

## Archéologie Galactique

L'Archéologie Galactique consiste à étudier la formation et l'évolution de la Voie Lactée via la détermination des propriétés des étoiles qui la composent. La mesure des **abondances chimiques stellaires** joue un rôle fondamental dans cette étude : elle nous informe sur l'abondance des éléments chimiques présents lors de la formation de l'étoile donc sur l'évolution chimique de la Galaxie. De plus, la caractérisation de populations galactiques ne peut être réalisée que par l'analyse d'un nombre conséquent de **spectres stellaires**. Un des enjeux de l'Archéologie Galactique est donc de traiter de manière automatisée ces grandes quantités de données.

Dans le cadre de ce travail, la mesure de **largeurs équivalentes** de raies d'éléments lourds a été faite de manière **automatique** sur 25500 spectres FEROS grâce au programme ARES (Sousa et al. 2007). Ces mesures, jamais encore réalisées à si grande échelle permettront à terme de déterminer les **abondances chimiques** de ces éléments lourds dans un très grand nombre d'étoiles du voisinage solaire et ainsi d'ajouter des contraintes aux modèles d'évolution des populations stellaires de notre Galaxie.

## Contribution au projet AMBRE

A l'heure actuelle, l'histoire de la formation et de l'évolution de la Voie Lactée est mal connue. En effet, le scénario standard ( $\Lambda$ CDM) de formation hiérarchique des structures de l'Univers rencontre des problèmes à l'échelle de la Galaxie. Le projet commun entre l'ESO et l'OCA, AMBRE (analyse de tous les spectres stellaires de l'ESO) a pour but d'apporter de nouvelles contraintes au scénario de formation de la Voie Lactée.

### Eléments chimiques et raies étudiées :

- Eléments chimiques lourds ( $Z > 26$ ), formés par capture de neutrons lents (éléments 's') dans des étoiles de faible masse. Leur abondance chimique permet de contraindre l'histoire de la formation stellaire.
- 19 raies testées, issues de l'analyse chimique en éléments 's' de 79 étoiles de 19 amas ouverts de notre Galaxie (Maiorca et al. 2011). Au final, sélection des raies peu mélangées (**Table 1**)

### Paramètres fournis par le projet AMBRE :

- 25500 spectres FEROS normalisés (**Fig.1**)
- Température (Teff), gravité de surface (log(g))
- Métallicité [M/H] et abondances des éléments  $\alpha$  [ $\alpha$ /Fe]
- Vitesse radiale (Vrad), erreur associée ( $\Delta$ Vrad)
- Rapport signal/bruit (SNR)

**Table 1 : éléments et raies étudiés**

YII (Z=39)	ZrII (Z=40)	LaII (Z=57)
4398.02 Å	4208.98 Å	3988.57 Å
4854.87 Å	4379.74 Å	4086.71 Å
4883.69 Å		4333.77 Å

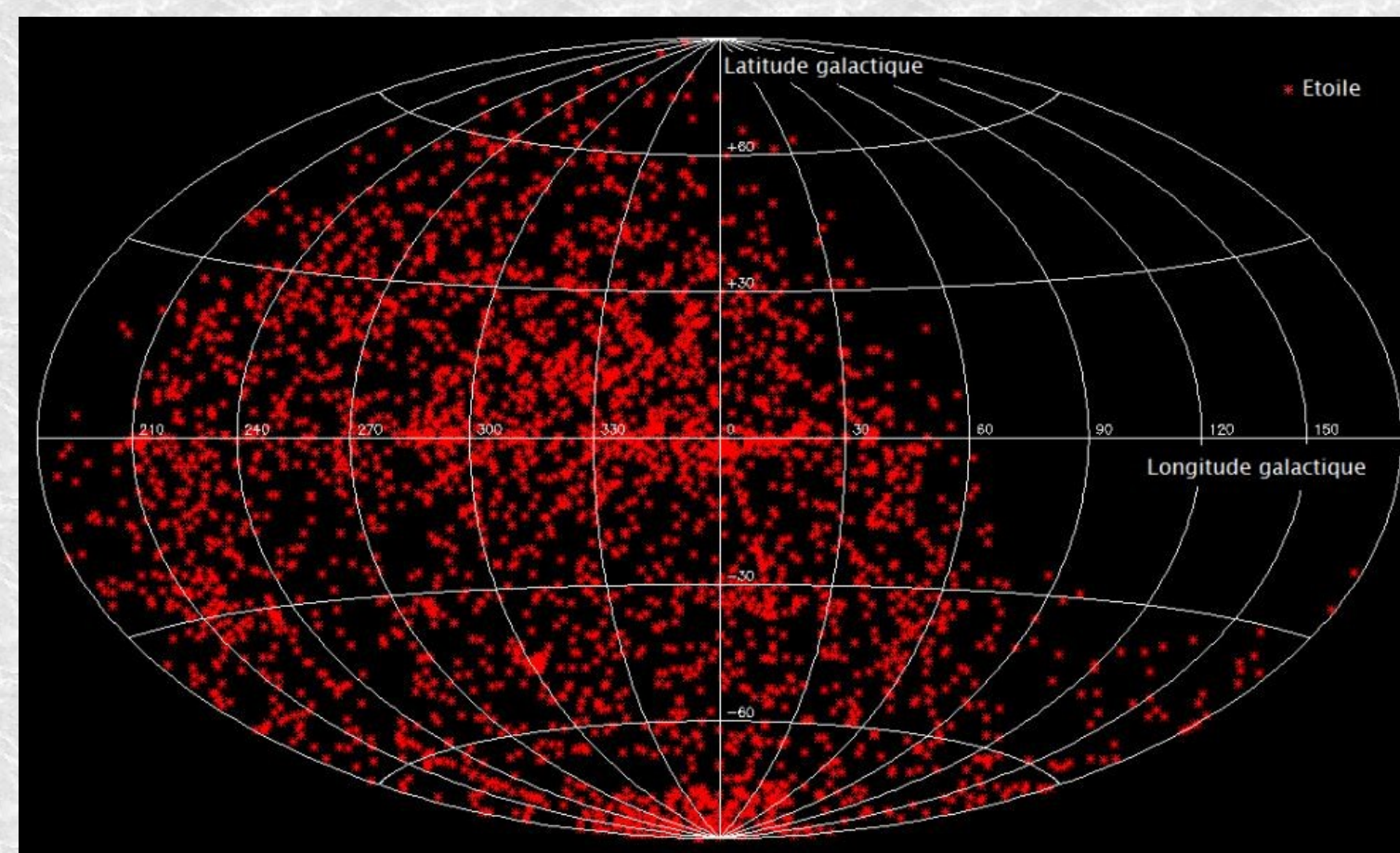
### Critères de sélection des spectres de l'échantillon FEROS à analyser :

- Spectre traité si les 7 paramètres précédents sont connus, si  $\Delta$ Vrad < 10km/s et SNR > 40.

### Préparation des spectres :

- Correction du décalage Doppler à partir de Vrad
- Mise au repos des spectres
- Effet Doppler-Fizeau :

**Figure 1 : Répartition en coordonnées galactiques des spectres FEROS**



$$\lambda_{Lab} = \frac{\lambda_{Mes}}{1 + \frac{V_{rad}}{c}} \quad (1)$$

$\lambda_{Lab}$  = longueur d'onde dans le laboratoire

$\lambda_{Mes}$  = longueur d'onde non corrigée

C = vitesse de la lumière

**Prétraitement systématique : 4487 spectres conservés & sélection de 8 raies à étudier**

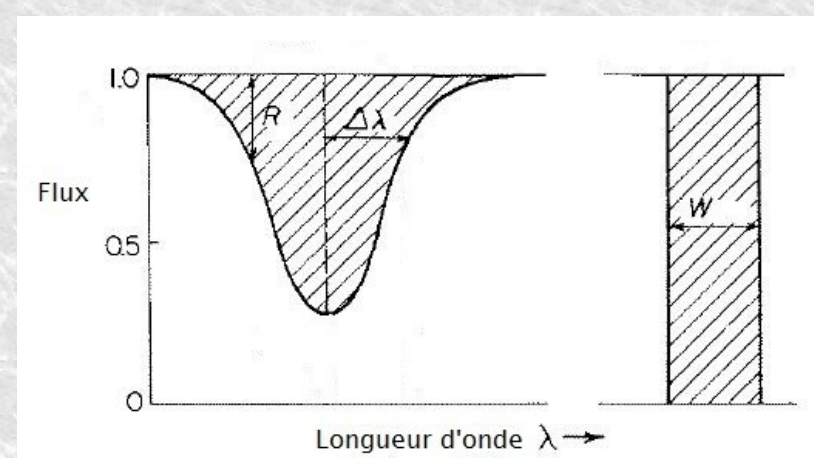
## Analyse chimique d'une étoile:

Caractériser une étoile passe par la détermination de ses abondances chimiques en surface. Pour cela, on peut utiliser la notion de largeur équivalente.

### Largeur équivalente W :

- Correspond à la surface de la raie étudiée
- Zones hachurées sur la **Fig. 2**
- Profil de la raie dépendant notamment de la température et de l'abondance chimique de l'élément étudié

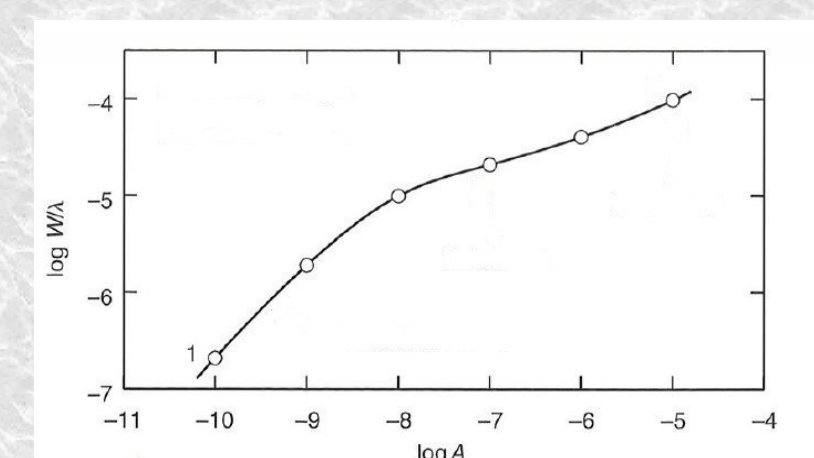
**Figure 2 : Illustration d'une largeur équivalente**



### Mesurer une abondance chimique :

- W dépend de l'abondance chimique (A) de l'élément étudié, si Teff et log(g) connus.
- Abondance chimique extraite par modélisation d'une courbe de croissance (**Fig.3**)
- Nécessité de calculer automatiquement W d'au moins 2 raies pour chaque élément étudié

**Figure 3 : Courbe de croissance**



**Pour chaque étoile de la Fig.1, calcul de l'abondance en LaII, ZrII et YII par mesure de W**

## Mesure automatique de largeurs équivalentes Programme ARES

### Mesure de largeurs équivalentes par ARES :

- ARES : programme écrit en C mesurant W pour plusieurs raies d'un seul spectre (Sousa et al. 2007)
- Lissage de la raie avec une gaussienne donc nécessité d'un profil gaussien

### Calibration des paramètres d'entrée :

- Paramètres testés empiriquement sur le Soleil, pour différentes résolutions et valeurs de SNR
- 10<sup>5</sup> tests effectués sur le spectre solaire

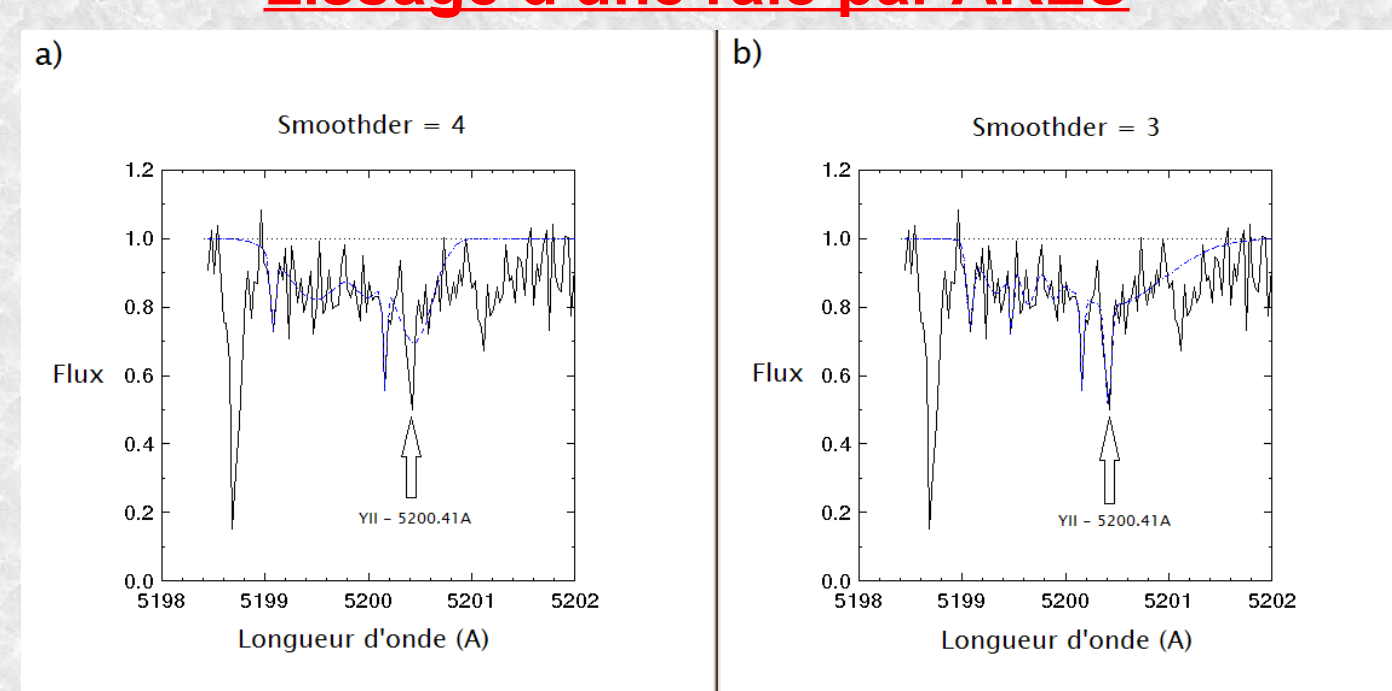
### Rejt :

- Permet de localiser le continu du spectre
- Dépend du SNR du spectre étudié
- Paramètre sans dimension

### Smoothder :

- Permet l'élimination du bruit lors du calcul de W
- Valeur sans dimension comprise entre 2 et 4
- **Fig.4 a)** : Raie à 5200.41A non lissée par ARES
- **Fig.4 b)** : Raie correctement lissée

**Figure 4 : test sur le spectre solaire Lissage d'une raie par ARES**



**Ecriture d'un script pour mesurer automatiquement W par ARES sur 4487 spectres Smoothder=3 & Rejt=0.990 → Paramètres optimaux pour l'analyse FEROS**

## Estimation des erreurs lors d'une mesure automatique de largeurs équivalentes

### Tests numériques :

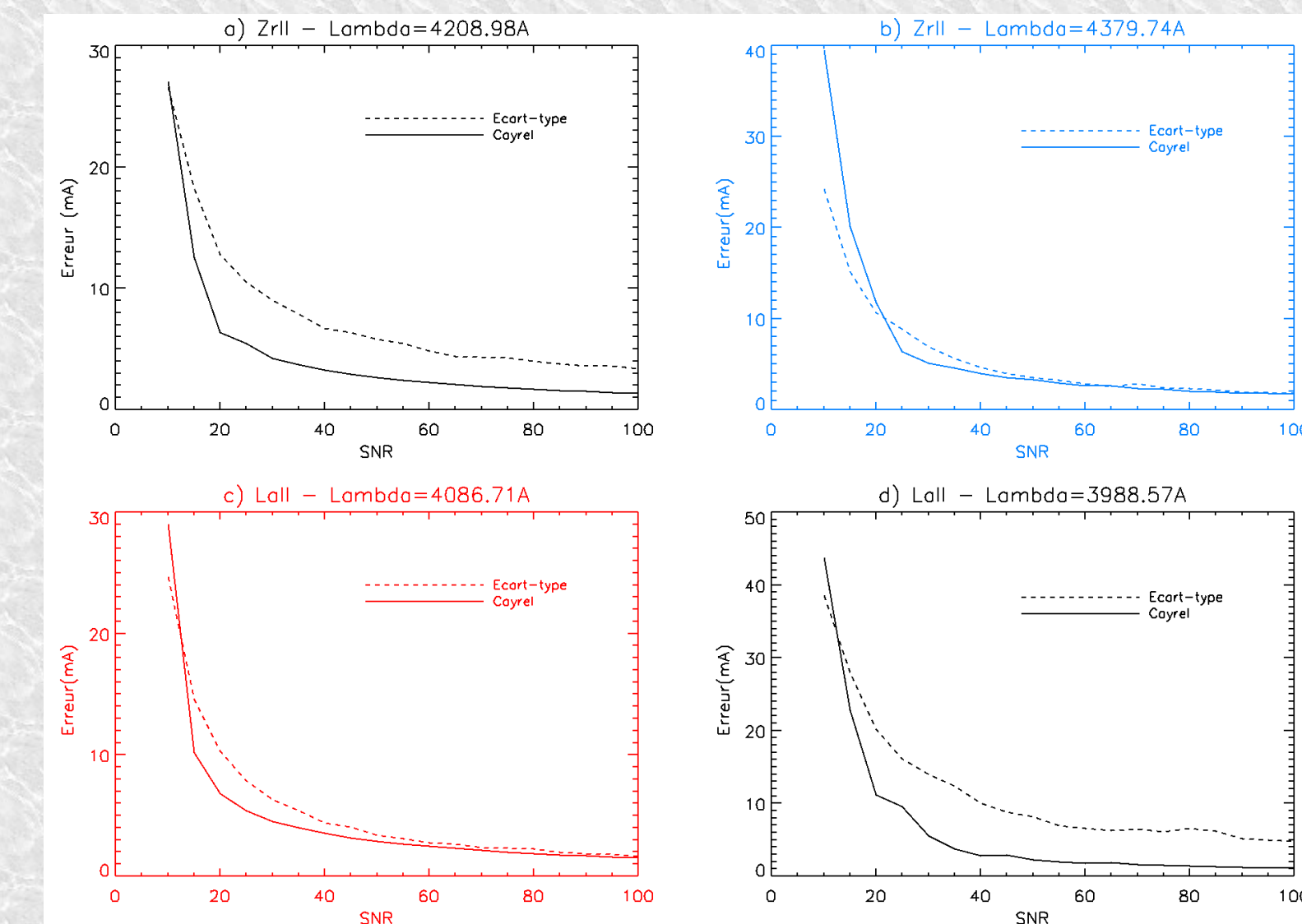
- Mesures de W sur le spectre solaire bruité avec un SNR  $\in [10, 100]$  par pas de 10
- 1000 spectres bruités pour chaque valeur de SNR pour avoir une statistique correcte
- Détermination de l'écart-type sur la mesure de W

### Comparaison avec une relation théorique : Loi de Cayrel (1988)

- Permet de prédire le comportement de l'erreur lors d'une mesure de W (**Eq.2**)
- Fonction de la taille du pixel  $\delta$ , du SNR, de la FWHM (Full Width at Half Maximum) de la raie

$$\Delta W = 1.6 \times \sqrt{\delta \times FWHM / SNR} \quad (2)$$

**Figure 5 : Comparaison de la relation de Cayrel avec nos tests sur 10000 spectres bruités Variation de l'erreur sur W en fonction du SNR**



- **Fig.5, a) et d)** : l'écart-type est supérieur à la loi de Cayrel, la présence probable de mélange de raies (blend) peut expliquer cet écart à la théorie.
- **Fig.5, b) et c)** : l'écart-type épouse parfaitement la loi de Cayrel.

**Blend faible : équation (2) retrouvée sur nos tests → Erreur sur W calibrée**

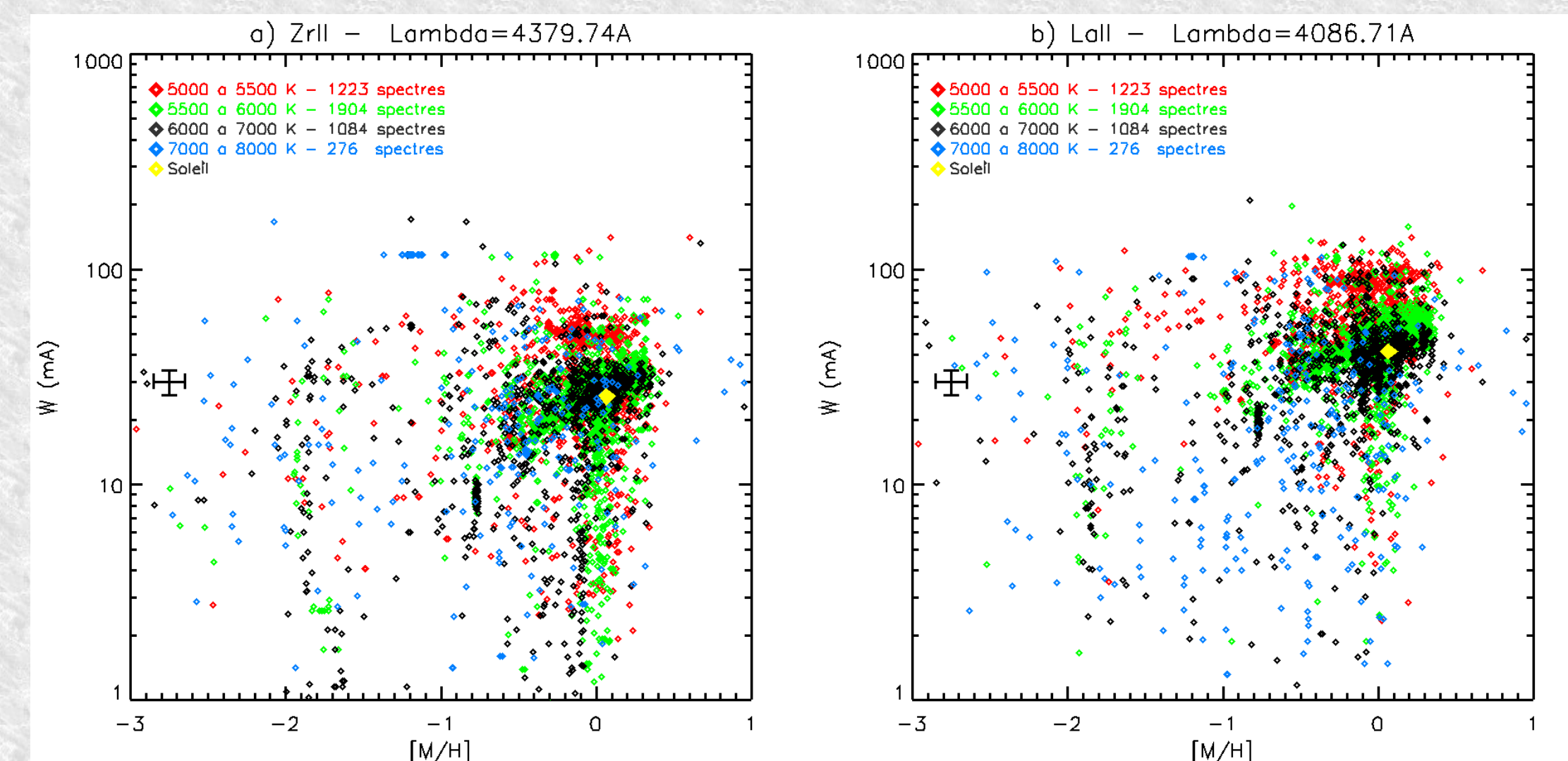
## Résultats

La mesure de largeurs équivalentes a été réalisée automatiquement sur les spectres FEROS correspondant à nos critères de qualité. Nous avons mesuré W pour 8 raies d'éléments 's' pour chacun des 4487 spectres sélectionnés, correspondant à 2057 étoiles.

### Comportement de W suivant la métallicité de l'étoile :

- Métallicité [M/H]: abondances de tous les éléments plus lourds que l'hélium
- Enjeu : observer une corrélation entre W et [M/H]

**Figure 6: distribution de W suivant [M/H]**



- **Fig.6 :** - Présence d'une majorité d'étoiles riches en métaux ([M/H] > -0.5)
- Dispersion de W pour de faibles métallicités (majoritairement des étoiles chaudes)
- Distribution semblable pour le ZrII et le LaII (**Fig.6.a)** et **Fig.6.b)**)

Pour les raies d'un même atome, on observe la même distribution de W. On retrouve ce comportement pour les 3 éléments chimiques étudiés, ce qui confirme que ces éléments 's' sont synthétisés dans le même type d'étoile. On constate enfin une forte variation de W pour les étoiles ayant 5500K < Teff < 6000K.

→ Sur-abondance en éléments pour certaines de ces étoiles ?

**Mise en évidence d'une forte variation de W en fonction de [M/H]  
Création d'une base de données de 35900 largeurs équivalentes, unique en son genre  
Le comportement de l'abondance chimique sera dicté par celui de W.**

## Conclusion et discussion

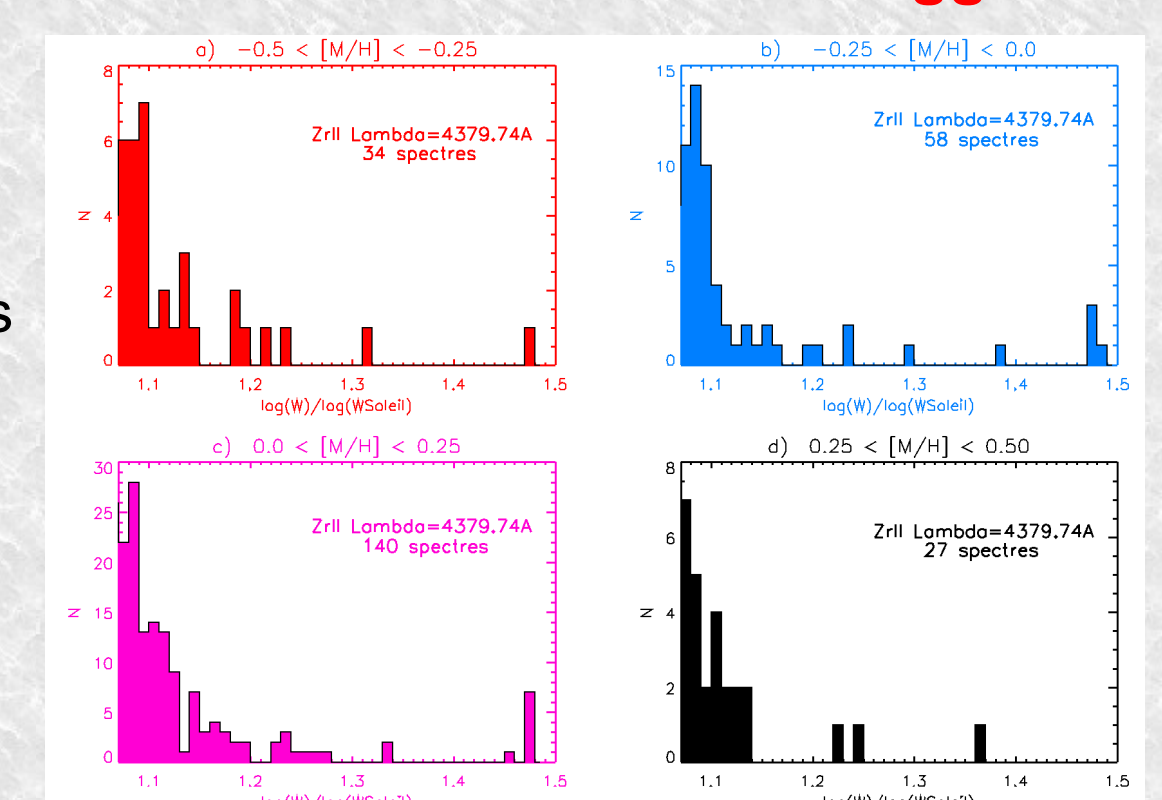
La détermination **automatique** de largeurs équivalentes a été réalisée pour 3 raies de l'Yttrium II, 3 de Lanthane II et 2 de Zirconium II sur 4487 spectres correspondant à 2057 étoiles, soit près de 36000 raies mesurées. Ce travail, par son **approche novatrice**, a permis de fournir des mesures de W en quantité jamais encore atteinte pour ces **éléments lourds**.

Concernant la distribution de W par rapport à celle du Soleil, on constate sur la **Fig.7** que 259 spectres correspondant à 197 étoiles naines de type solaire possèdent de fortes valeurs de W (jusqu'à 3 fois W<sub>0</sub>). Ce comportement se retrouve également pour YII et LaII.  
→ Probable **sur-abondance** en éléments 's' pour ces étoiles

Ces résultats vont permettre de déterminer les **abondances chimiques** de ces éléments dans les étoiles analysées et ainsi ajouter une **contrainte** supplémentaire au modèle d'évolution galactique.

**Enfin, la procédure de calcul va être mise à disposition de AMBRE pour de nouvelles analyses spectrales.**

**Figure 7 : Histogramme de W 5500 K < Teff < 6 000 K & logg < 4**



### Références

- Cayrel, R., " Data analysis " 1988IAUS..132..345C
- Gray, D.F. 2005, The observation and Analysis of Stellar Photospheres, CUP
- Maiorca, E., et al. 2011, ApJ accepted.
- Sousa, S.G., et al. 2007, A&A 469,783-791
- Worley, C. et al. 2011, A&A soumis.