

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Physiques

---

# ÉTUDE DE SPECTRES INFRAROUGES D'ÉTOILES GÉANTES ROUGES ÉVOLUÉES

---

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE  
INSTITUT D'ASTRONOMIE ET D'ASTROPHYSIQUE

réalisé par  
Margaux VANDERERVEN

supervisé par  
Sophie VAN ECK

Année académique 2024-2025

# ÉTUDE DE SPECTRES INFRAROUGES D'ÉTOILES GÉANTES ROUGES ÉVOLUÉES

INSTITUT D'ASTRONOMIE ET D'ASTROPHYSIQUE

---

Margaux VANDERERVEN

## Résumé

La poussière

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Débroussailler</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Molécules</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>TS</b>	<b>2</b>
<b>5</b>	<b>Macroturbulence</b>	<b>2</b>
<b>6</b>	<b>Abondance CNO</b>	<b>3</b>
6.1	1 step . . . . .	3
<b>7</b>	<b>Métallicité</b>	<b>4</b>
<b>8</b>	<b>Teff</b>	<b>4</b>
<b>9</b>	<b>logg</b>	<b>4</b>
<b>10</b>	<b>vitesse de micro</b>	<b>4</b>
<b>11</b>	<b>NLTE</b>	<b>4</b>
<b>12</b>	<b>abondance d'éléments lourds</b>	<b>4</b>
<b>13</b>	<b>détermination d'abondance</b>	<b>6</b>
<b>A</b>	<b>Table</b>	<b>8</b>

# 1 INTRODUCTION

# 2 DÉBROUSSAILLER

# 3 MOLÉCULES

Synthèse avec modèle :

Modèle	$T_{\text{eff}}$ (K)	$\log g$ (cm s <sup>-2</sup> )	[Fe/H] (dex)	Mass (M <sub>☉</sub> )	[s/Fe] (dex)
A	4000	1.00	-0.50	1.0	+0.00

**Notes.** 4000g1.0z-0.50m1.0t02a+0.20c+0.346n+0.00o+0.20r+0.00s+0.00

Molécules	Bande H	Bande K	Cat.	Molécules	Bande H	Bande K	Cat.
<sup>12</sup> C <sup>14</sup> N	55.14 %	44.35 %	I	<sup>28</sup> SiH	< 0.01 %	0.02 %	III
<sup>13</sup> C <sup>14</sup> N	32.00 %	14.51 %	I	<sup>28</sup> SiO	< 0.01 %	0.04 %	III
<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O	75.33 %	72.01 %	I	VO	0.03 %	< 0.01 %	III
<sup>13</sup> C <sup>17</sup> O	0.04 %	1.96 %	II	YO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
<sup>16</sup> OH	59.68 %	31.59 %	I	<sup>48</sup> TiO	0.06 %	< 0.01 %	III
<sup>56</sup> FeH	3.12 %	0.08 %	II	<sup>24</sup> MgH	< 0.01 %	< 0.01 %	III
HF	17.79 %	57.16 %	I	AlH	< 0.01 %	< 0.01 %	III
<sup>12</sup> CH	4.68 %	10.68 %	I	<sup>52</sup> CrH	< 0.01 %	0.00 %	III
<sup>13</sup> CH	0.15 %	0.39 %	III	H <sup>12</sup> CN	< 0.01 %	< 0.01 %	III
<sup>14</sup> NH	1.57 %	1.23 %	II	H <sup>13</sup> CN	< 0.01 %	< 0.01 %	III
<sup>12</sup> C <sup>12</sup> C	32.97 %	30.73 %	I	<sup>90</sup> ZrO	0.02 %	< 0.01 %	III
<sup>12</sup> C <sup>13</sup> C	14.12 %	12.26 %	I	<sup>91</sup> ZrO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
<sup>13</sup> C <sup>13</sup> C	0.38 %	0.25 %	III	<sup>92</sup> ZrO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.00 %	0.00 %	III	<sup>93</sup> ZrO	0.00 %	0.00 %	III
HCl	0.64 %	0.50 %	III	<sup>94</sup> ZrO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
H <sub>2</sub> O	1.75 %	6.80 %	II	<sup>96</sup> ZrO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
<sup>20</sup> CaH	< 0.01 %	< 0.01 %	III				

**Notes.** La catégorie I concerne les molécules contribuant à plus de 10%, la catégorie II celles à moins de 10% et plus de 1% et la catégorie III celles à moins de 1%. Les valeurs dans le colonne "Bande H" et "Bande K" sont le pourcentage en absorption du plus grand extremum du tracé de la différence entre le spectre synthétique atom + mol et le spectre synthétique atomique simple.  $\log \epsilon_C = 9,44$ ,  $\log \epsilon_O = 9,56$  et  $\log \epsilon_N = 8,38$ ,  $\text{MACTurb} = 8,00$  kms-2,  $\text{MICROTurb} = 1,70$  et  $z = -0,3$ , ratio C = , ratio C/O=0.75.

# 4 TS

# 5 MACROTURBULENCE

Nous commençons par déterminer la macroturbulence à l'aide de raies propres dans le bande H et K. Nous effectuons des synthèses avec le modèle A de la Table ?? et les abondances CNO et paramètres stellaires de

la littérature Shetye et al. 2018. Nous procédons par minimisation  $\chi^2$  sur différentes raies propres avec comme paramètre libre l'abondance de l'élément et la macroturbulence. Les autres abondances sont scale à partir de Asplund et al. 2007.

Élément	$\lambda$ (Å)	$\lambda_{\min}$ (Å)	$\lambda_{\max}$ (Å)	$v_{\text{macro}}$ (km s <sup>-1</sup> )	$\log \varepsilon$	$\chi^2$
Fe I	15964.865			8.58		
Fe I	22257.107	22256.48	22257.87	8.65	7.10	0.0270
Fe I	22260.18	22259.67	22260.77	8.64	7.09	0.0132
Co I	16757.704			8.61		
Ti I	22211.22	22210.52	22211.91	8.90	4.88	0.0004
Ti I	22232.844			9.00		

**Notes.**

## 6 ABONDANCE CNO

il n'y a pas de raies atomiques de C, N, O dans l'infrarouge, donc nous regarderons les molécules de OH pour l'abondance d'oxygène, de CO pour l'abondance de carbone et de CN pour l'abondance de carbone.

### 6.1 1 STEP

Nous partons des paramètres stellaires de la littérature.  $[C/Fe]=0.35$ ,  $[N/Fe]=-0.1$ ,  $C/O=0.75$   $\log(C/O) = \log \epsilon_C - \log \epsilon_O$

si on prend abu solaire de Magg 2022,  $[X/Fe] = \log \epsilon_* - \log \epsilon_{sun} - [Fe/H]$   $\log \epsilon_* = [X/Fe] + \log \epsilon_{sun} + [Fe/H] = -0.1 + 7.98 - 0.3 = 7.58$  pour azote  $\log \epsilon_{sun_N} = 7.98$   $\log \epsilon_{sun_O} = 8.77$   $\log \epsilon_{sun_C} = 8.56$   $\log \epsilon_*$  pour C =  $0.35 + 8.56 - 0.3$

Abondance d'oxygène avec raie de OH, Cabu=8.44 (litt) et Nabu=7.38 (litt) Asplund. avec un ratio de  $^{12}C/^{13}C$  à 40 (valeur standard pour géantes)

-> Oabu =  $8.60 \pm 0.02$  et avec exclusion  $8.59 \pm 0.01$

Puis on repasse sur les raies de CO pour checker C avec donc Oabu = 8.59 et Nabu = 7.38 (litt) tjrs ratio  $^{12}C/^{13}C$ .

$\log \varepsilon_{\text{O}}$	$\log \varepsilon_{\text{C}}$	$\log \varepsilon_{\text{N}}$	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	Element
$8.59 \pm 0.01$	8.44	7.38	40	$^{16}\text{OH}$
8.59	$7.82 \pm 0.03$	7.38	40	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
8.59	7.82	7.38	20	$^{13}\text{C}^{17}\text{O}$
$8.30 \pm 0.02$	7.82	7.38	20	$^{16}\text{OH}$
8.30	$7.89 \pm 0.02$	7.38	20	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
$8.33 \pm 0.02$	7.89	7.38	20	$^{16}\text{OH}$
8.33	$7.86 \pm 0.03$	7.38	20	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
8.33	7.86	$7.84 \pm 0.02$	20	$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$
8.33	7.86	7.84	12	$^{13}\text{C}^{14}\text{N}$
$8.31 \pm 0.01$	7.86	7.84	12	$^{16}\text{OH}$
8.31	$7.88 \pm 0.03$	7.84	12	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
8.31	7.88	$7.84 \pm 0.02$	12	$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$

**Notes.** Chaque synthèse est réalisée sur des raies de l'élément se trouvant en 4ème colonne. Les paramètres fixés sont en noir et le paramètre déterminé en bleu.

## 7 MÉTALLICITÉ

$\log \varepsilon_{\text{Fe}} = 7.21$  solaire 7.45 donc  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.24$  à l'ETL  
en 16198.56 frot blendée, on l'élimine. 16645.874 pareil, on l'élimine.

## 8 TEFF

pente de quasi 0 donc 4000K bonne Teff à l'ETL

## 9 LOGG

on test plusieurs  $\log g$  avec différents modèles, +1, +2, +0, +3, +4 -> best fit +1 à l'ETL sur des raies profondes principalement de Mg et Ca (à tester encore) checker avec les isochrones et les tracés évolutifs l'un suppose l'âge de l'étoile l'autre sa masse

## 10 VITESSE DE MICRO

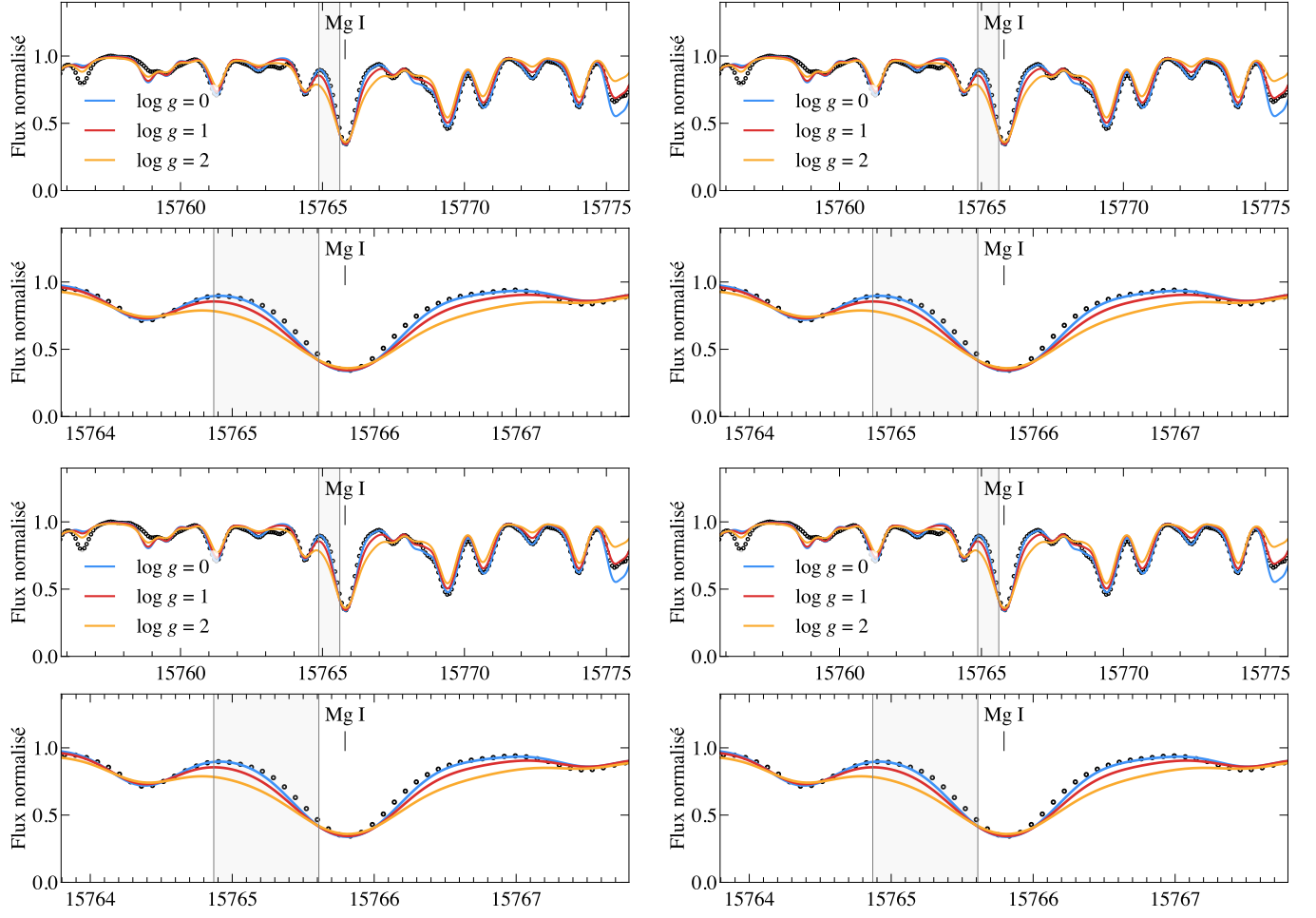
regarder avec eqwuidt la largeur équivalente sinon regarder avec les synthèses et plot python

## 11 NLTE

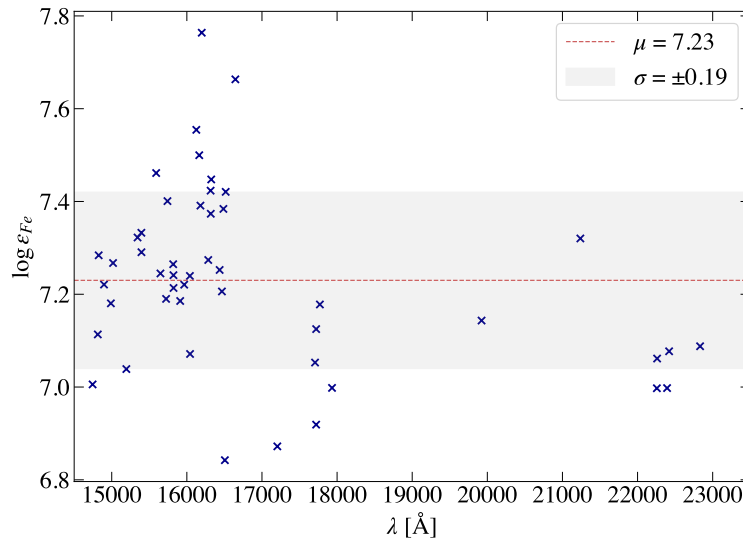
faire tourner le code pour les atomes pas possible de faire de hors etl pour les molécules, même pas pour tous les atomes

## 12 ABONDANCE D'ÉLÉMENTS LOURDS

regarder ce que je peux identifier  
Ca I, Mg I, Al I, Si I, K I, Ca I, Sc I, Ti II, Ti II, V I, Mn I, Fe I, Co I, Ni I, Cu I, Y I, Zr I, Ba I, Ce II, Ce III, Er II, Yb II.



**Notes.** Variation de la gravité de surface de l'étoile.



**Notes.** Abondance de Fe en fonction de la longueur d'onde. Dispersion forte, on regarde en détail les raies de Fe I.

# 13 DÉTERMINATION D'ABONDANCE

	$\lambda$	$\log gf$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$	$\chi^2$	$\log \varepsilon$
Na I	19452.98	-0.65	19451.82	19453.88		
	19505.74	-1.13	19504.79	19506.51		
	19776.77	-0.39	19775.41	19777.84		
	19853.09	0.40	19851.97	19854.25		
	19862.19	-1.14	19861.22	19863.30		

Al I

Notes.

## RÉFÉRENCES

- M. Asplund, N. Grevesse, and A. J. Sauval. The Solar Chemical Composition. *Space Science Reviews*, 130 :105–114, June 2007. ISSN 0038-6308. doi : 10.1007/s11214-007-9173-7. URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007SSRv..130..105G>. ADS Bibcode : 2007SSRv..130..105G.
- S. Shetye, S. V. Eck, A. Jorissen, H. V. Winckel, L. Siess, S. Goriely, A. Escorza, D. Karinkuzhi, and B. Plez. S stars and s-process in the Gaia era - I. Stellar parameters and chemical abundances in a sub-sample of S stars with new MARCS model atmospheres. *Astronomy & Astrophysics*, 620 :A148, Dec. 2018. ISSN 0004-6361, 1432-0746. doi : 10.1051/0004-6361/201833298. URL <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2018/12/aa33298-18/aa33298-18.html>. Publisher : EDP Sciences.



# A TABLE

Fe I	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
14745.39	14745.01	14745.93
14814.73	14814.25	14815.41
14826.41	14825.87	14826.95
14897.41	14896.89	14897.82
14988.78	14988.28	14989.29
15017.70	15017.25	15018.10
15194.49	15194.00	15194.93
15343.79	15343.33	15344.26
15394.67	15394.21	15395.14
15395.72	15395.22	15396.31
15591.49	15590.94	15591.95
15648.51	15648.03	15648.96
15723.59	15723.00	15724.01
15741.92	15741.43	15742.36
15818.14	15817.57	15818.58
15821.71	15821.21	15822.14
15822.82	15822.30	15823.30
15911.30	15910.82	15911.83
15964.86	15964.27	15965.43
16040.65	16040.17	16041.10
16042.72	16042.18	16043.19
16125.90	16125.45	16126.45
16165.03	16164.40	16165.57
16180.90	16180.44	16181.29

Fe I	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
16198.50	16197.86	16198.95
16284.77	16284.22	16285.39
16316.32	16315.75	16316.91
16318.69	16318.07	16319.23
16324.45	16323.96	16325.04
16436.62	16436.19	16437.04
16466.92	16466.24	16467.55
16486.67	16486.07	16487.23
16506.29	16505.74	16506.75
16517.22	16516.66	16517.67
16645.87	16645.31	16646.39
17204.30	17203.74	17204.83
17706.62	17705.95	17707.11
17721.09	17720.51	17721.75
17721.37	17720.51	17721.75
17771.12	17770.46	17771.70
17932.60	17931.95	17933.19
19923.34	19922.62	19923.86
21238.47	21237.74	21239.13
22257.11	22256.07	22257.87
22260.18	22259.25	22260.91
22392.88	22392.15	22393.39
22419.98	22419.14	22420.67
22832.36	22831.40	22833.06

Notes.

$^{16}\text{OH}$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
14613.49	14612.95	14613.96
14661.08	14660.58	14661.51
15002.17	15001.76	15002.54
15003.15	15002.69	15003.54
15130.89	15130.41	15131.42
15266.20	15265.56	15266.65
15278.53	15278.11	15279.12
15391.13	15390.57	15391.74
15409.18	15408.54	15409.70
15428.45	15427.98	15428.91
15429.64	15428.99	15430.07
15505.69	15505.13	15506.52
15568.78	15568.25	15569.26
15651.91	15651.36	15652.29
15719.68	15719.13	15720.14
15755.53	15754.91	15755.92
15756.52	15756.15	15756.85
16052.77	16052.25	16053.03
16247.89	16247.51	16248.21
16312.72	16311.87	16313.35
16347.49	16347.27	16347.89
16368.13	16367.49	16368.65
16448.05	16447.49	16448.50
16662.19	16661.81	16662.73
16729.78	16729.50	16730.04
16904.29	16903.69	16904.62
17096.38	17095.77	17096.70
17104.72	17104.29	17105.22
17239.75	17239.29	17240.15
17322.25	17321.94	17322.71
17423.86	17423.32	17424.33
17618.89	17618.35	17619.43
17772.70	17772.01	17773.10
17818.48	17818.10	17818.95
17825.20	17824.60	17825.61

$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
15780.09	15779.54	15780.63
16237.90	16237.36	16238.29

$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
14744.25	14743.77	14744.54
14747.20	14746.71	14747.72
14757.56	14757.17	14757.94
14759.84	14759.41	14760.42
14763.50	14762.97	14764.06
14833.25	14832.84	14833.69
15192.10	15191.68	15192.45
15447.11	15446.57	15447.58
16056.95	16056.43	16057.44
16167.23	16166.88	16167.50
16317.60	16317.14	16317.92
16358.15	16357.65	16358.58
16590.70	16590.39	16591.01
19833.59	19833.05	19834.02
19865.84	19865.17	19866.41
19906.49	19906.00	19906.97
19913.57	19912.92	19914.17
22220.20	22219.66	22220.63
22400.50	22399.90	22401.01
22593.83	22593.16	22594.40
22753.90	22753.19	22754.57