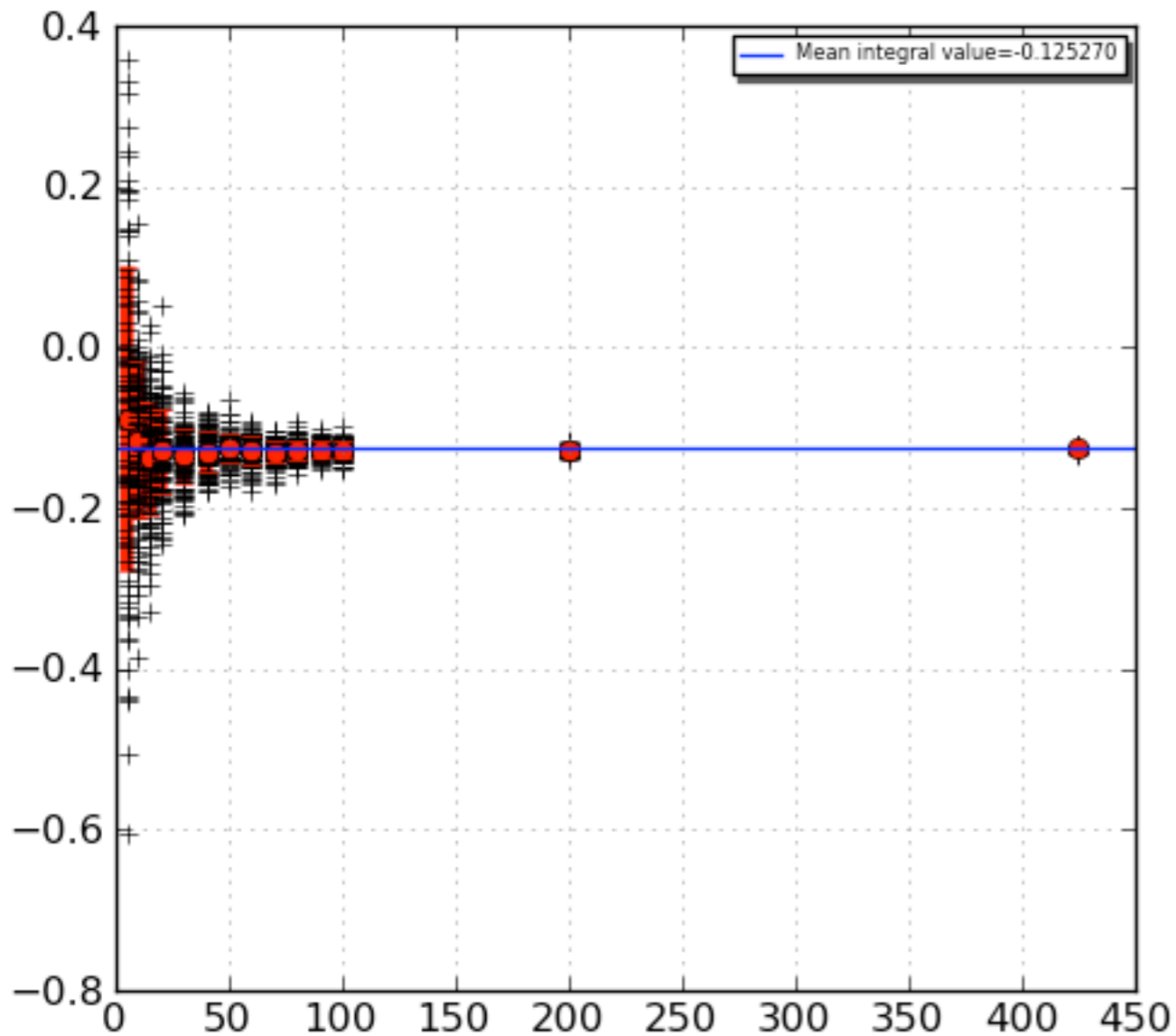


Les valeurs de signaux sur bruit pour l'ensemble de l'échantillon sont principalement comprises entre 20 et 100

TESTS MC (SUITE)

Les spectres sont synthétisés en ajoutant un bruit poissonien à SNR variable au spectre de référence (spectre de coaddition de SN2007le)

Integral values vs S/N for Na_5892.000000 + bias plot (linear method)

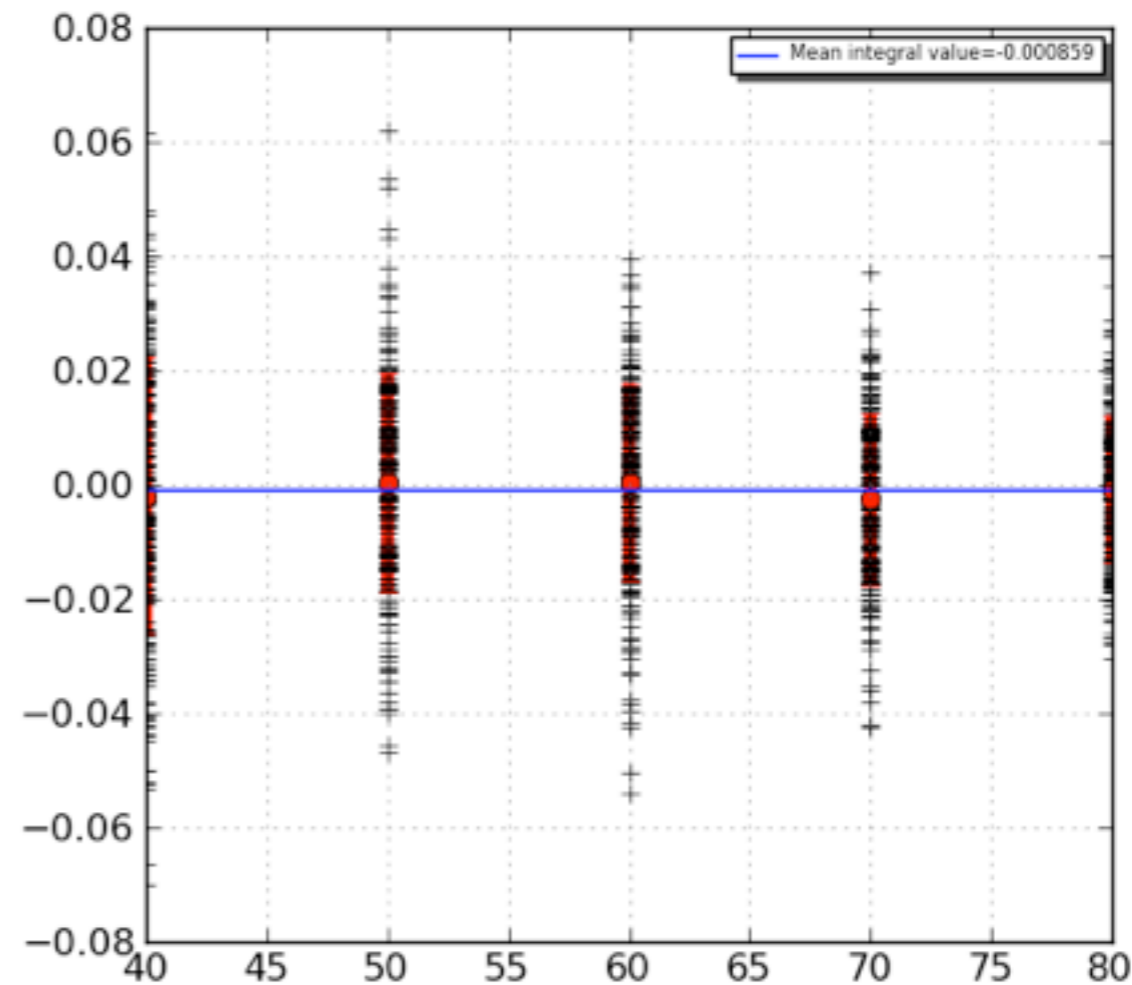
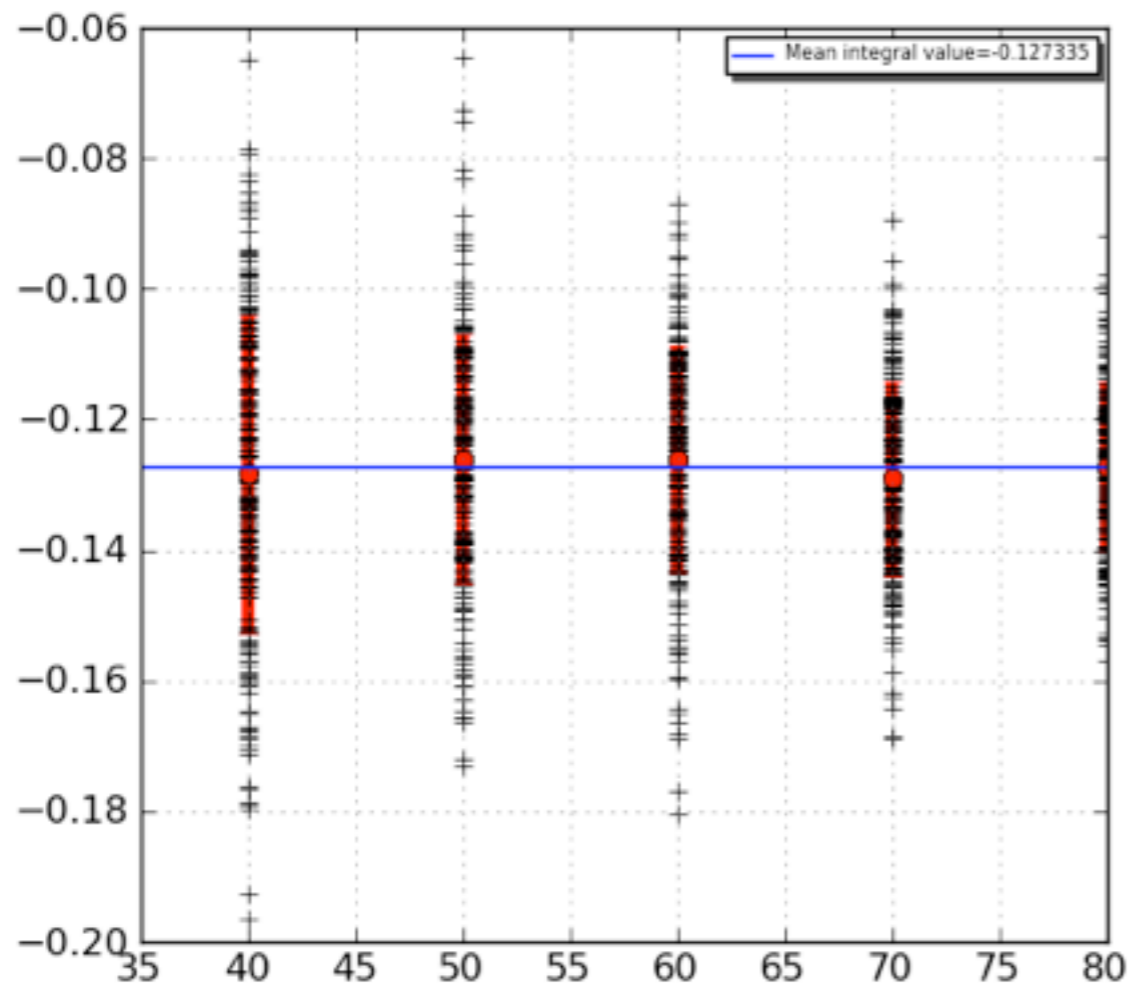


valeurs d'intégrales et biais pour des SNR de 5 à 425 (200 réalisations par SNR)

SNR du spectre de référence ~425

SIMULATIONS MC : TESTS A SNR INDICATIF

Integral values vs S/N for Na_5892.000000 + bias plot (linear method)



Valeur integrale de référence= -0.1265 (SNR~425)

Valeur moyenne integrale= -0.12527

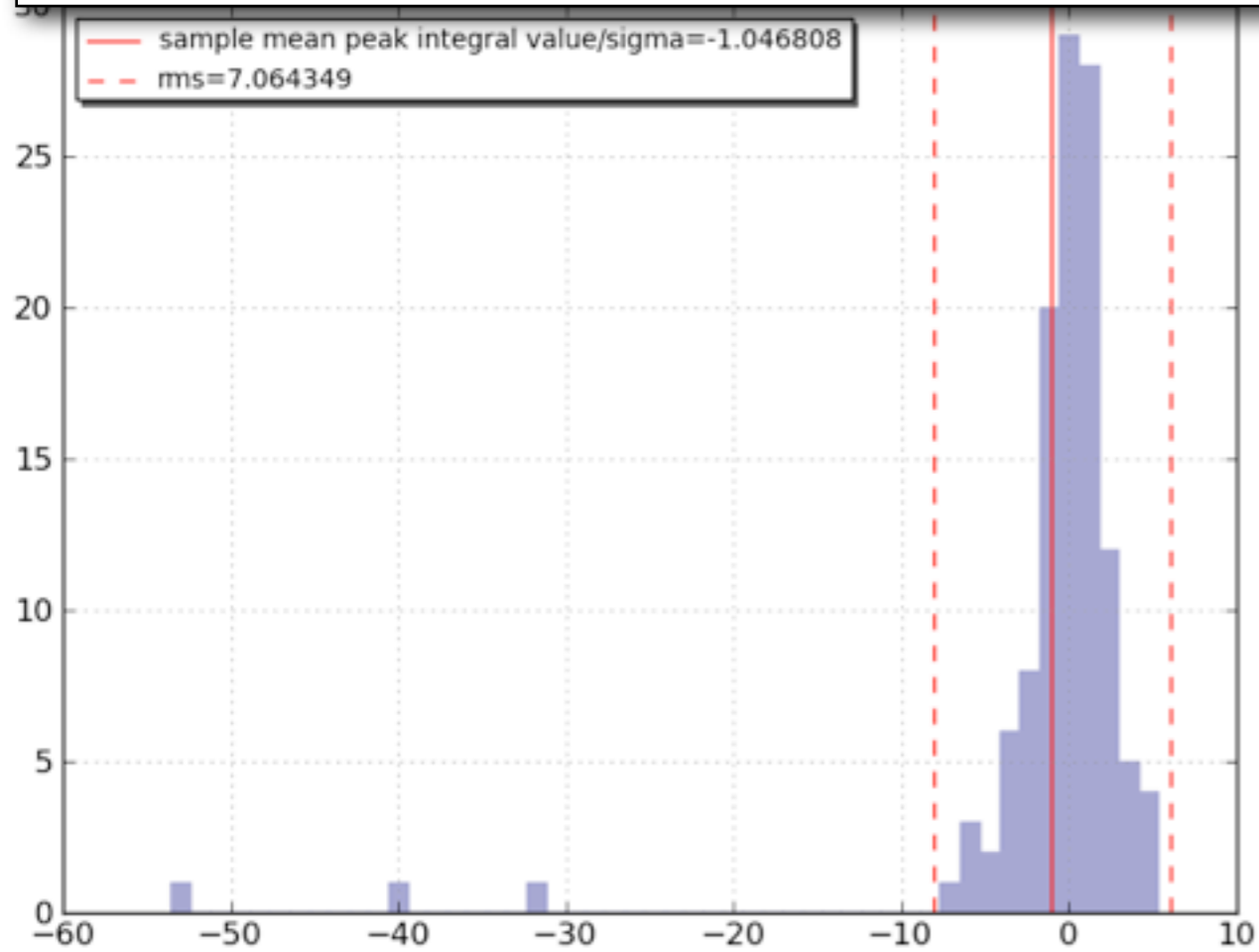
Biais moyen pour $40 < \text{SNR} < 80$: $\sim 0.1\%$

Le biais est négligeable devant l'erreur commise sur le calcul de l'intégrale

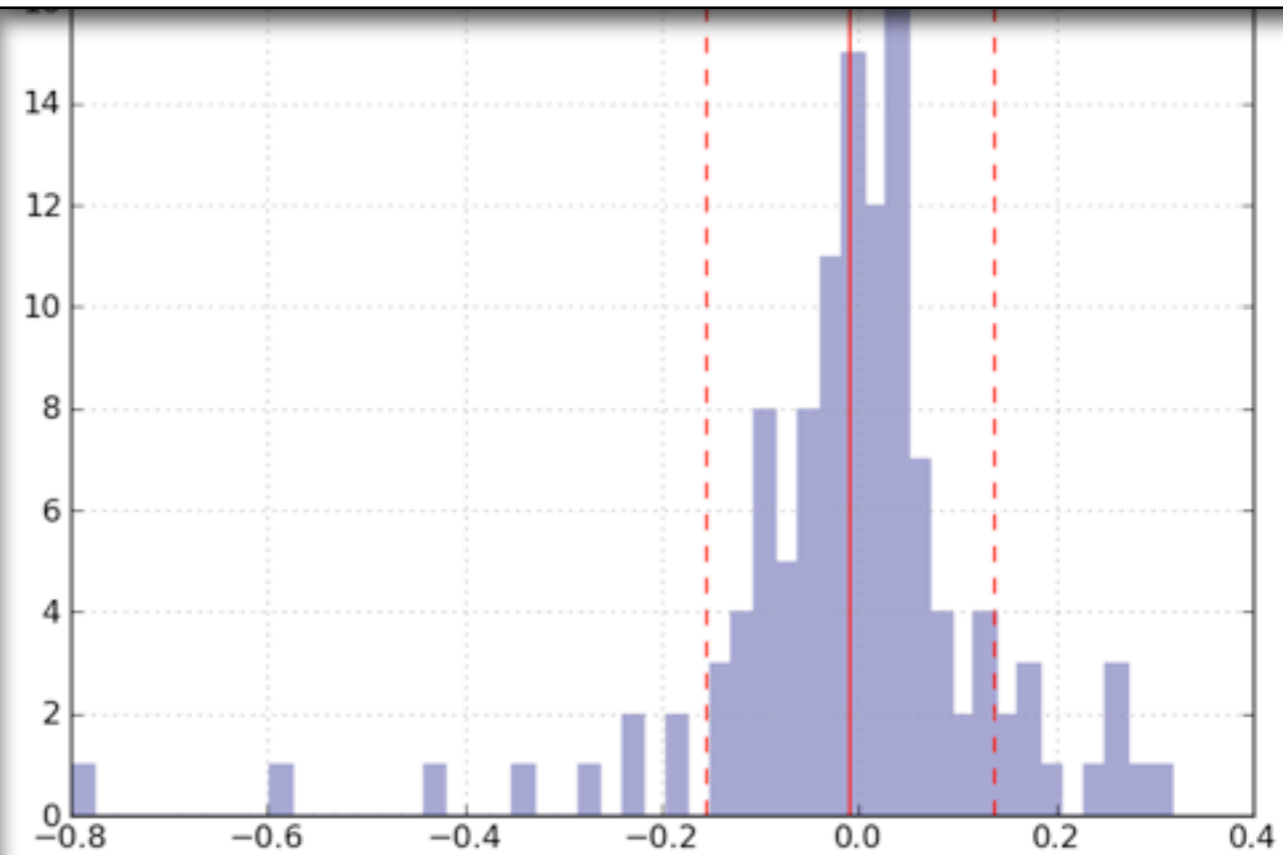
Biais pour un SNR=10 : 0.010010

Analyse Na-ID (SNe avec soustraction galactique)

Distribution de signifiante



Distribution des valeurs d'intégrales



Statistiques

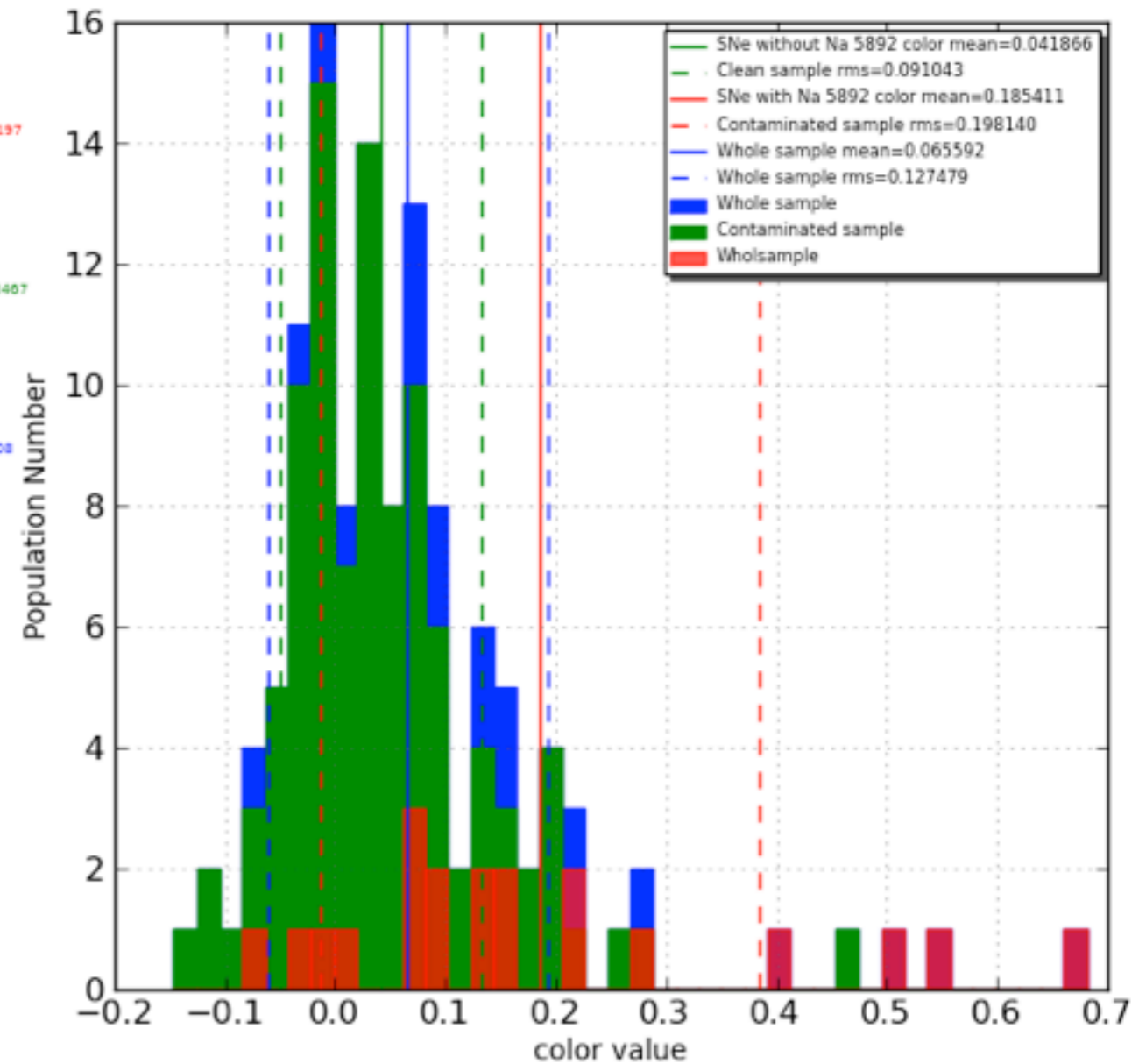
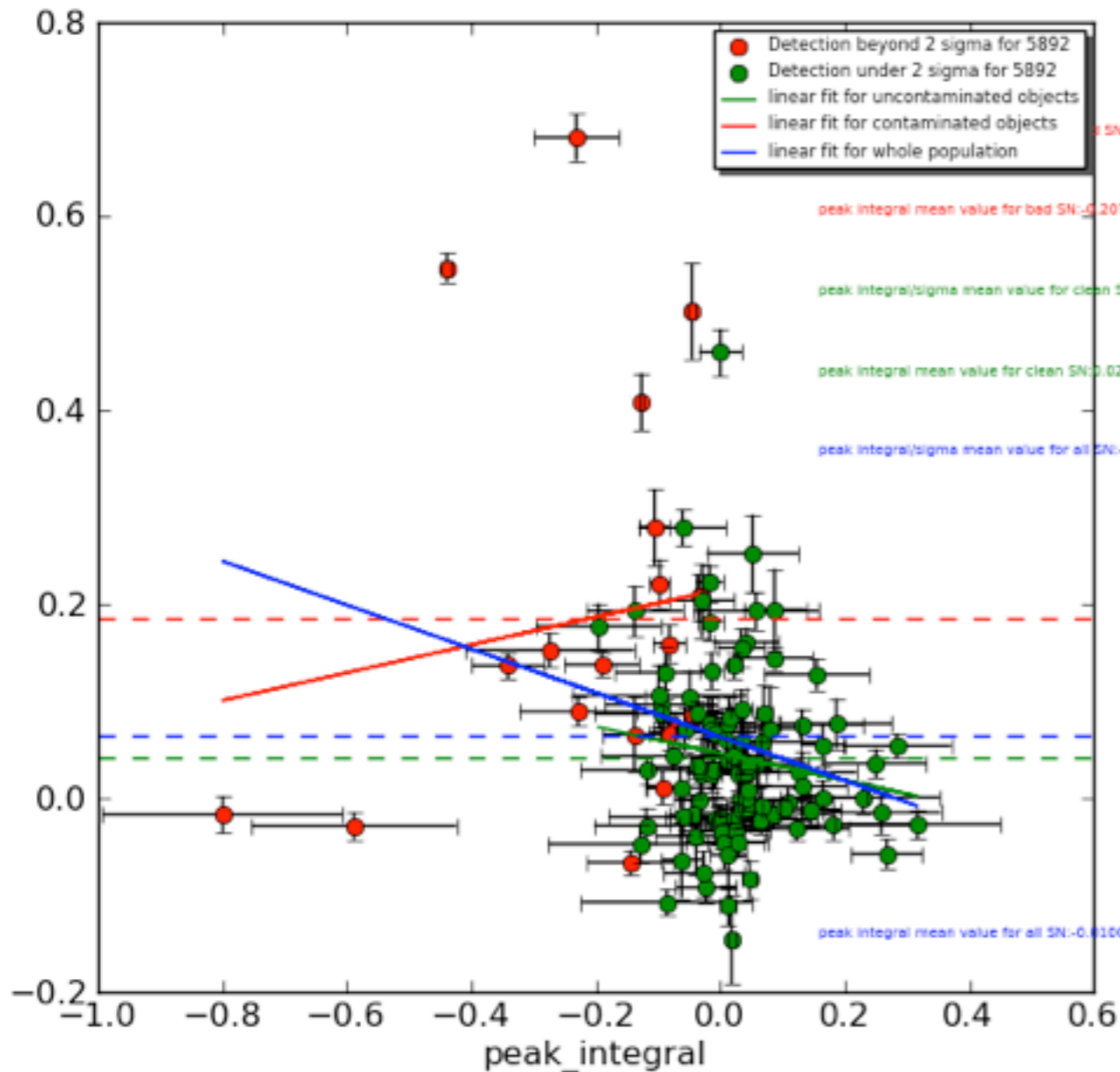
Nombre de détections au dessus de 5 sigmas : 7
Nombre de détections au dessus de 3 sigmas : 15
Nombre de détections au dessus de 2 sigmas : 20

Outlayers :

- SN2007le (41 sigmas)
- SN2009ig (>52 sigmas)

ANALYSE NA-ID : CORRELATIONS DE COULEURS

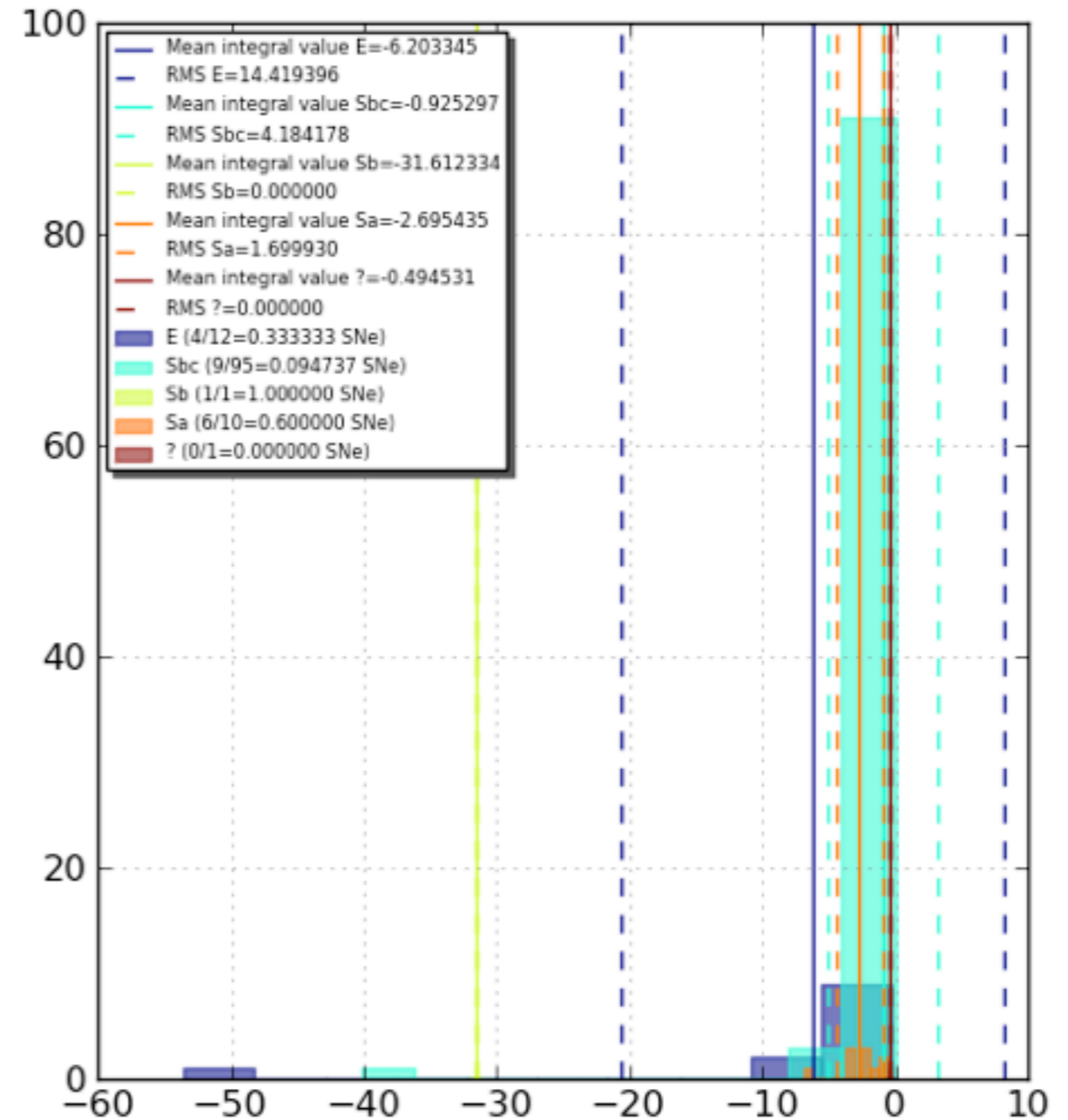
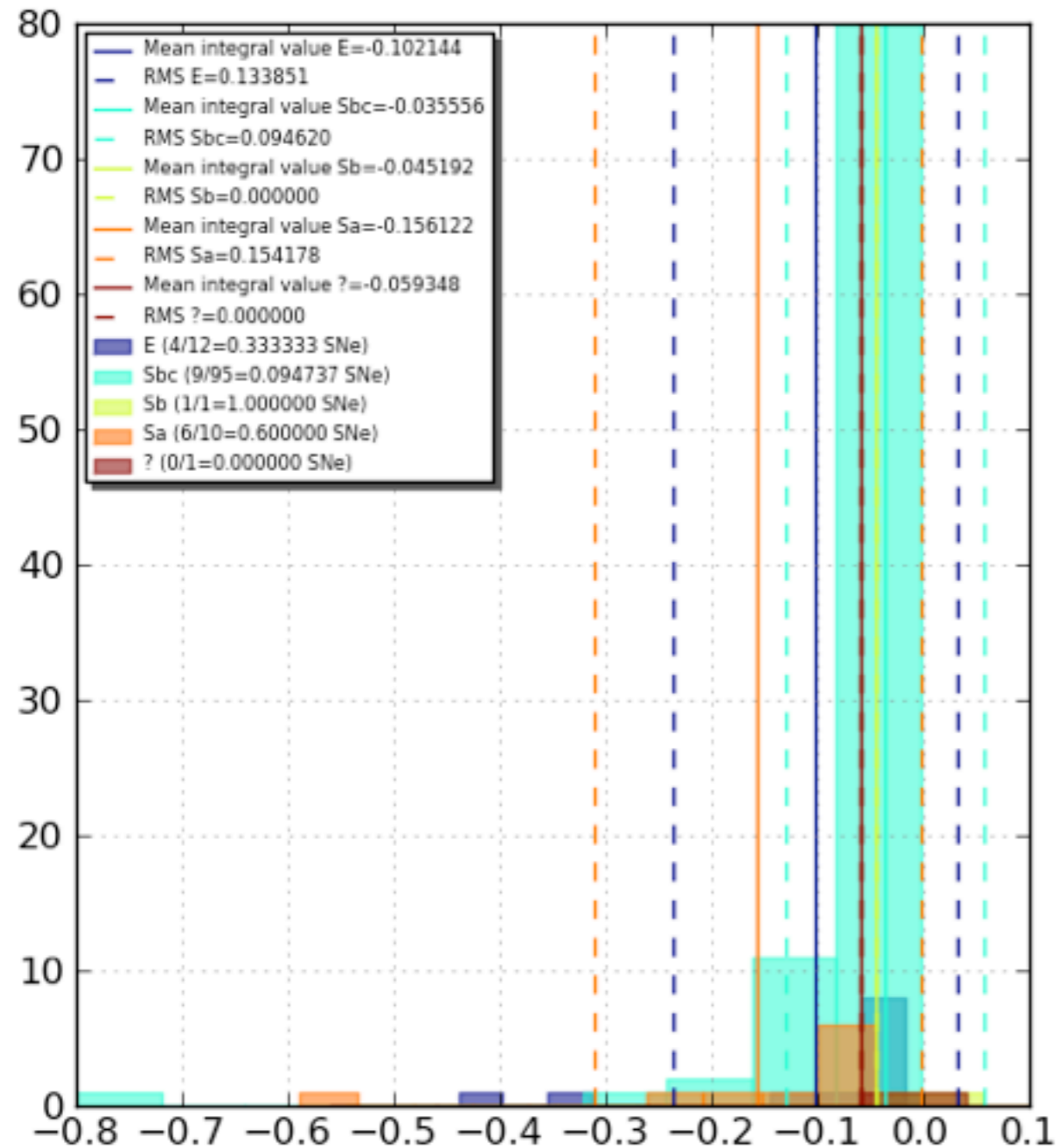
Local correlation plot (color vs peak_integral) for Na at 5892 + color distributions



L'échantillon des 20 SNe comportant du Na-ID comporte une couleur moyenne supérieure aux échantillons ne présentant pas cette figure d'absorption (101 SNe)

ANALYSE DES CORRELATIONS TYPES D'HOTES

Na-ID integrals and integral significance for host_types



Le ratio de detection le plus élevé pour le Na-ID est celui des galaxies hôtes elliptiques
L'échantillon total reste dominé par les galaxies hôtes de type Spirales (bc)

CONCLUSIONS

Na-ID

- Même après soustraction de la galaxie, on détecte 20 cas de Na-ID (dont certains à plus de 30 sigmas)
- L'interpolation linéaire sous-estime le niveau de continuum (continuum à courbure positive).
- La couleur des SNe comportant du Na-ID est en moyenne plus élevée que celle du reste de la population

Ca-H/K

- On détecte du Ca-H pour 22 SNe sur un échantillon total de 121 (avec des valeurs de flux intégrés plus basses que pour le Na-ID)
- Le Ca-K est détecté dans 19 cas à plus de 2 sigmas
- Les couleurs moyennes du Ca-H/K sont supérieures à celles des échantillons non -contaminés.

Perspectives :

- Améliorer la méthode de coaddition (méthode de coaddition optimale)
- Affiner l'analyse du Na-ID (à travers des modèles d'explosion et de recombinaison)
- Vérifier que tous les effets sont dûs aux poussières du CSM
- Etudier les caractéristiques des figures de Na-ID variables dans le temps
- Prendre en compte les autres marqueurs de poussières du CSM (Corrélations avec le rougissement, lois de couleurs)

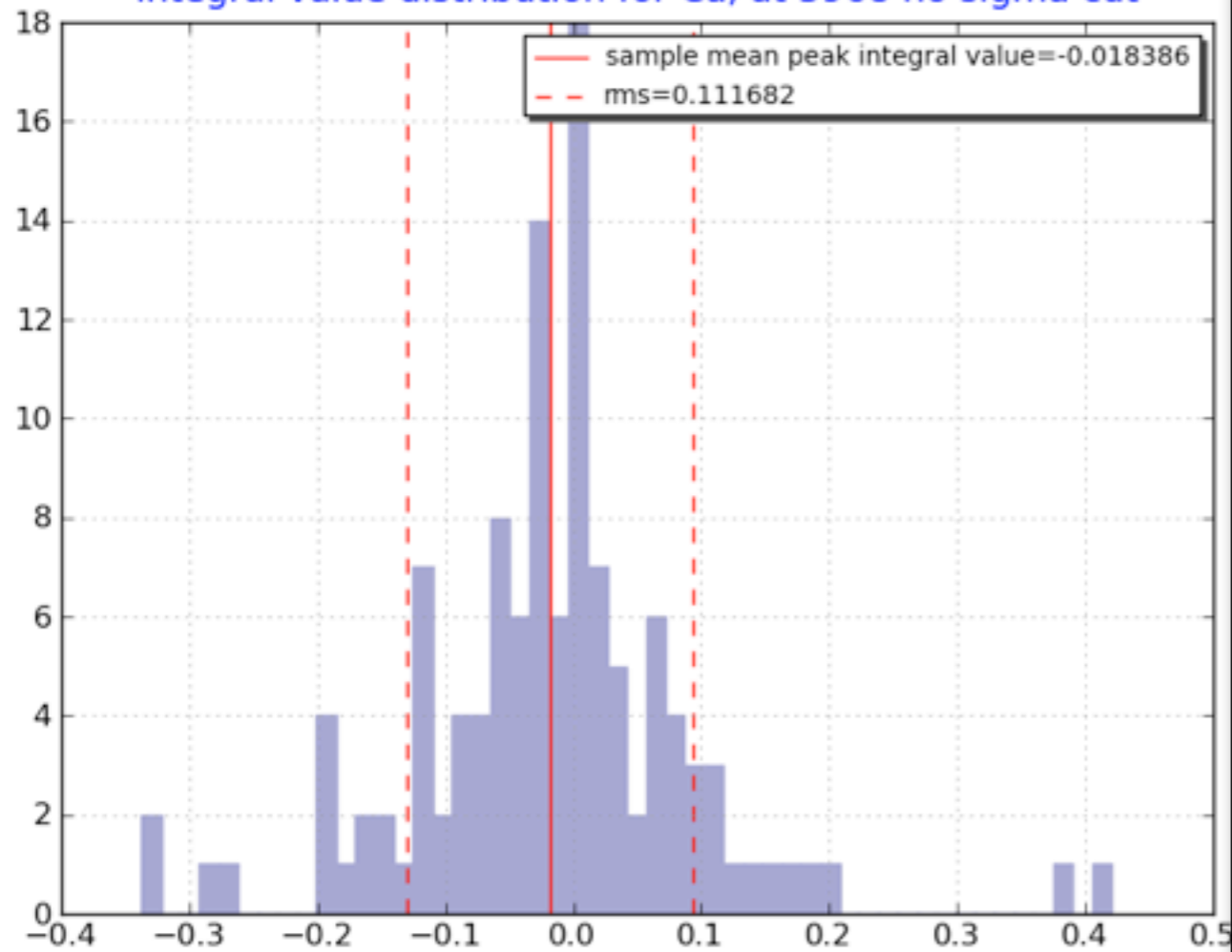
Autres travaux en cours:

- Analyse des figures d'émission H-alpha (progéniteurs)
- Analyse des cubes de ciel (calibration en longueur d'onde)

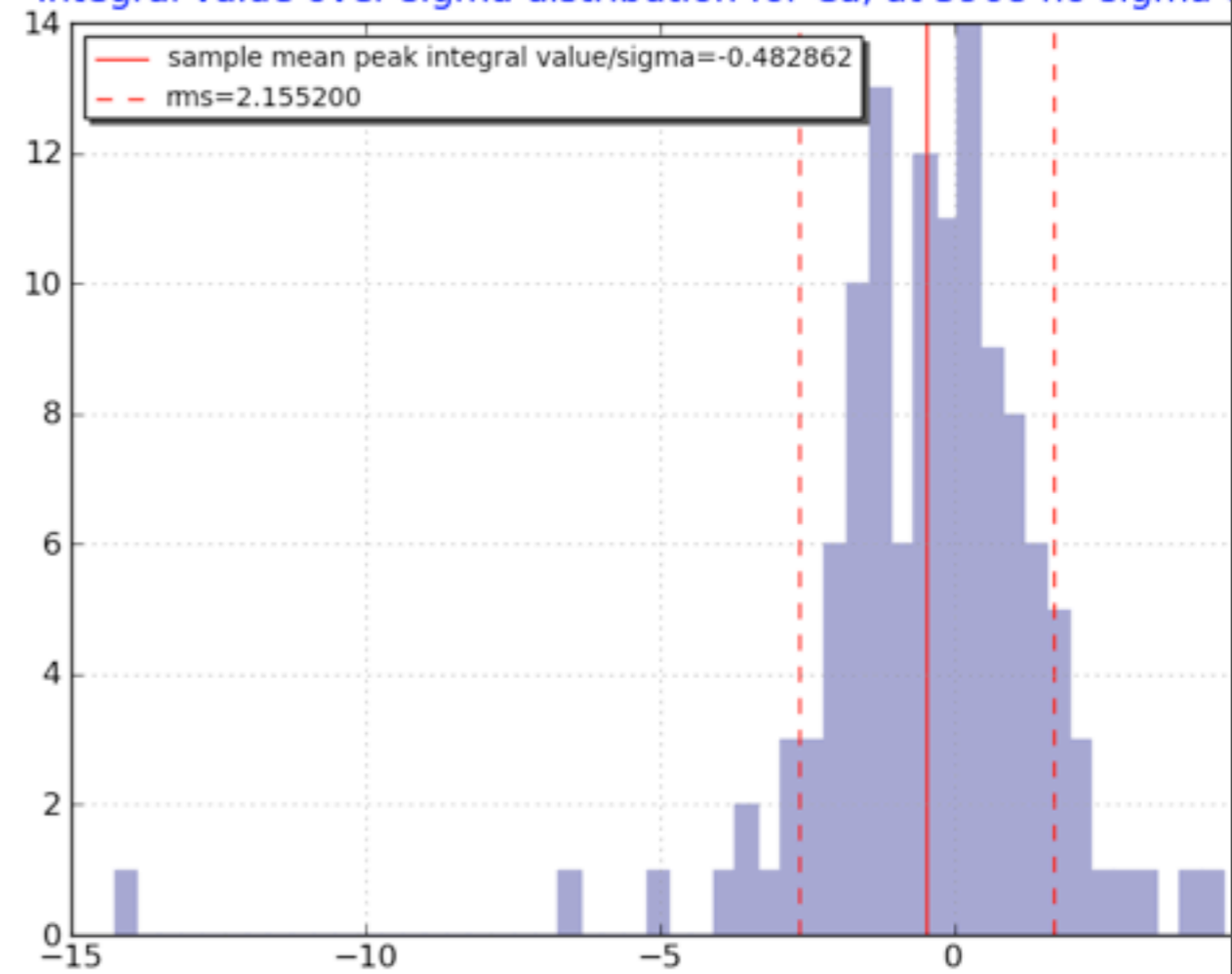
BACKUP SLIDES

ANALYSE CA-H/K: DISTRIBUTIONS DES FLUX INTEGRES

Integral value distribution for Ca, at 3968 no sigma cut



Integral value over sigma distribution for Ca, at 3968 no sigma cut

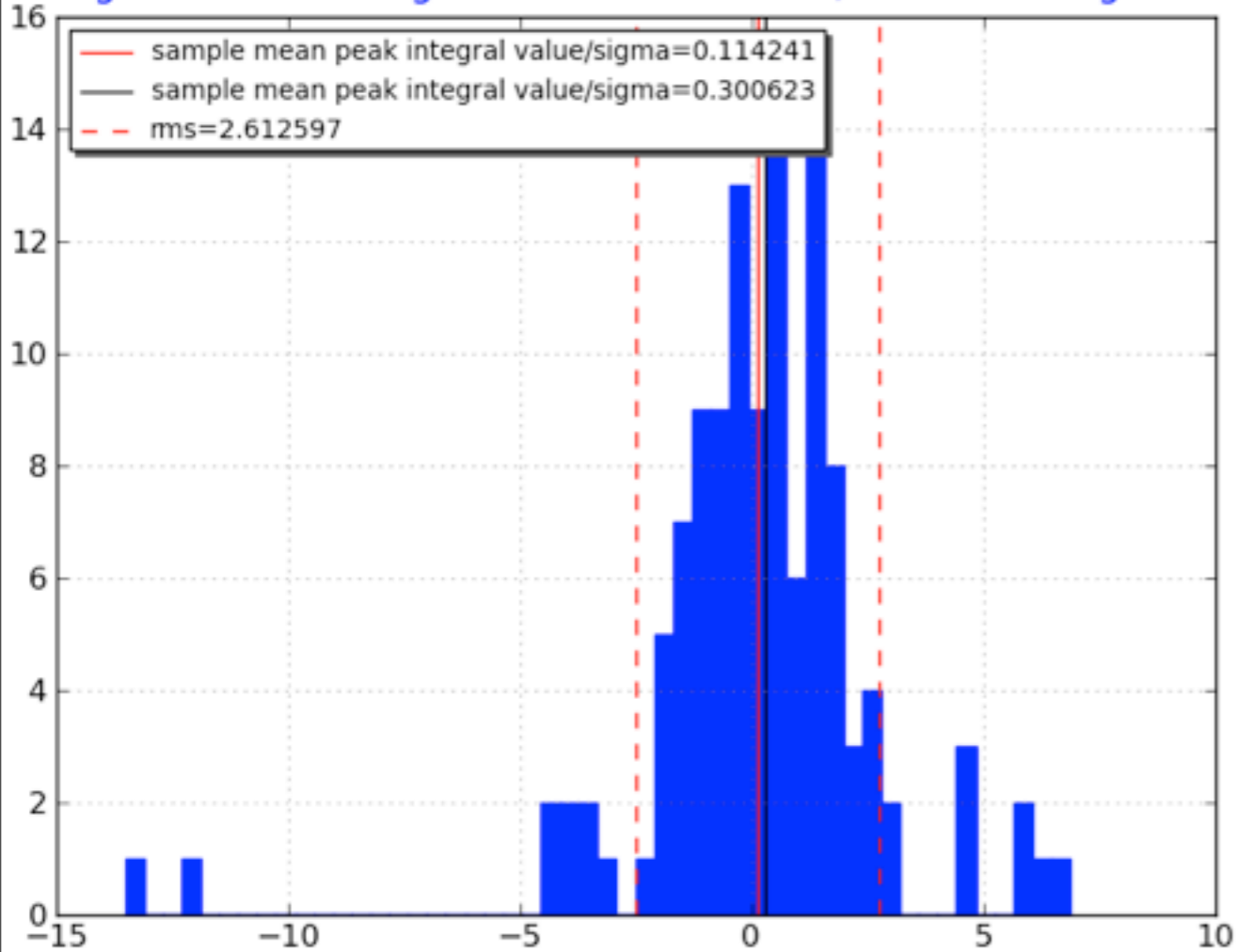


Nombre de détections au dessus de Ca-H au-dessus de 5 sigmas =6
Détections de Ca-H au-delà de 2 sigmas =22

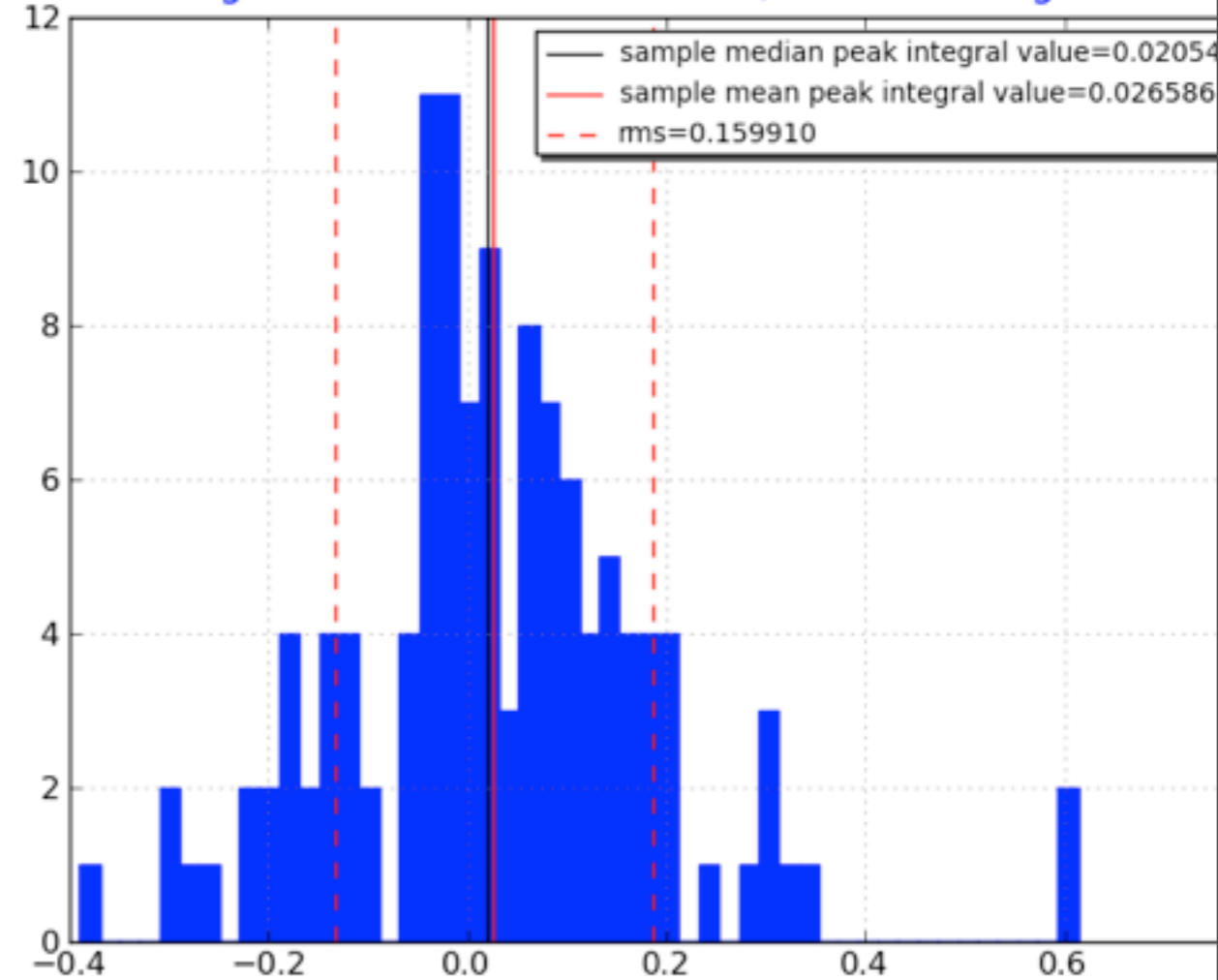
La moyenne des flux intégrés pour le Ca-K est inférieure à celle mesurée pour le Na-ID

CA-K

Integral value over sigma distribution for Ca, at 3933 no sigma cut



Integral value distribution for Ca, at 3933 no sigma cut

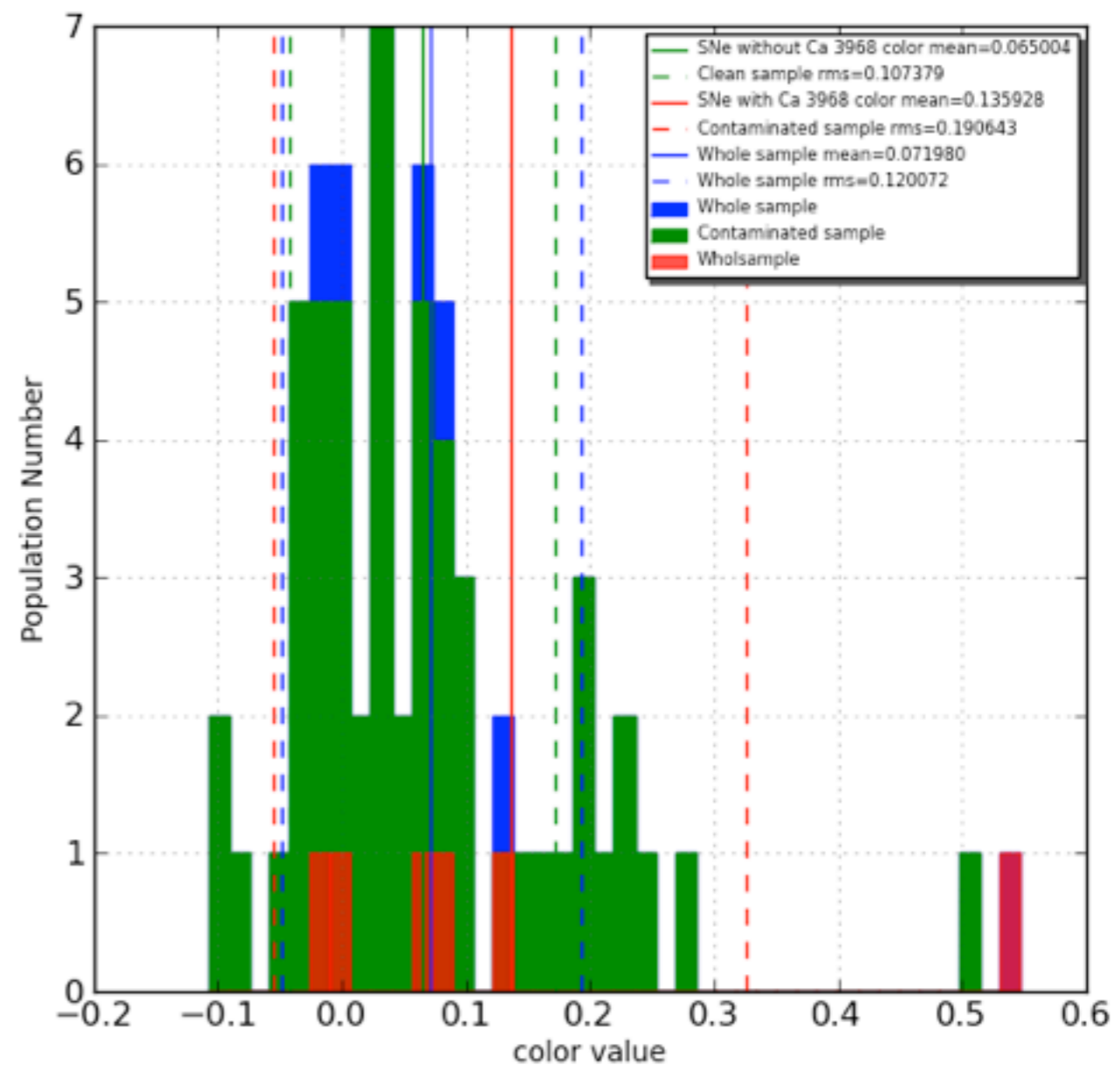
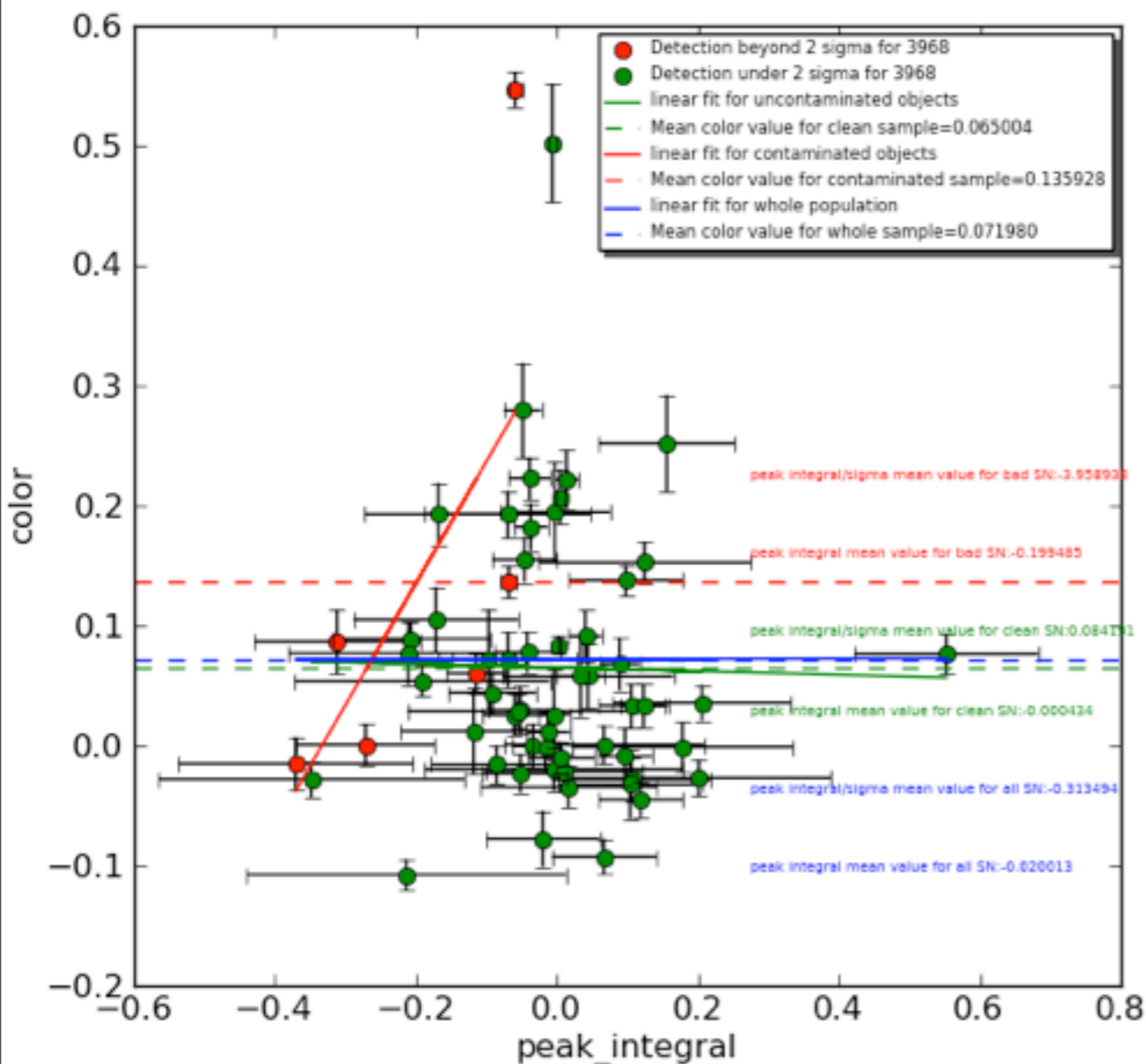


Signifiance moyenne du flux intégré pour le Na-ID = 1.0468
Signifiance moyenne du flux intégré pour Ca-H=0.4828
Signifiance moyenne du flux intégré pour Ca-K=0.30

CORRELATIONS DE COULEUR(SUITE)

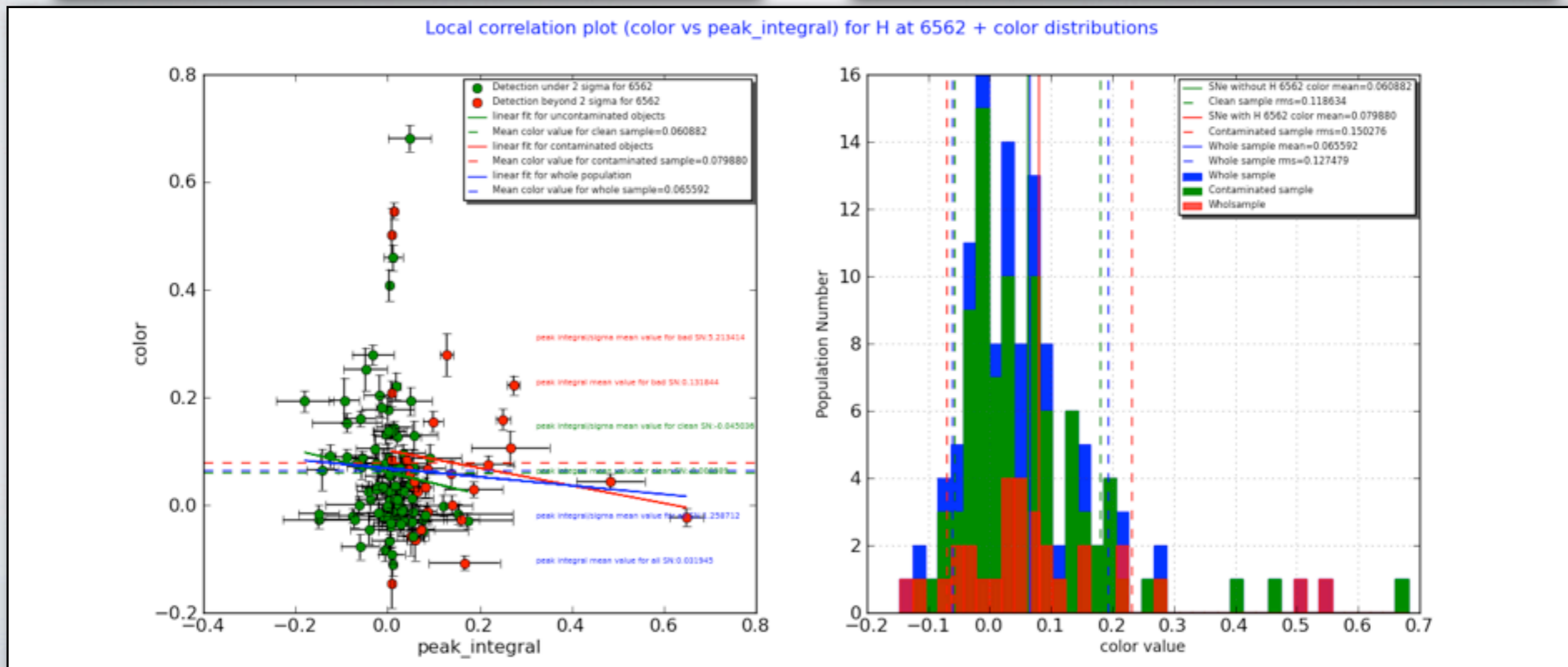
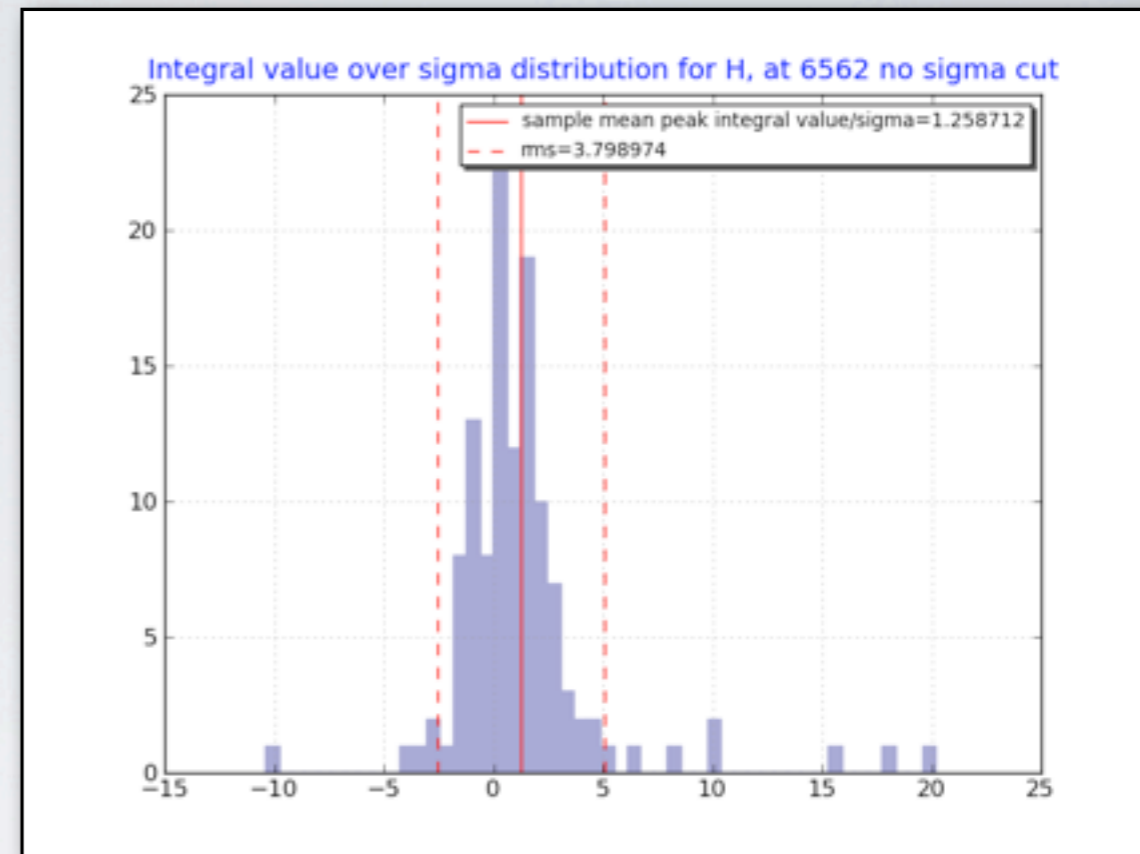
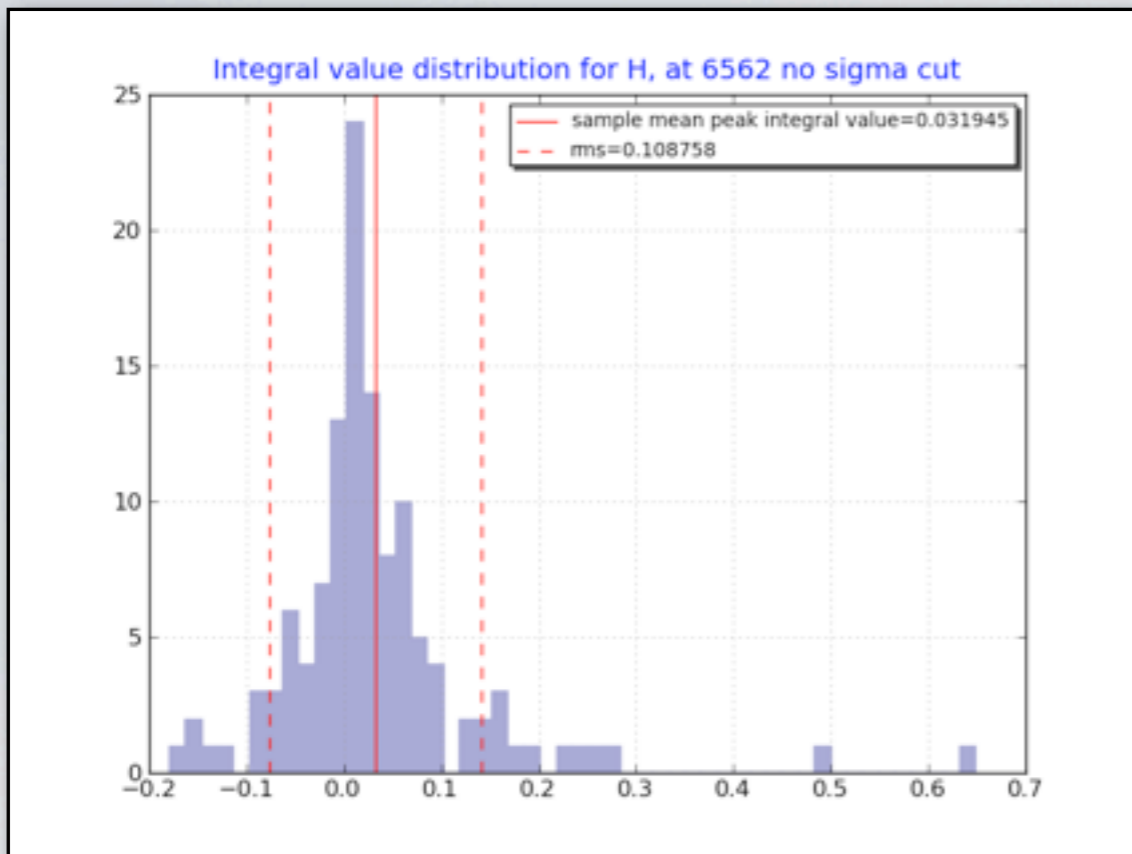
Correlations de couleurs pour le Ca-H (validation sample)

Local correlation plot (color vs peak_integral) for Ca at 3968 + color distributions



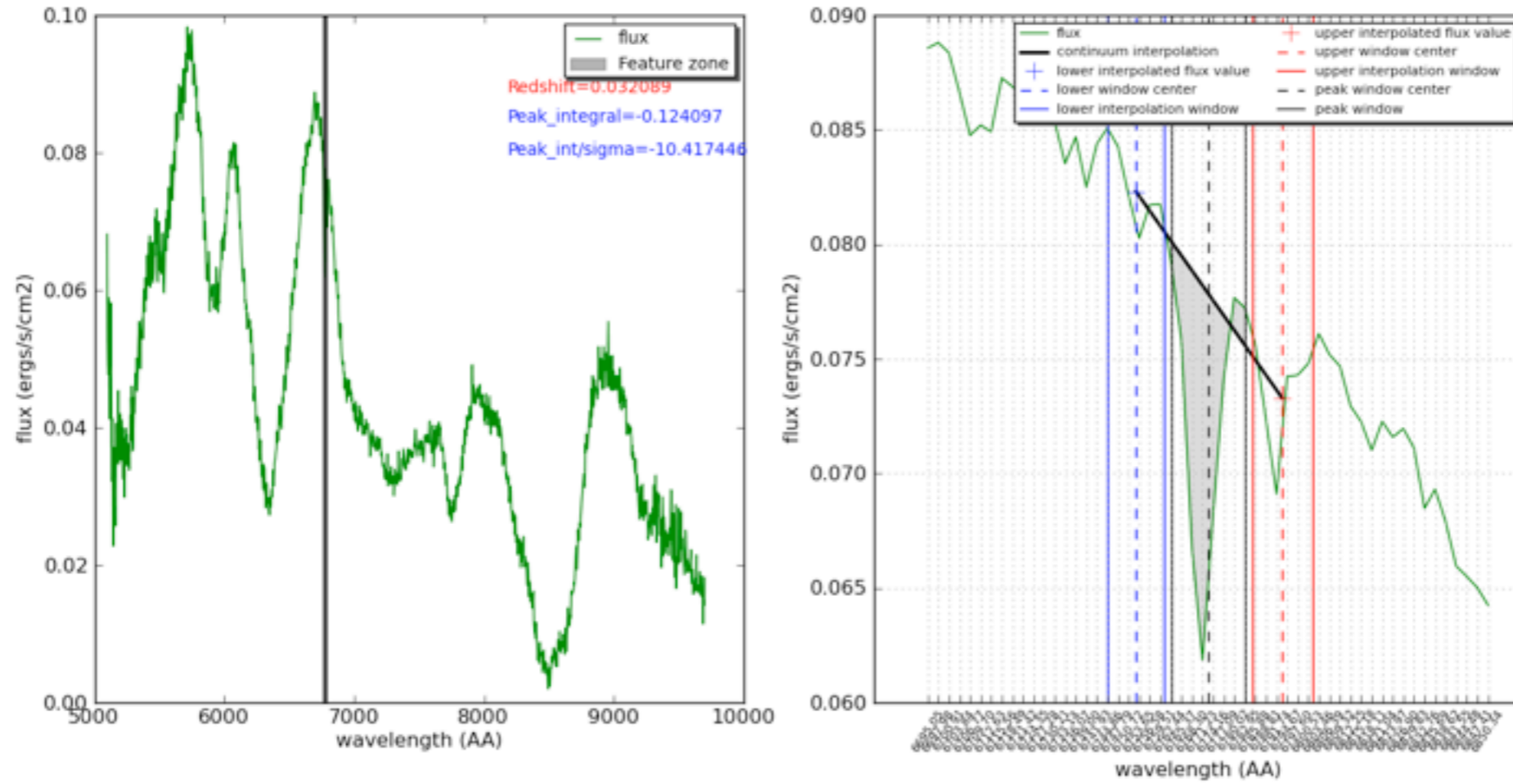
Couleur moyenne pour l'échantillon contenant du Ca-H dans le training sample : 0.127896
Couleur moyenne pour les objets contenant du Ca-H dans le validation sample: 0.135928

ANALYSE H-ALPHA

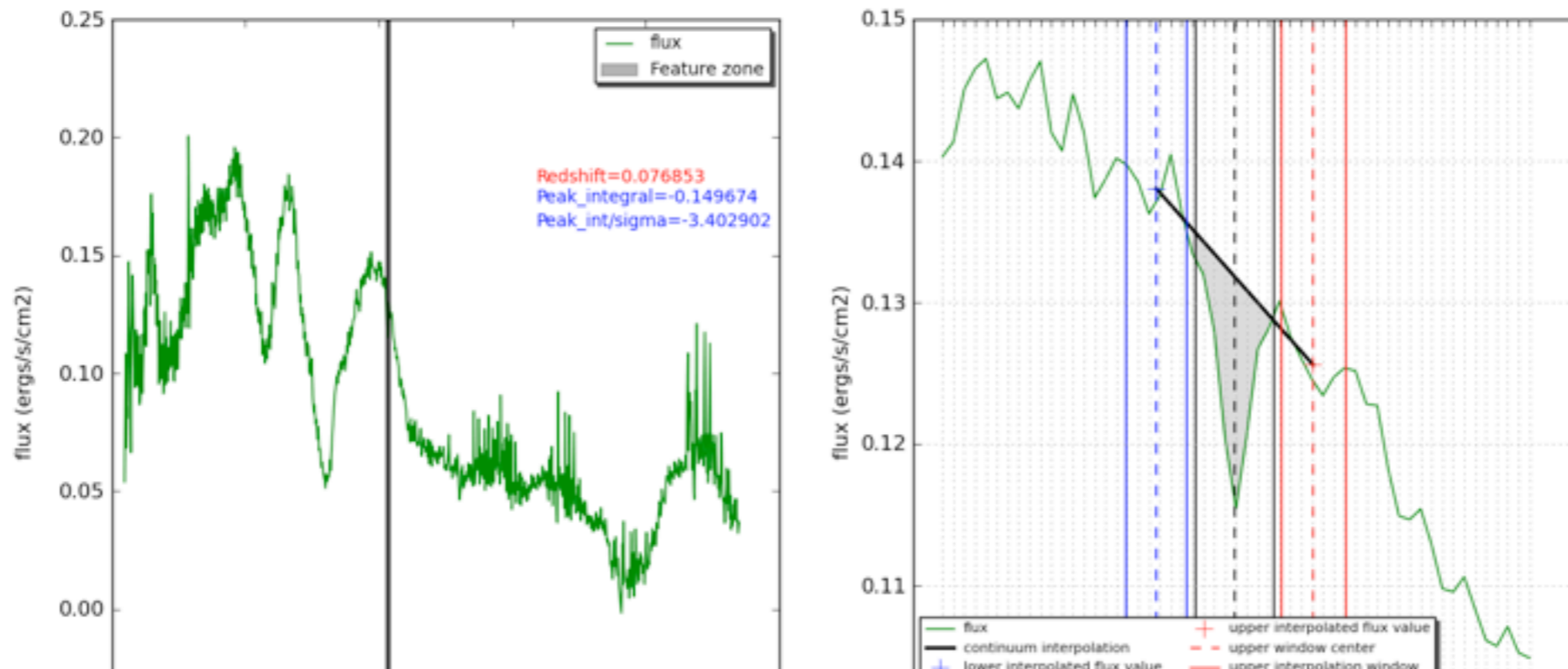


ANALYSE H-ALPHA: SUREXTRACTION GALACTIQUE ?

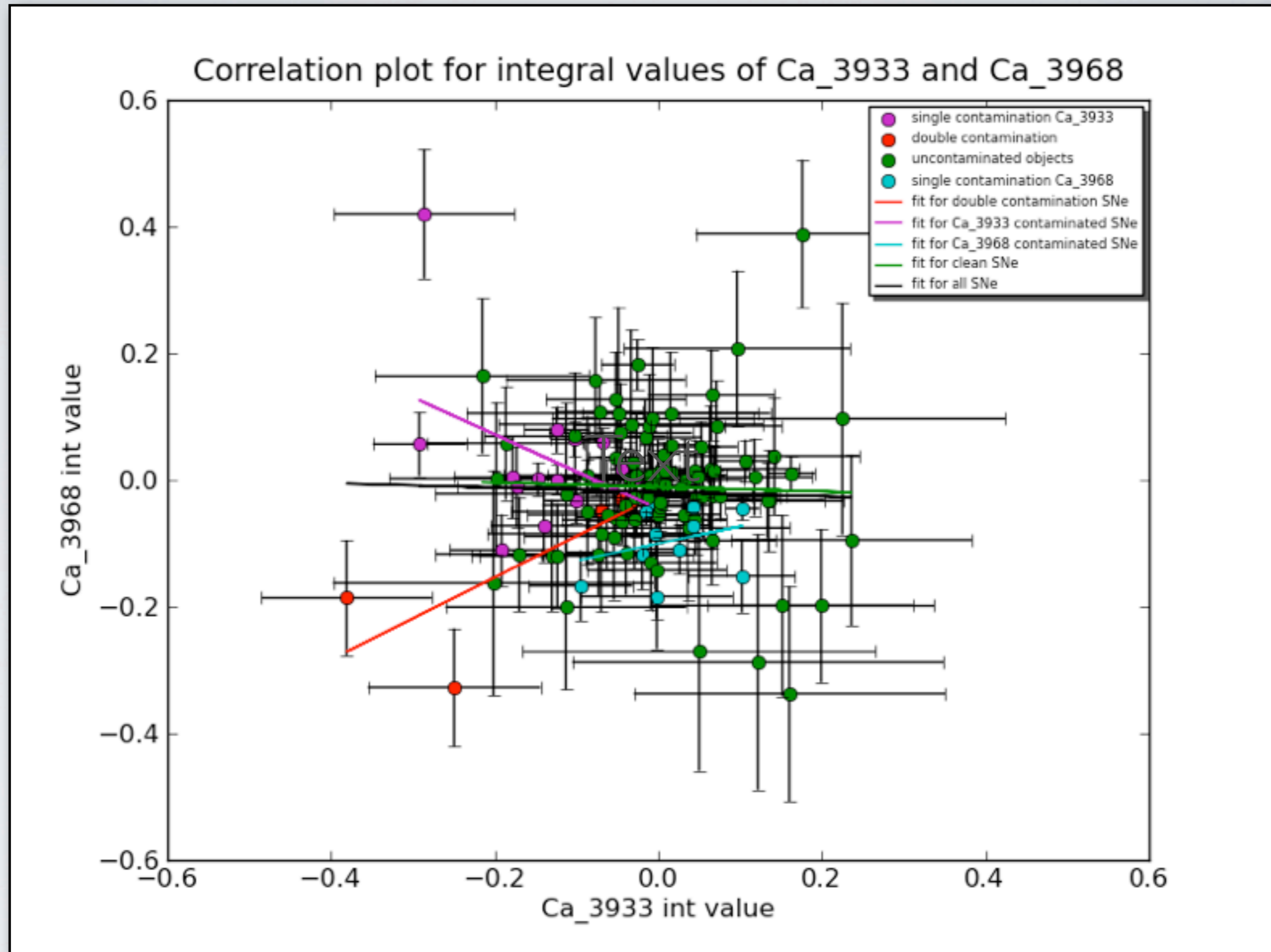
SN2004gc coadd for H peak at 6562.820000 + zoom



SNF20071003-004 coadd for H peak at 6562.820000 + zoom

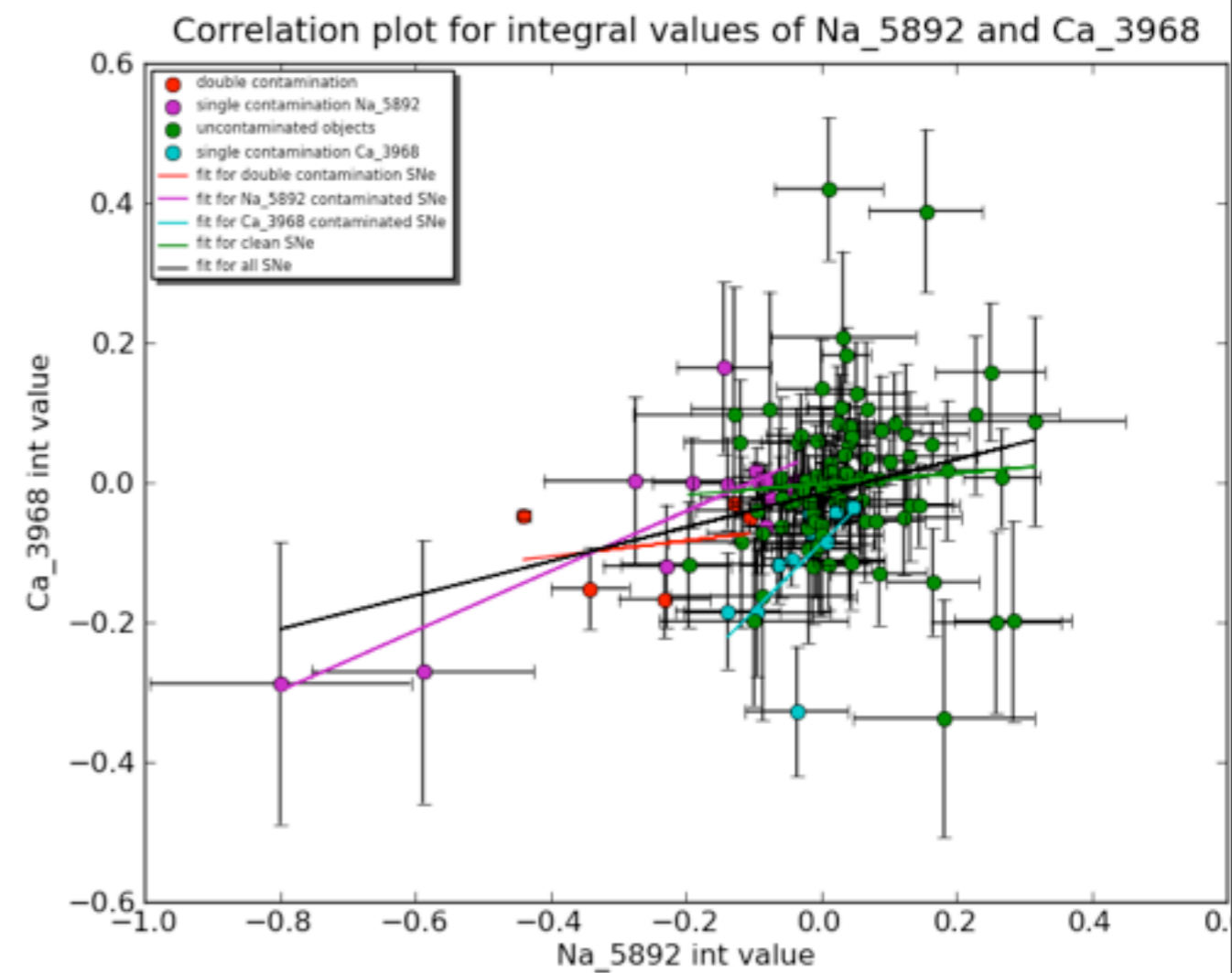
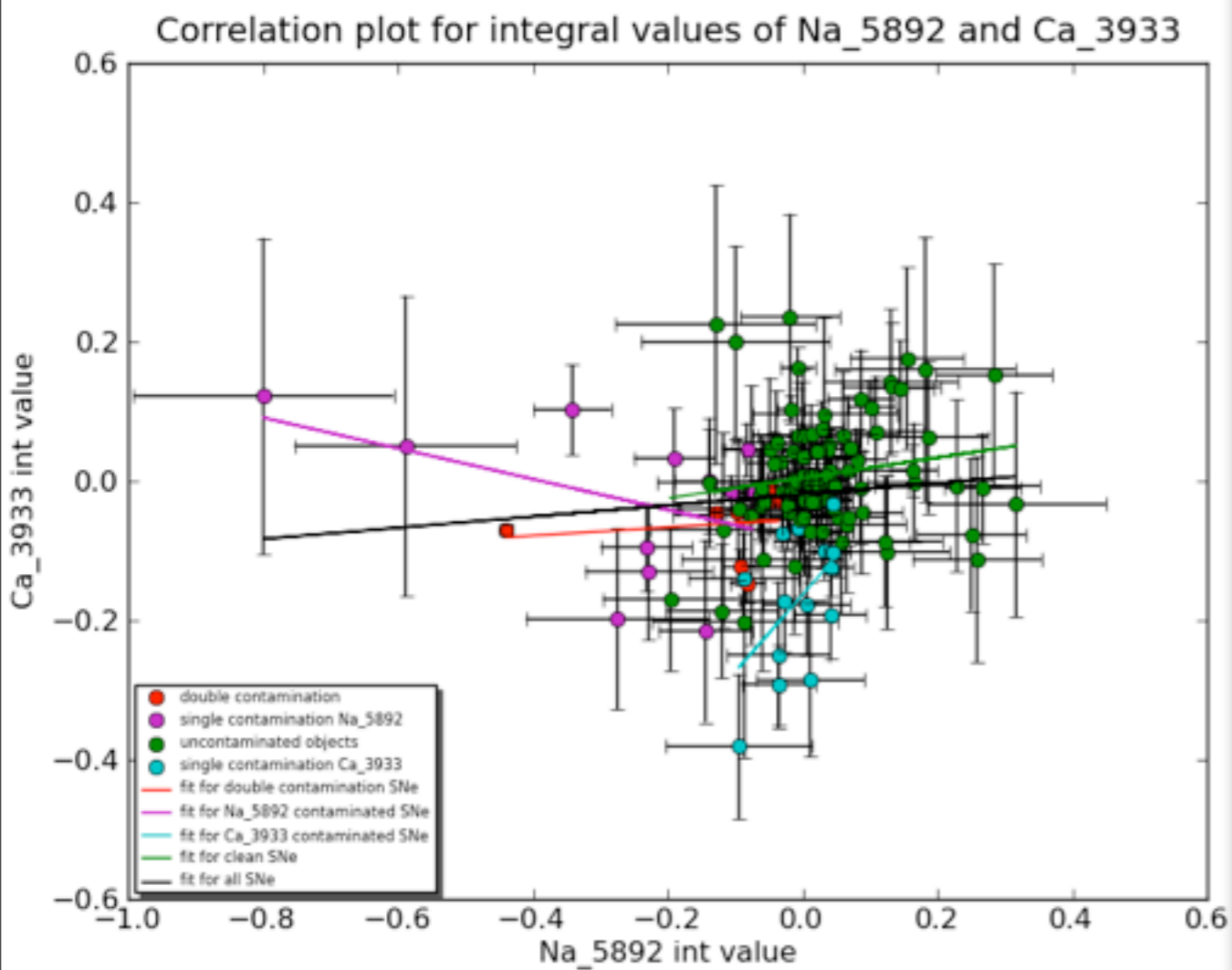


CORRELATIONS ENTRE LES LIGNES DE CA-H ET CA-K



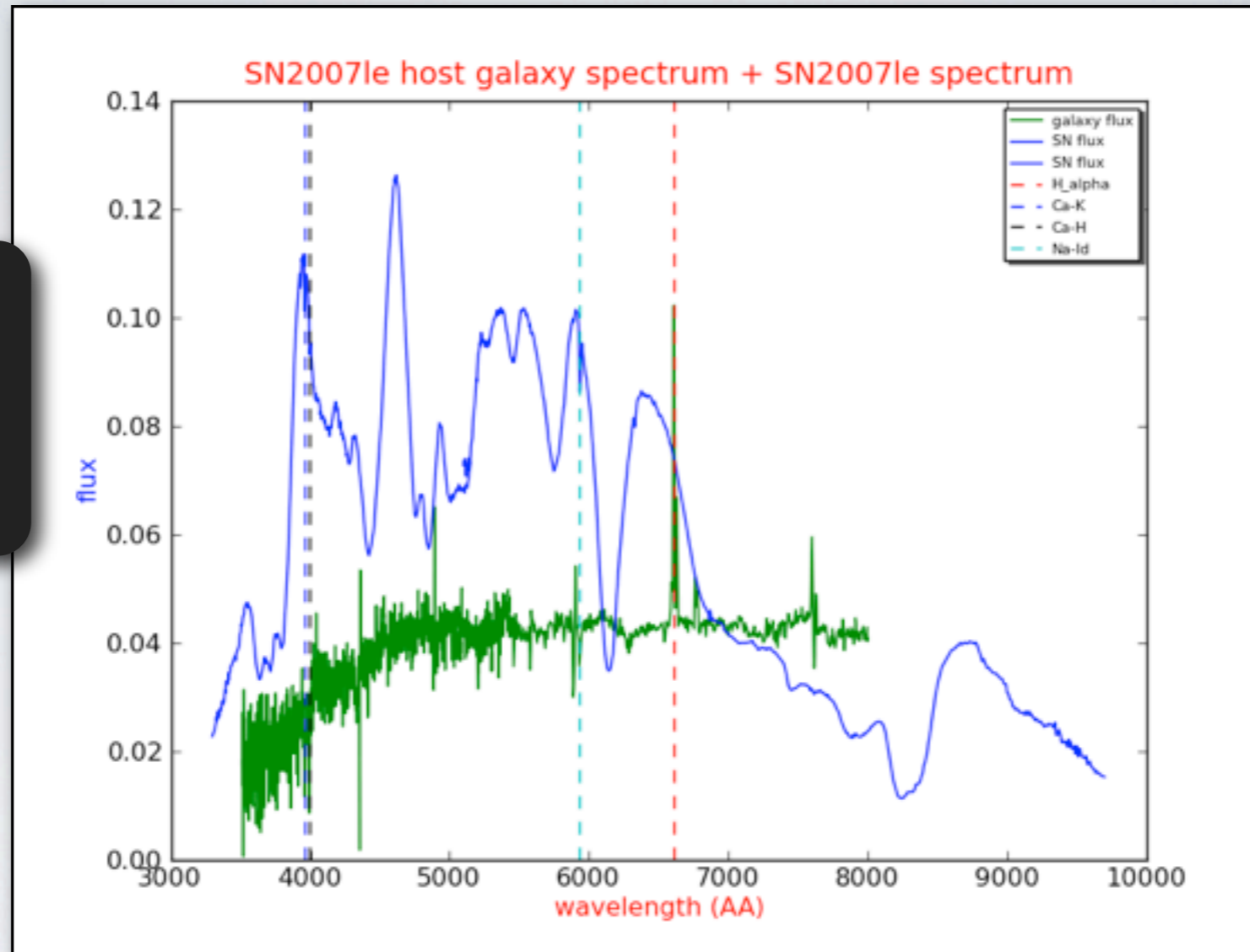
Related web page : http://snovae.in2p3.fr/canto/scratch/FEATURES_DATAS/ALPERT/training_plus_validation/HISTOGRAMS/atom_intercorrelation.html

Corrélations entre les lignes de Ca et de Na-ID

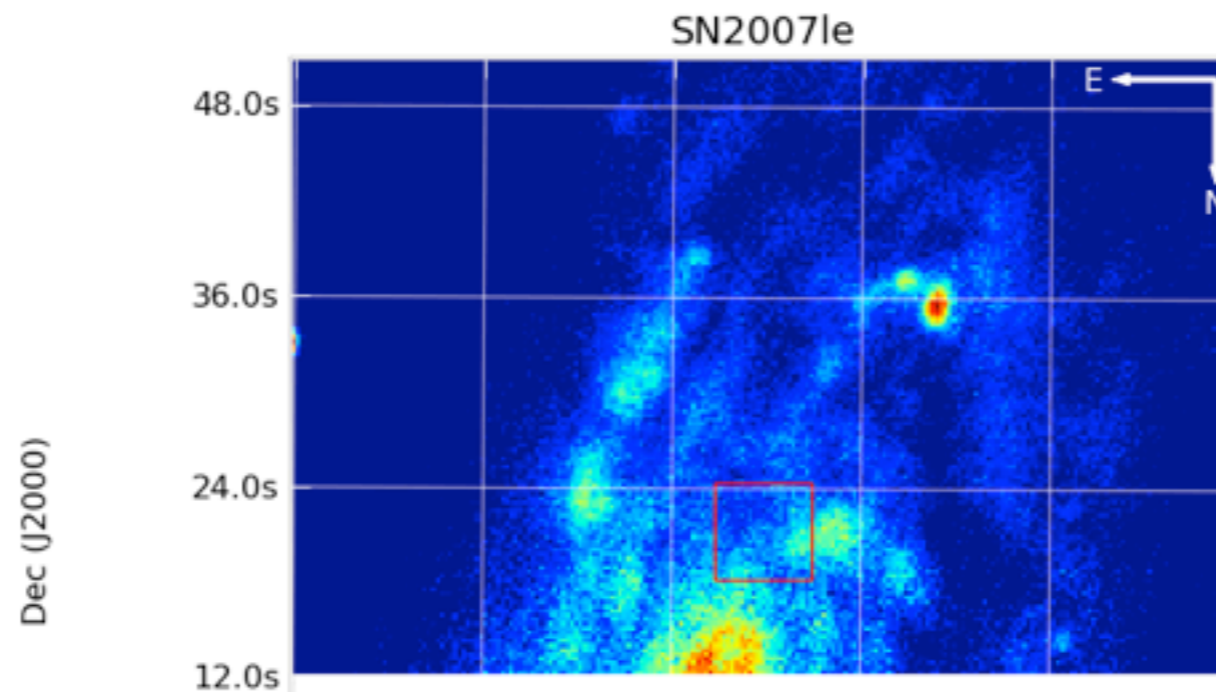


COMPARAISON DU SPECTRE GALACTIQUE ET DE LA SN

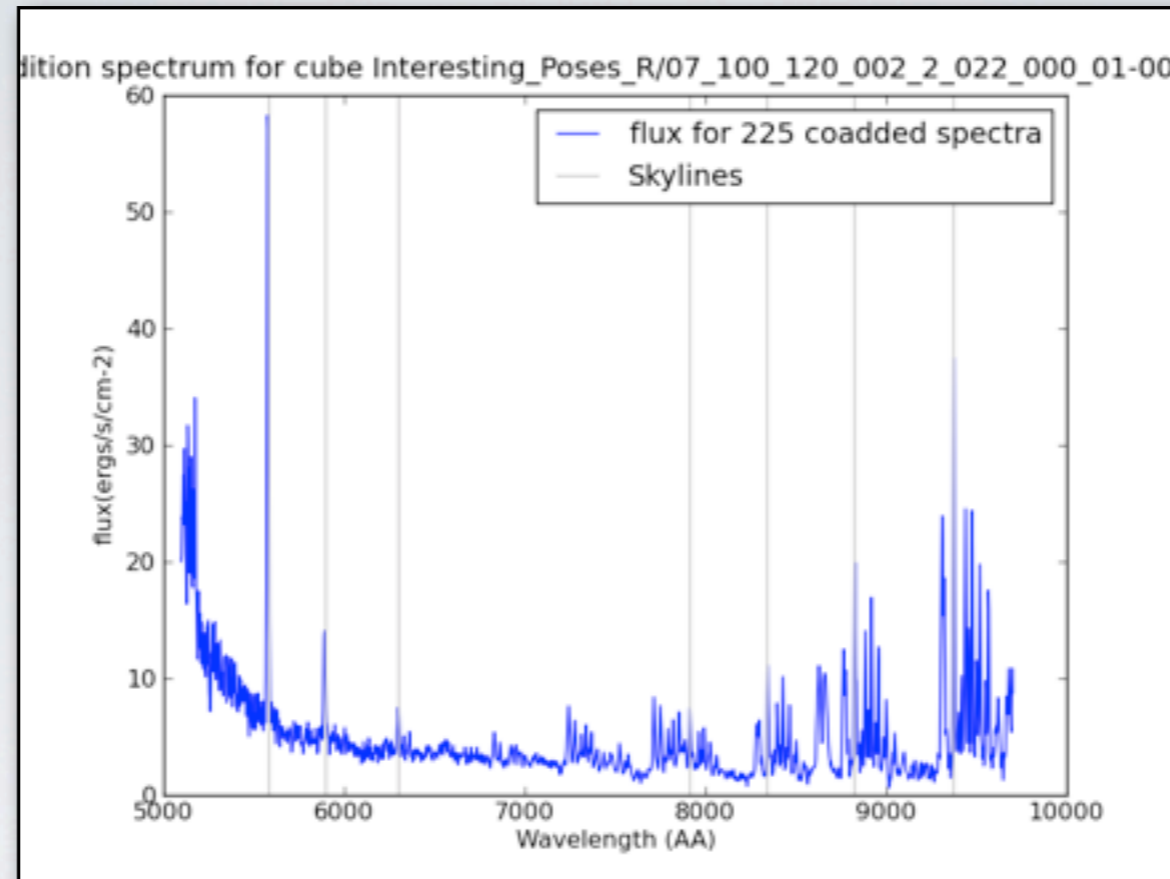
Comparaison de lignes d'émission et d'absorption galactiques avec celles de la SN



Localisation de la SN dans la galaxie

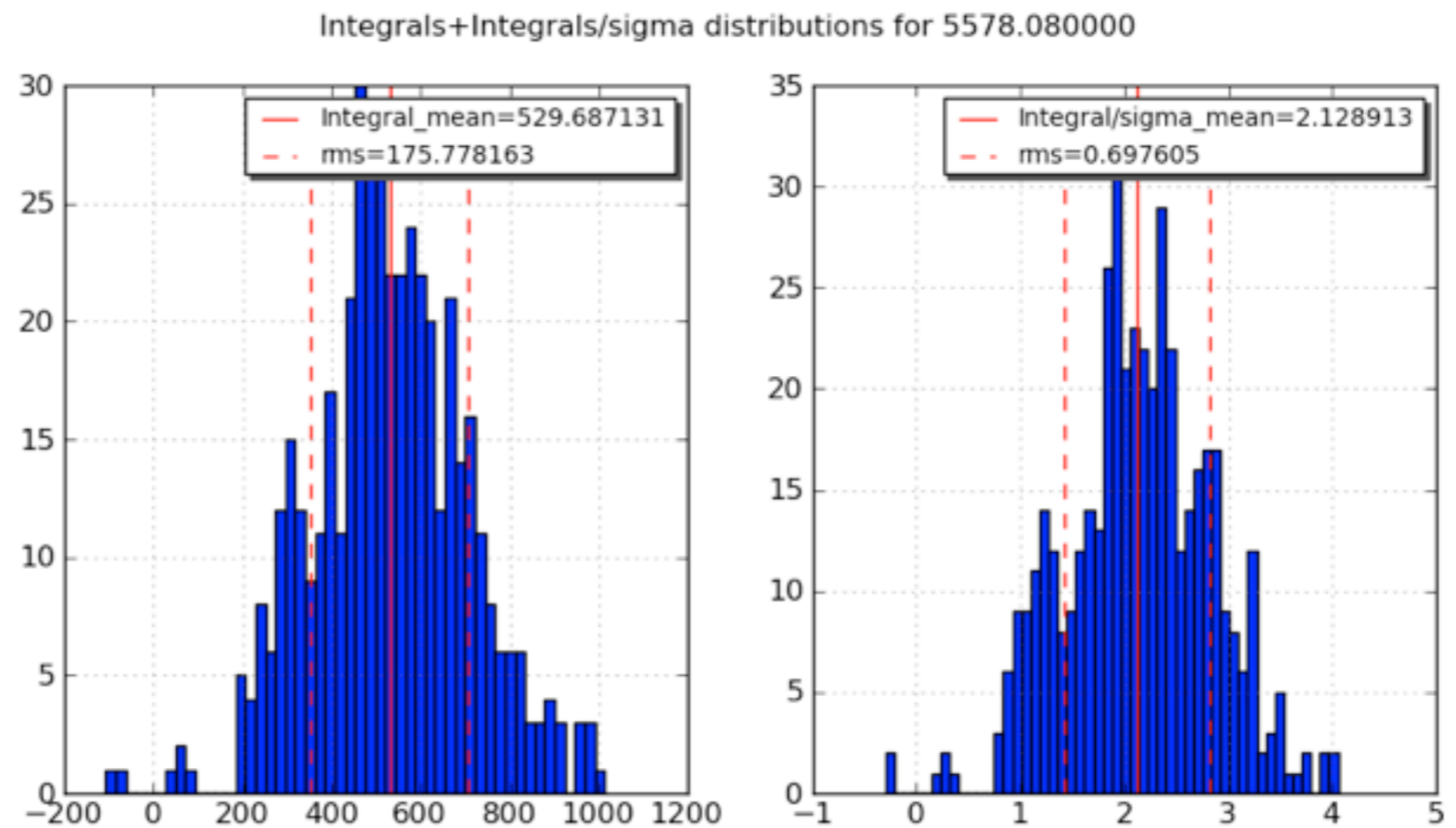


ANALYSES DES CUBES DE CIEL

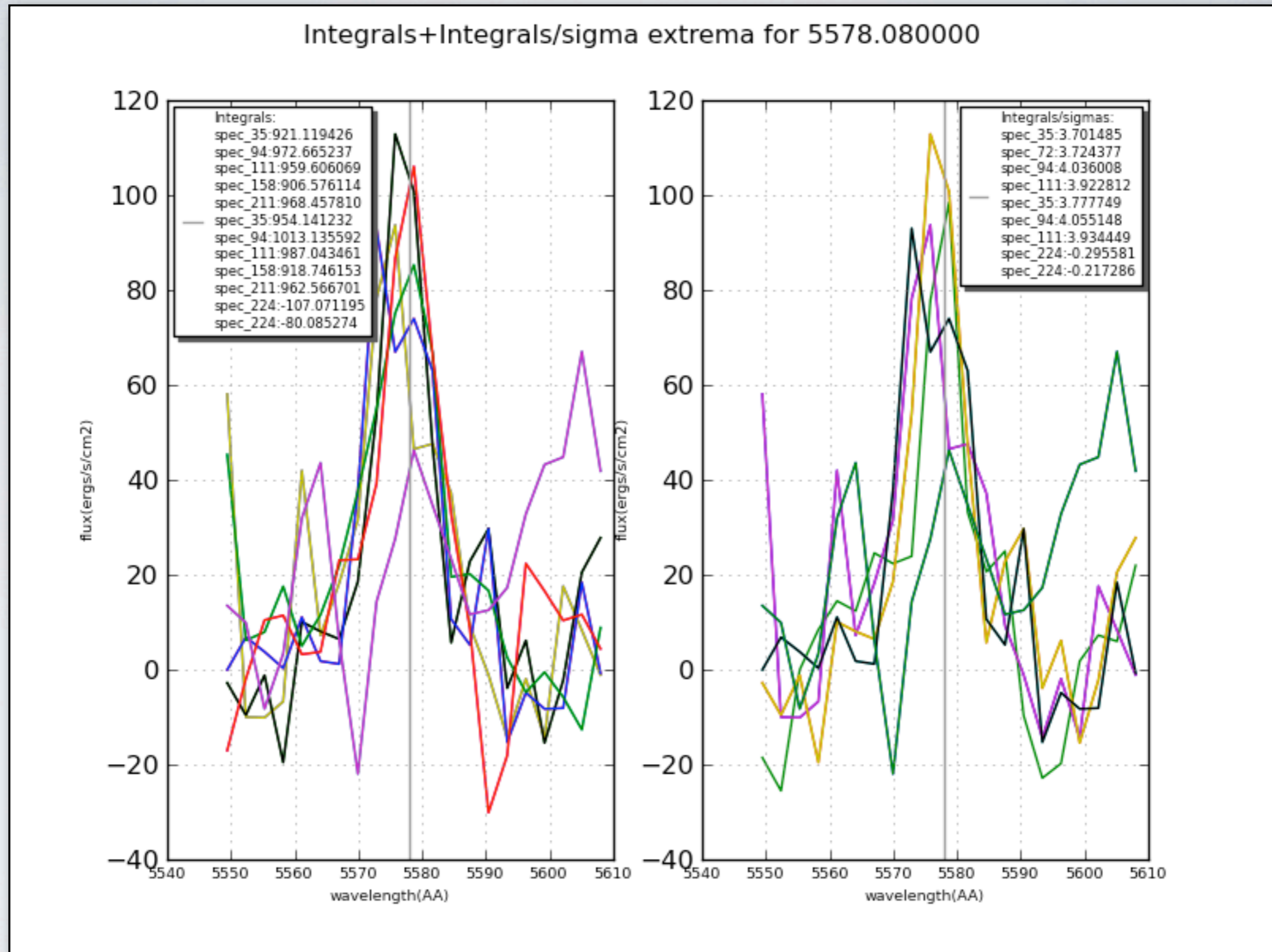


Spectre de coaddition d'un cube de ciel

Distributions des valeurs d'intégrales et de leur signifiante pour un exemple de cube de ciel



ANALYSES DES CUBES DE CIEL (SUITE)



Variations spectrales des raies de ciel à 5578 Å sur les spaxels extrêmes