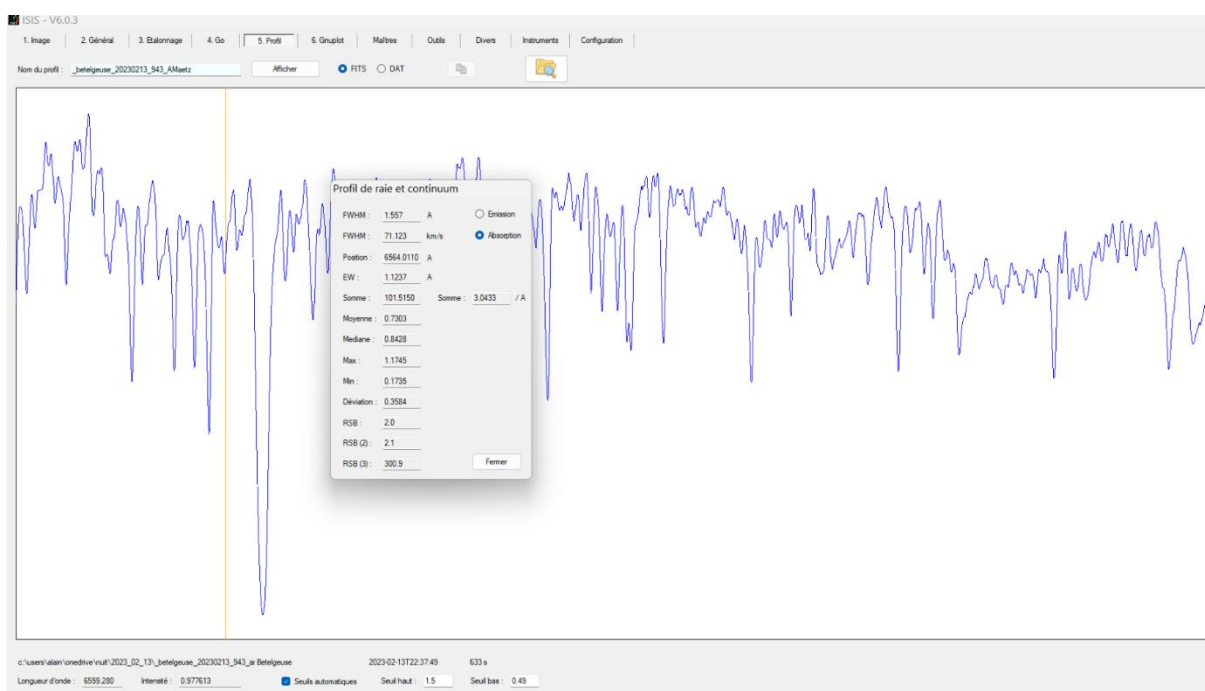


# Simulation des raies spectrales en haute résolution ( $r > 15000$ ) / Applications à l'étude des étoiles doubles spectroscopiques

**Résumé :** La spectroscopie haute résolution nous fournit des spectres détaillés dont les évolutions reflètent les transformations majeures au sein de systèmes stellaires multiples. Les mesures couramment utilisées pour qualifier certains aspects de ces spectres ne permettent pas de numériser la totalité de l'information qu'ils contiennent. Je propose ici, à l'aide de fonctions mathématiques simples, de simuler les phénomènes élémentaires d'absorption et d'émission qui, combinés numériquement, permettent la reconstruction de raies spécifiques des spectres observés. L'étude de l'évolution des paramètres déterminants ces fonctions permettra une compréhension approfondie des phénomènes sous-jacents.

## Les mesures les plus communément utilisées et leurs limites.

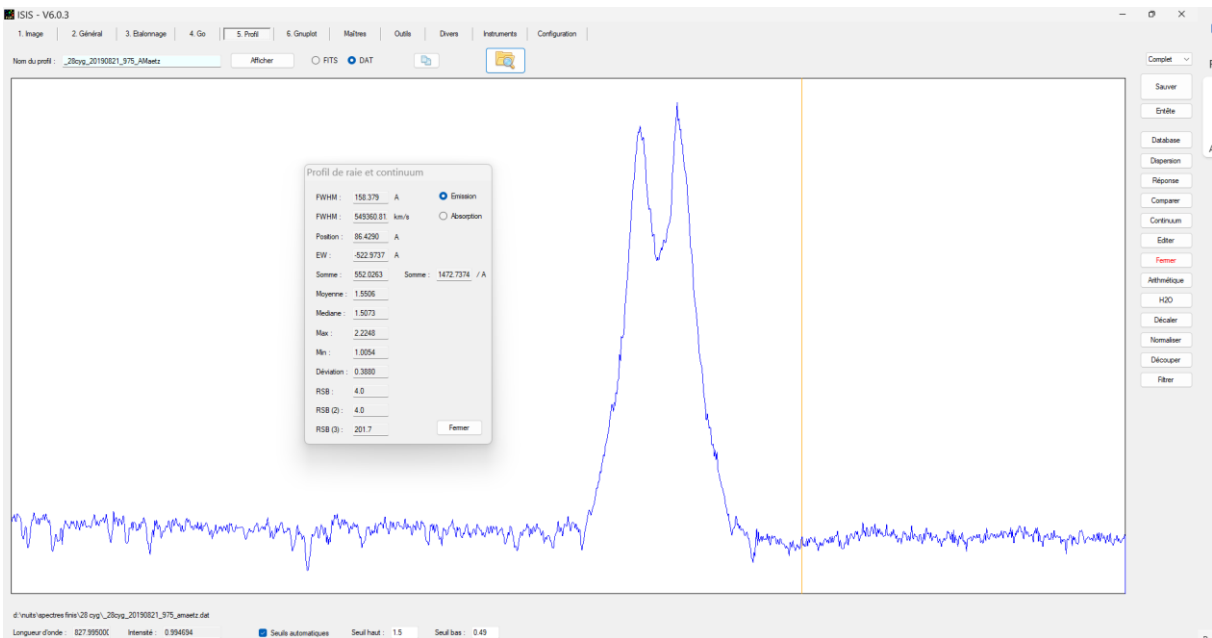
Ci-dessous le spectre de Bételgeuse autour de la raie Ha de l'hydrogène (6562.8Å)



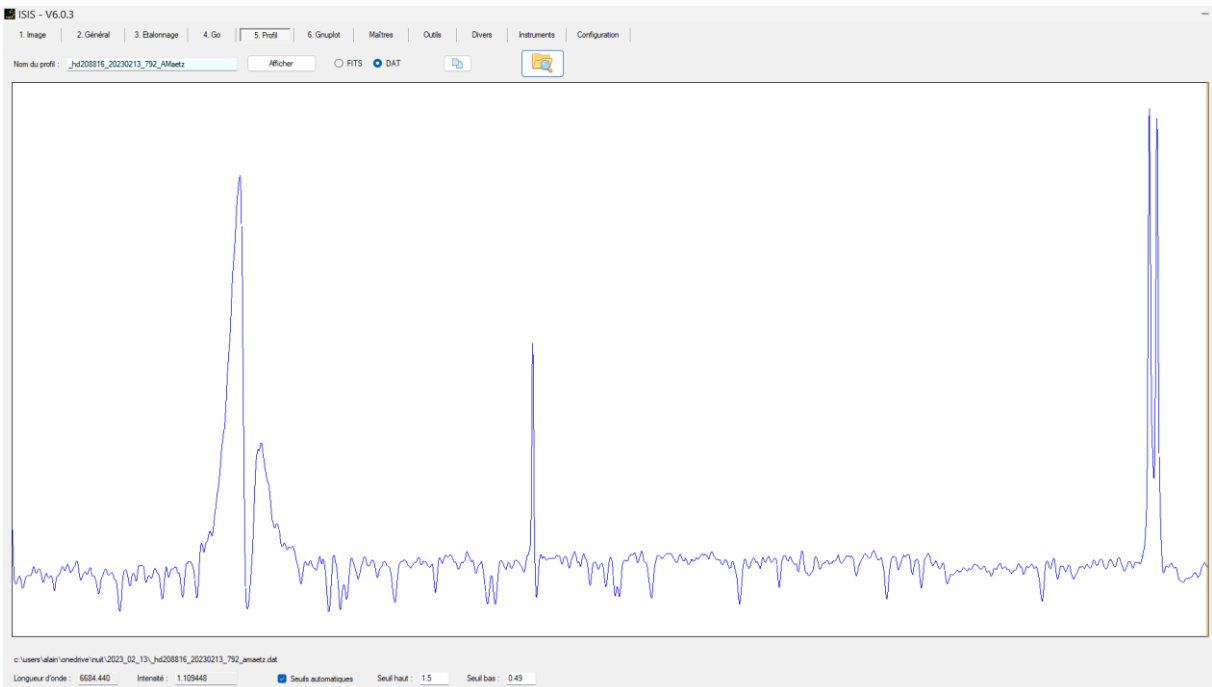
Les mesures importantes : FWHM=largeur à mi-hauteur (en Angstrom) , EW=largeur équivalente (en Angstrom)=(largeur qu'aurait la raie si elle avait une profondeur de 1 et même surface )

, position centrale de la raie, maxi, mini, moyenne...

Ces mesures semblent suffisantes pour décrire complètement une raie spectrale simple. Mais résumer ces raies par ces mesures revient à supposer qu'elles ne contiennent pas d'autres informations. Pour des enregistrements tels ceux présentés ci-dessous, il apparaît évident que ces mêmes mesures seront plus délicates à interpréter.



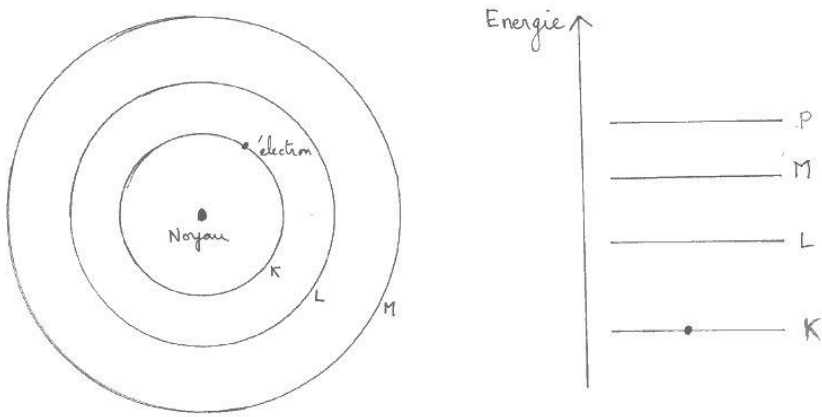
ou



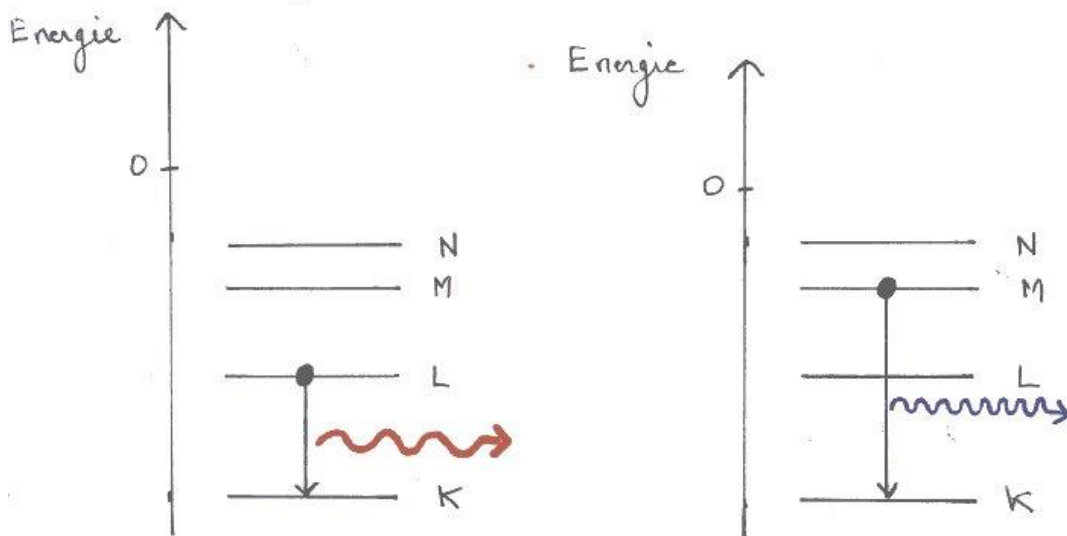
Le spectre enregistré avec un spectroscopie haute résolution ( $R=20000$ ) autour d'une raie telle que la raie Ha nous apparaît cette fois nettement plus complexe. D'évidence, ces spectres révèlent la superposition de plusieurs phénomènes physiques élémentaires. Des raies d'émission et d'absorption se superposent avec des décalages doppler éventuellement différents provenant de phénomènes distincts au sein d'une même étoile ou de raies simples superposées comme c'est le cas pour des étoiles doubles spectroscopiques. Une mesure directe sur ces raies consiste à faire une mesure sur un enregistrement qui englobe les effets de plusieurs causes.

Ces raies spectrales « transportent » de très nombreuses informations : Allure générale avec ses différents pics et creux, hauteurs, largeurs, positions relatives, pentes variables...

## 1) Les phénomènes physiques fondamentaux en spectroscopie astronomique :



### Phénomène d'émission :



$$\Delta E_{\text{photon}} =$$

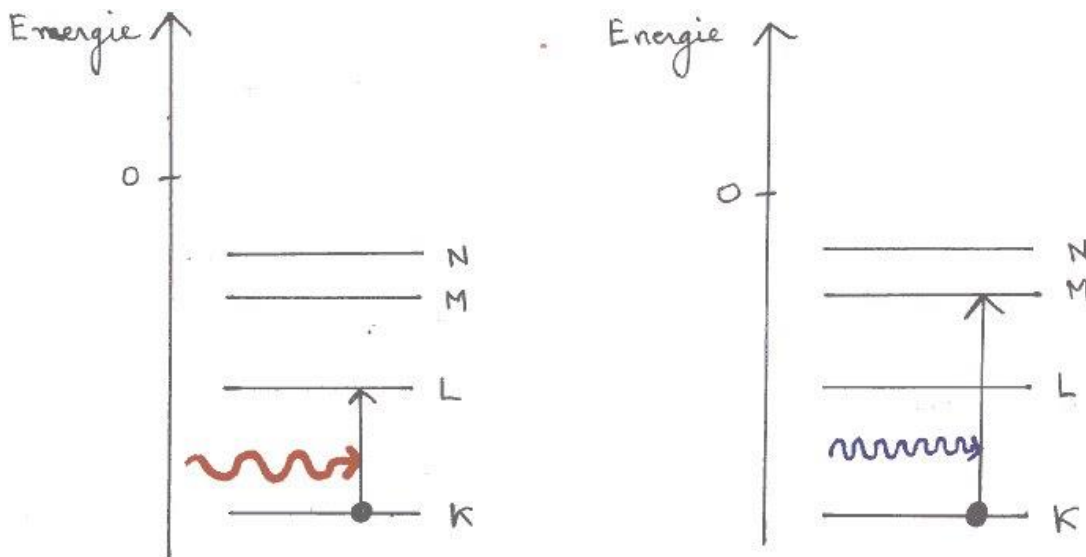
$$h \cdot c / \lambda ; h = \text{constante de Planck} ; c = \text{vitesse de la lumière} ; \lambda = \text{longueur d'onde}$$

L'électron libère la quantité d'énergie  $\Delta E$  sous forme d'un photon émis de longueur d'onde  $\lambda$ .

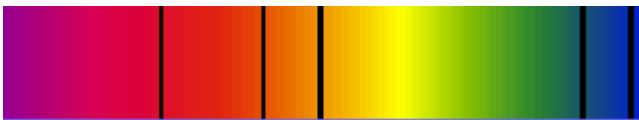
Sous certaines conditions, un gaz chaud, excité et de faible densité, émet de la lumière à des longueurs d'onde bien définies.



### Phénomène d'absorption :

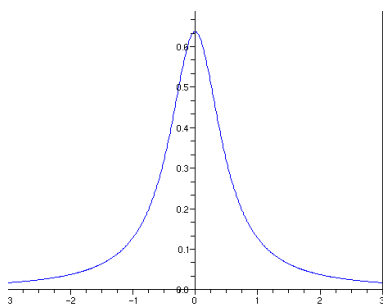


$\Delta E_{\text{photon}} = h \cdot c / \lambda$ . Ici c'est le phénomène inverse qui est en jeu. Les photons porteurs de la quantité d'énergie permettant à un électron de « monter » vers une couche supérieure cèdent cette énergie. Dans le continuum spectral constituant le « fond de lumière » provenant de l'étoile, certaines longueurs d'onde vont être soustraites. On parle de raies d'absorption.



Puisque les raies d'émission ou d'absorption sont dues à des transitions à des niveaux énergétiques précis, ces raies devraient être infiniment fines (aux dispersions instrumentales près).

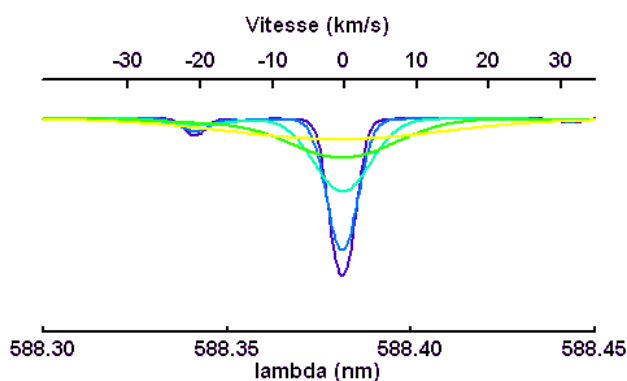
Mais les enregistrements et la théorie montrent que ces raies ont une certaine largeur avec une intensité décroissante en fonction de l'éloignement au centre de cette raie. La physique quantique montre que cet élargissement suit une loi « Lorentzienne. »



*Ci-contre le graphique d'une fonction « lorentzienne » centrée réduite*

**Effet Doppler :** A l'élargissement du aux effets quantiques vient se rajouter un élargissement du à la distribution variable des vitesses des particules dans un gaz chauffé. Comme la distribution des vitesses est bien représentée par une distribution « normale » ou « Gaussienne » les décalages spectraux dus à l'effet Doppler correspondront eux aussi à une distribution Gaussienne

**Décalage spectral** d'un photon émis par une particule de vitesse  $V$  :  $\Delta\lambda = \lambda \cdot V / C$  . Pour  $V \ll C$



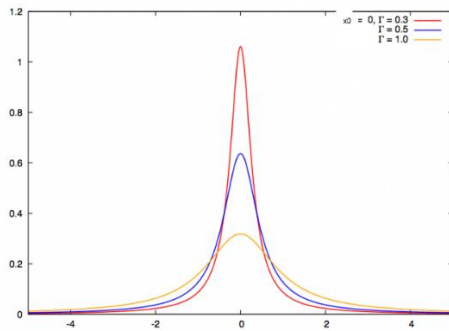
La physique nous montre que la distribution des vitesses dans un gaz suit une fonction Gaussienne.

**2) Simulation d'une raie spectrale d'émission ou d'absorption par des fonctions pseudo-gaussienne ou Lorentzienne.**

Puisque les phénomènes d'émission et d'absorption correspondent à des fonctions Gaussiennes et (ou) Lorentzienne, il est logique et simple d'utiliser ses mêmes fonctions de base pour simuler nos enregistrements. La comparaison de spectres simples d'absorption ou d'émission avec ces fonctions nous montre que l'une ou l'autre ou une combinaison linéaire des deux (pseudo-fonction de Voigt) selon les étoiles permet une très bonne reproduction du profil de dispersion.

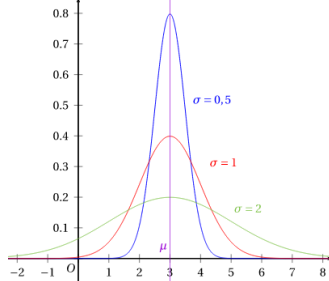
**2.1) Rappel du formalisme des fonctions Gaussiennes et Lorentziennes.**

**2.1.1) Fonction Lorentzienne :**



$$L(x) = \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{1}{\frac{\Gamma^2}{4} + (x - x_0)^2} = \frac{\frac{2}{\pi\Gamma}}{1 + \left(\frac{x - x_0}{\Gamma/2}\right)^2}$$

**2.1.2) Fonction Gaussienne :**



$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

**2.2) Pseudo- Gaussiennes et Lorentziennes, propriétés :**

Les lois Normales (Gaussiennes) et Lorentziennes sont des fonctions utilisées en statistique et conçues pour que l'aire sous la courbe (intégrale de la fonction de - l'infini à + l'infini) soit égale à 1. Conséquence : si l'on multiplie une fonction Gaussienne ou Lorentzienne par un coefficient K, l'aire sous la courbe vaudra : A =K.1 = K . ; Cette propriété va s'avérer très utile par la suite car cette surface sous la courbe est aussi la mesure de EW = largeur équivalente d'une raie.

Nous allons appeler « Pseudo-Gaussienne » une fonction du type  $f(\lambda)=k.g(\lambda)$  avec k un nombre réel (positif ou négatif) et  $g(\lambda)$  une gaussienne.

De même nous allons appeler « Pseudo-Lorentzienne » une fonction du type  $L(\lambda)= k.l(\lambda)$  avec k un nombre réel ( positif ou négatif) et  $l(\lambda)$  une fonction Lorentzienne.

Autres propriétés :

Le maximum de la fonction gaussienne obtenu pour  $x = \mu$  vaut  $f(\mu) = 1/\sigma \cdot \sqrt{2\pi}$

Le maximum de la fonction lorentzienne obtenu pour  $x=x_0$  vaut  $l(x_0)=2/\pi.\Gamma$

La largeur à mi-hauteur d'une gaussienne vaut :  $FWHM=2\sqrt{2\ln(2)} \cdot \sigma$

La largeur à mi-hauteur d'une lorentzienne :  $FWHM = 2 \cdot \Gamma$

D'une façon générale il est possible de créer des fonctions hybrides du type :

$u(\lambda) = k_{11} \cdot g_{11}(\lambda) + k_{12} \cdot g_{12}(\lambda) + k_{21} \cdot l_1(\lambda) + k_{22} \cdot l_2(\lambda)$  avec  $g_{11}$  et  $g_{12}$  des gaussiennes et  $l_1$ ,  $l_2$  des lorentziennes. Les coefficients  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{21}$  et  $k_{22}$  sont des réels choisis de façon à reproduire au mieux la raie spectrale étudiée. En pratique il est bien rare que l'on fasse appel à plus de deux fonctions pour représenter une raie et le plus souvent une seule pseudo-gaussienne suffit pour reproduire une raie spectrale. L'aire sous la courbe de la fonction  $u(\lambda)$  vaut donc :  $A = k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22}$

Les lois Gaussiennes et Lorentziennes sont symétriques par rapport à une position centrée. Il nous sera possible de fabriquer des fonctions hybrides pour lesquelles l'écart type  $\sigma$  dans la gaussienne ou le paramètre  $\Gamma$  dans la lorentzienne seront différents à gauche et à droite de la position centrale (axe de symétrie). De cette façon nous serons en mesure de générer des fonctions dissymétriques.

Ainsi on pose : pour  $\lambda$  compris entre - l'infini et  $\lambda_0$  :

$$G_{\lambda}(\lambda) = \frac{k_{\lambda\lambda} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma_{\lambda}} \right)^2}}{\sigma_{\lambda} \sqrt{2\pi}}$$

Et pour  $\lambda$  compris entre  $\lambda_0$  et + l'infini :

$$G'_{\lambda}(\lambda) = \frac{k'_{\lambda\lambda} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma'_{\lambda}} \right)^2}}{\sigma'_{\lambda} \sqrt{2\pi}}$$

La condition de continuité et de dérivabilité en  $\lambda_0$  impose :  $k_{11}/\sigma_{11} = k'_{11}/\sigma'_{11}$

et de même avec deux demi pseudo-lorentziennes : pour  $\lambda$  entre - l'infini et  $\lambda_0$  :

$$L_{\lambda}(\lambda) = \frac{K L_{\lambda} \cdot \frac{2}{\pi \Gamma_{\lambda}}}{1 + \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\Gamma_{\lambda}/2} \right)^2}$$

et pour  $\lambda$  entre  $\lambda_0$  et + l'infini :

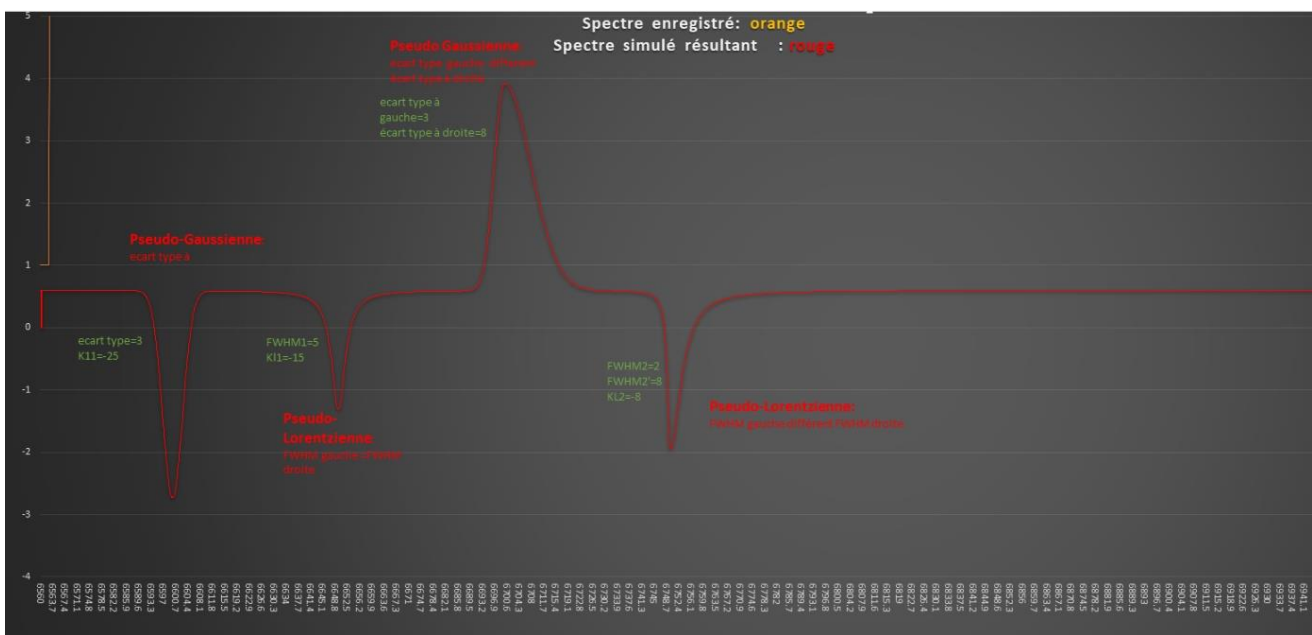
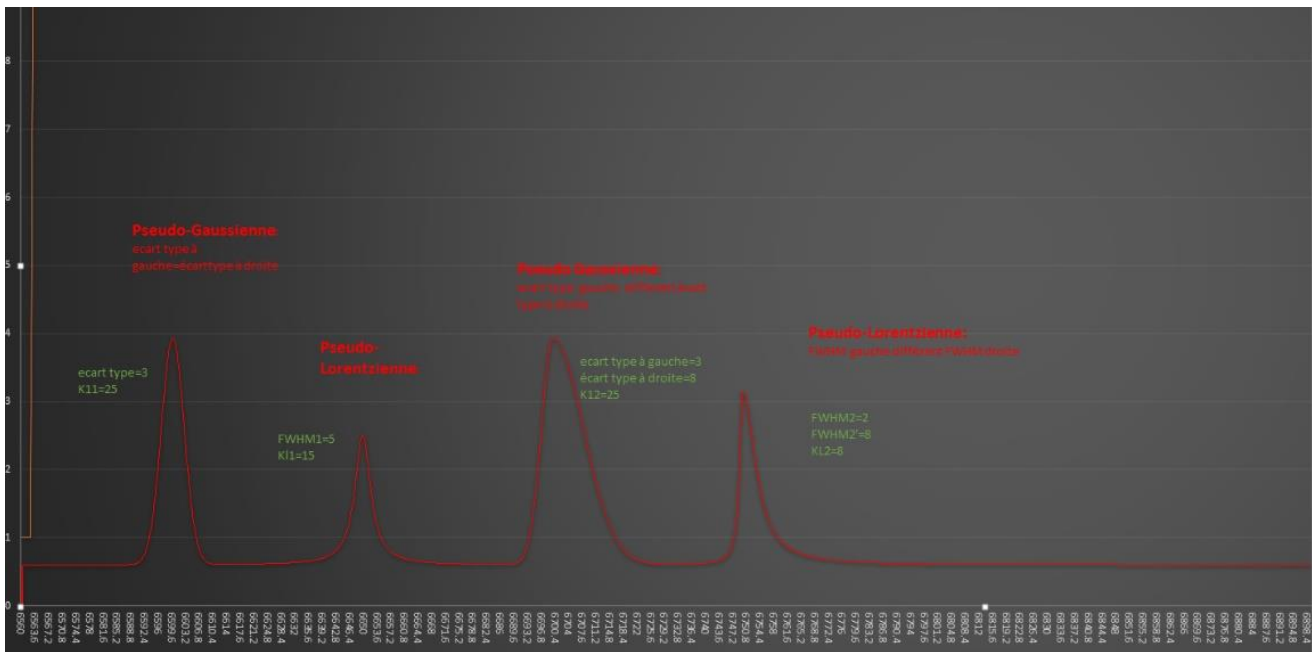
$$L'_{\lambda}(\lambda) = \frac{K L'_{\lambda} \cdot \frac{2}{\pi \Gamma'_{\lambda}}}{1 + \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\Gamma'_{\lambda}/2} \right)^2}$$

avec  $K L_{\lambda} / \Gamma_{\lambda} = K L'_{\lambda} / \Gamma'_{\lambda}$

C'est sous cette forme générale que finalement nous avons choisi d'écrire nos fonctions de simulations avec la possibilité de choisir ou non  $\sigma = \sigma'$  ou  $\Gamma = \Gamma'$ .

### 2.3) Exemples :

Ci-dessous quelques exemples de fonctions générées.



Les coefficients K11, K12, KL1 ou KL2 peuvent prendre des valeurs positives ou négatives et donc simuler des raies d'absorption ou d'émission.

### 3) Résolution des équations de Kepler et détermination des vitesses radiales pour des binaires spectroscopiques connues.

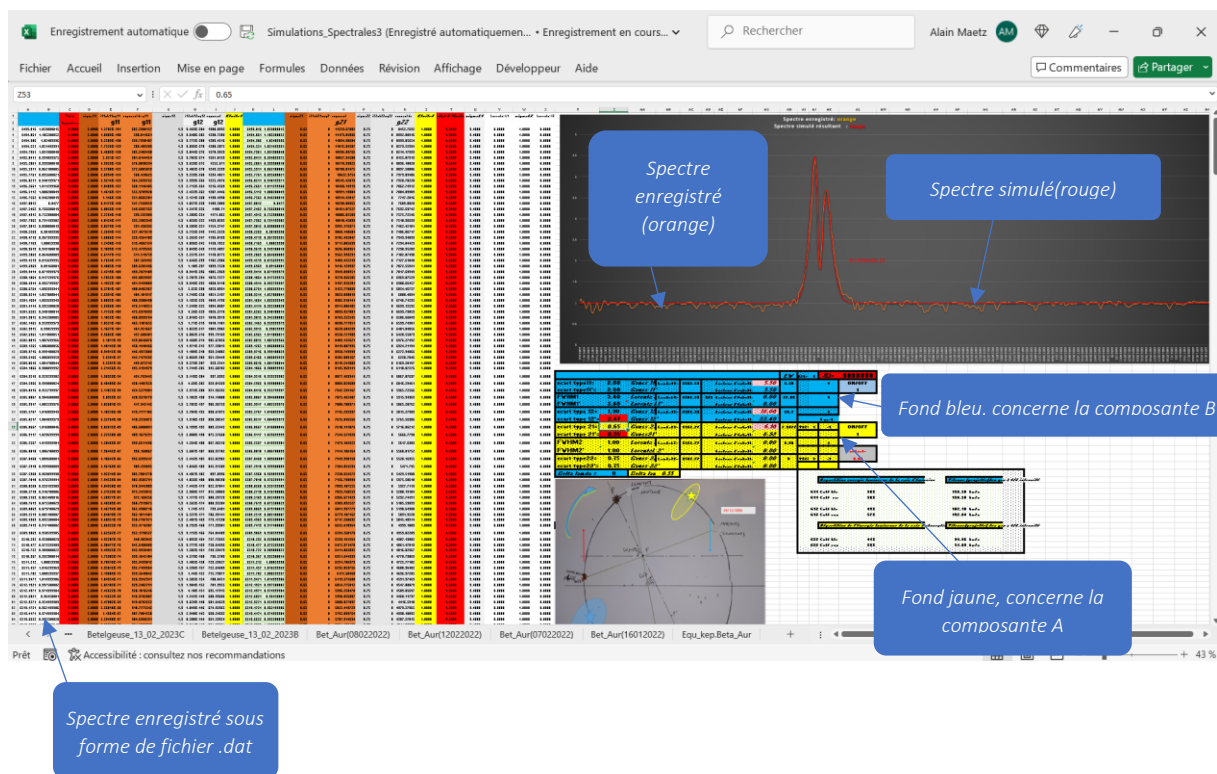
Ici, nous nous plaçons dans le contexte de l'étude d'une étoile double spectroscopique dont les paramètres correspondants aux éléments orbitaux sont connus. Ces paramètres peuvent être trouvés, par exemple, dans la base de données SB9 du catalogue des étoiles doubles spectroscopiques et accessibles depuis le site du CDS. Le mouvement relatif de ces couples d'étoiles et le déplacement de leur barycentre, induit, pour un observateur terrestre, des décalages spectraux faciles à calculer.





format .dat tels que produit par le logiciel ISIS de Christian Buil. Il s'agit d'une liste comportant deux colonnes. L'une est la suite des longueurs d'onde autour de la raie étudiée, l'autre est constituée des intensités correspondantes (après normalisation du continuum à 1). Colonnes A et B de la feuille de calcul. Dans les différentes colonnes, Excel calcule ligne par ligne, les valeurs des fonctions gaussiennes et lorentziennes pour lesquelles les paramètres « écart Type » et « largeur à mi-hauteur » auront été renseignés. On entre ces paramètres dans les cases figurants sous le graphique du spectre. Les cases bleues concernent la composante A du couple et les cases jaunes concernent la composante B.

Vue d'ensemble :



Ci-dessous une vue plus détaillée :

Cette étape consiste à choisir judicieusement les paramètres déterminants les fonctions pseudo-gaussiennes ou (et) lorentziennes pour chacune des deux étoiles s'il s'agit d'une double. Pour chacune d'elles, il est possible d'utiliser au maximum 3 fonctions : 2 pseudo-gaussiennes et une pseudo-lorentzienne. Pour chacune également le paramètre de la partie gauche peut être différent de celui de la partie droite.

Ainsi, « écart type 11 » (étoile bleue) désigne l'écart type de la ½ gaussienne Gauss11 partie gauche. « écart type 11' » désigne l'écart type de la ½ gaussienne Gauss11' partie droite. De la même façon FWHM1 désigne la largeur à mi-hauteur de la demi-lorentzienne gauche et FWHM1' celui de la ½ pseudo-lorentzienne droite. Le même principe est valable pour la deuxième étoile avec « écart type 21 », « écart type 21' », « écart type 22 », « écart type 22' » « FWHM2 » et « FWHM2' »

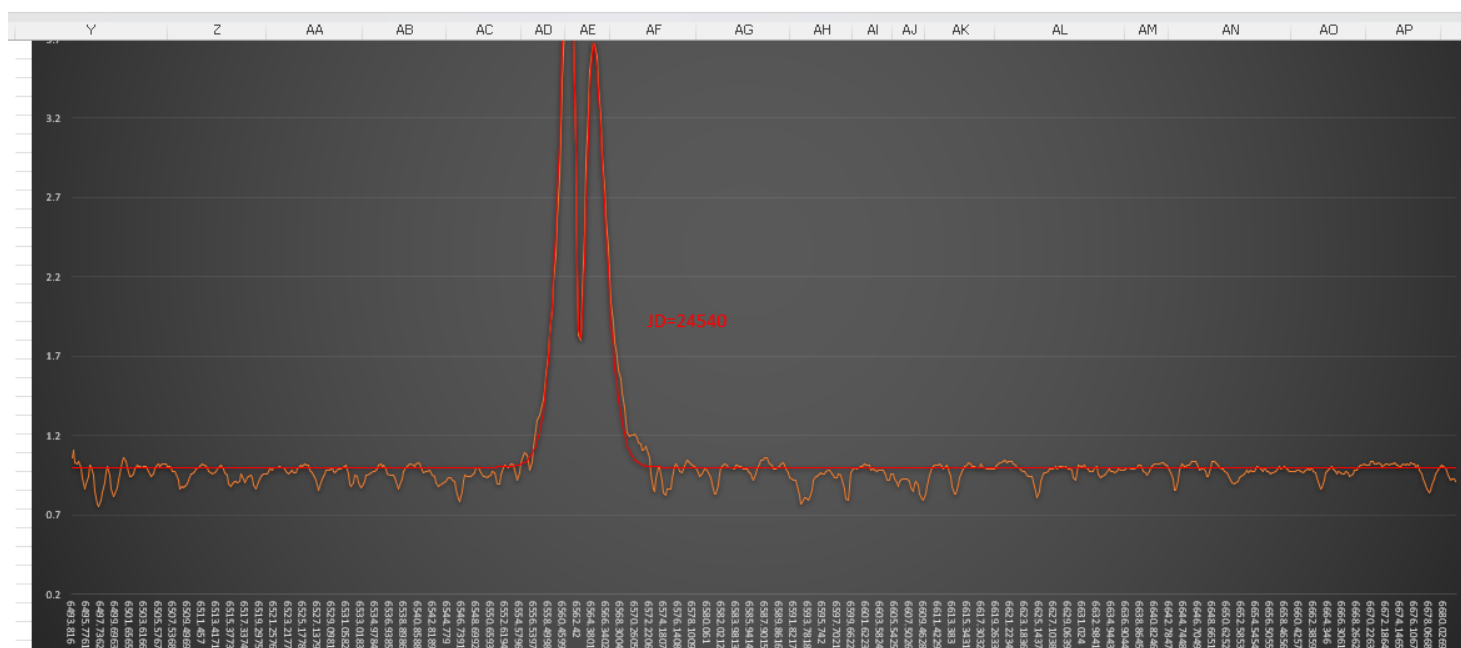
Les longueurs d'onde  $\lambda_{11} = \lambda_{12}$  de la première composante et  $\lambda_{21} = \lambda_{22}$  de la deuxième étoile sont directement calculées dans la feuille de calcul « Equation de Kepler ».

Les paramètres « Delta lambda » permettent d'introduire des décalages par rapport à ces valeurs calculées. Ces décalages peuvent être provoqués par des erreurs de calibration des spectres mais ils peuvent être provoqués par les vitesses de « gonflement » ou « d'effondrement » dans des étoiles telles que les super géantes rouges pour lesquelles ces variations dimensionnelles sont souvent périodiques.

Le spectre simulé (en rouge) est la somme algébrique de toutes les fonctions utilisées, c'est-à-dire celles pour lesquelles le coefficient  $K_{ii}$  est différent de zéro.

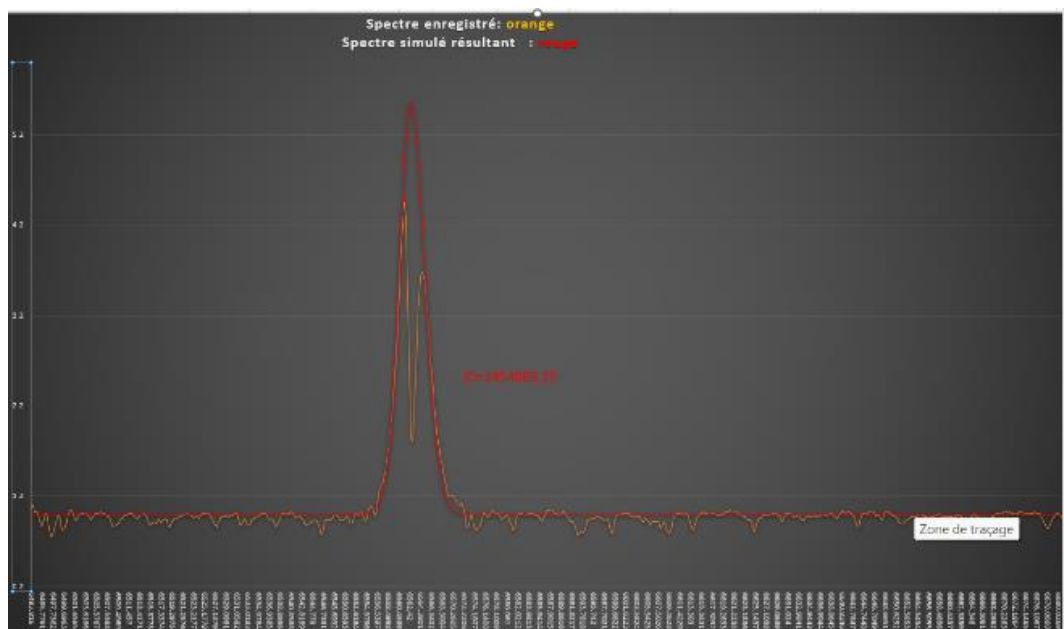
Dans l'exemple ci-dessous « l'écart type 11 » et « l'écart type 11' » sont égaux. Le coefficient de la pseudo-gaussienne Gauss11 est  $K_{11} = K_{11'} = 5.5$  La pseudo-lorentzienne L1 n'est pas utilisée, on pose donc  $K_{L1} = K_{L1'} = 0$ .

Pour la deuxième pseudo-gaussienne Gauss12 on a « écart type12 » =1.9 et « écart type 12' »=2.47. Le coefficient K12 vaut 18. K12' est calculé (imposé par la condition de continuité). Pour la simulation de la deuxième étoile (jaune) une seule pseudo-gaussienne négative s'est avérée nécessaire avec : « écart type21 » = 0.65 , « écart type21' » = 0.95 et K21=6.10 (K21' est calculé). On remarquera que, pour cette étoile, « delta lamda2 » n'est pas nul (=0.55).



				EW	Y011= 1	JD= 2454069.23
ecart type11=	2.80	Gauss 11	lamda1= 6562.53	facteur d'échelle X11= 5.50	5.50	ON/OFF
ecart type11'=	2.80	Gauss 11'		facteur d'échelle X11= 5.50		1
FWHM1	3.40	Lorentz L1	lamda1= 6562.53	facteur d'échelle X11= 0.00	27.00	1
FWHM1'	3.40	Lorentz L1'		facteur d'échelle X11= 0.00		
ecart type 12=	1.90	Gauss 12	lamda12= 6562.53	facteur d'échelle X12= 18.00	20.7	1
ecart type 12'=	2.47	Gauss 12'		facteur d'échelle X12= 23.40		1 ou 1
ecart type 21=	0.65	Gauss 21	lamda21= 6562.77	facteur d'échelle X21= 6.10	7.50769	Y021= -1 -1
ecart type 21'=	0.95	Gauss 21'		facteur d'échelle X21= 8.92		ON/OFF 1
FWHM2	1.00	Lorentz L2	lamda2= 6562.77	facteur d'échelle X12= 0.00	0.00	1
FWHM2'	1.00	Lorentz L2'		facteur d'échelle X13= 0.00		
ecart type22=	0.75	Gauss 22	lamda22= 6562.77	facteur d'échelle X22= 0.00	0	Y022= 1 -1
ecart type22'=	0.75	Gauss 22'		facteur d'échelle X22= 0.00		offset= 0.00
Delta lamda =	0	Delta lamda =	0.55			

Il est possible à tout moment de supprimer globalement les fonctions relatives à l'une ou l'autre étoile en mettant à 0 son paramètre « on/off). Cela permet de mieux comprendre le rôle complémentaire de chaque groupe de fonction



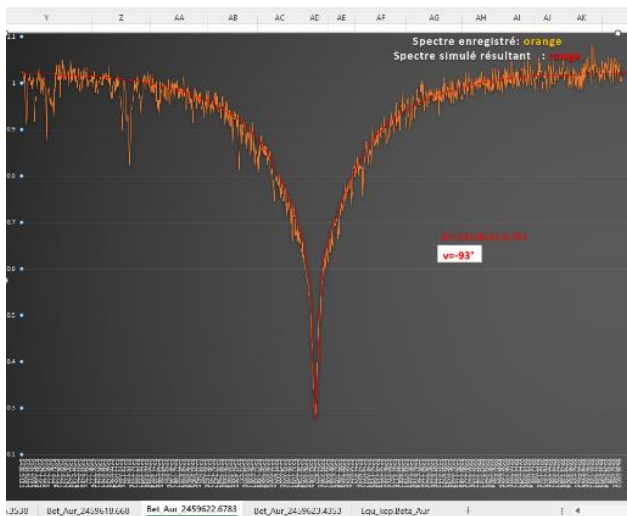
dans l'élaboration du signal simulé.

Ci-contre gauche la fonction simulée (tracé en rouge) correspond à l'étoile A en émission (étoile des cases bleues).

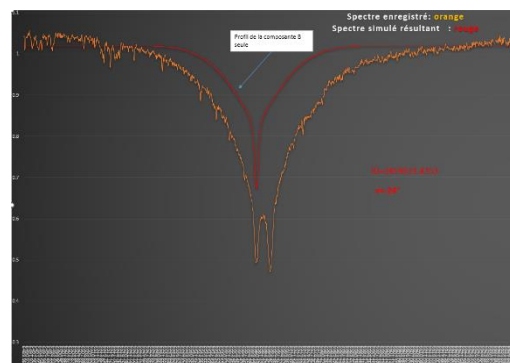
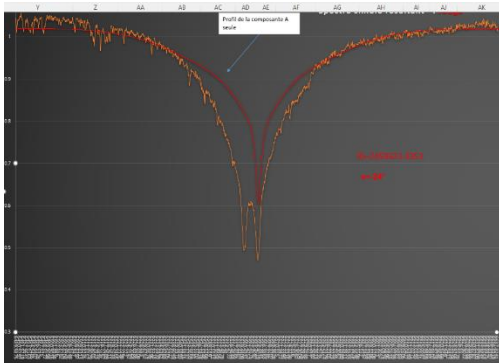


				EW	Y011=	JD=	2459623.4
ecart type11=	20.00	Gauss J1	Lambda11= 6504.60	facteur d'échelle K11=	6.50	-1	ON/OFF
ecart type11's	20.00	Gauss J1'		facteur d'échelle K11'	6.50		1
FWHM1	2.00	Lorentz L1	Lambda11= 6504.60	facteur d'échelle K11	0.65	-1	
FWHM1'	2.00	Lorentz L1'		facteur d'échelle K11'	0.65		
ecart type 12=	6.00	Gauss J2	Lambda12= 6504.60	facteur d'échelle K12=	1.20	1.2	
ecart type 12's	6.00	Gauss J2'		facteur d'échelle K12'	1.20		
ecart type 21=	10.00	Gauss J1	Lambda21= 6508.23	facteur d'échelle K21=	2.80	2.8	ON/OFF
ecart type 21's	10.00	Gauss J1'		facteur d'échelle K21'	2.80		1
FWHM2	1.50	Lorentz L2	Lambda21= 6508.23	facteur d'échelle K12	0.44	-1	
FWHM2'	1.50	Lorentz L2'		facteur d'échelle K12'	0.44		
ecart type22=	5.00	Gauss J2	Lambda22= 6508.23	facteur d'échelle K22=	0.60	0.6	offset=
ecart type22's	5.00	Gauss J2'		facteur d'échelle K22'	0.60		6.00
Delta lambda =	0	Delta lambda	0				

Les paramètres ci-dessus ont été déterminés par essais successifs jusqu'à l'obtention de 3 fonctions pour chacune des deux étoiles du couple. Les paramètres qui les déterminent sont choisis de façon à reproduire au mieux les spectres enregistrés. Dans le cas de HD40183, des études préalables ont montrées que leur séparation spatiale ne permet pas d'échange de matière entre les deux composantes. Il était donc prévisible que les fonctions caractérisant le profil spectral soient symétriques et invariants au court des cycles. Ici, les décalages Doppler induits par les mouvements Keplériens expliquent à eux seuls les changements d'apparence du profil spectral au court du temps.



La feuille de calcul permet de visualiser séparément la fonction composée qui représente chaque étoile.



La somme des coefficients  $K_{ii}$  définissant chaque étoile représente la surface sous la raie Ha pour des spectres normalisés. Pour la composante A :  $K_{11}+K_{12}+K_{L1}=8.35$  Pour la composante B :  $K_{21}+K_{22}+K_{L2}=3.84$  Sachant que ces deux composantes sont de même type spectral, on pourrait comparer ces surfaces à la luminosité de chacune d'elles.  $M_{v1}=1.9$ ,  $M_{v2}=2.83$

Avec  $(M_{v2}-M_{v1}) = -2.5 \cdot \log(L_1/L_2)$  on obtient  $L_1/L_2 = 2.35$ . Si l'on compare ce rapport à celui des surfaces sous les raies Ha  $r=(8.35/3.84)=2.17$  Il semble donc possible d'apporter une première estimation du rapport de magnitude des deux composantes par le simple rapport de la somme des  $K_{ii}$  trouvés pour chaque composante.

### b) HD208816 (VV Cep) :

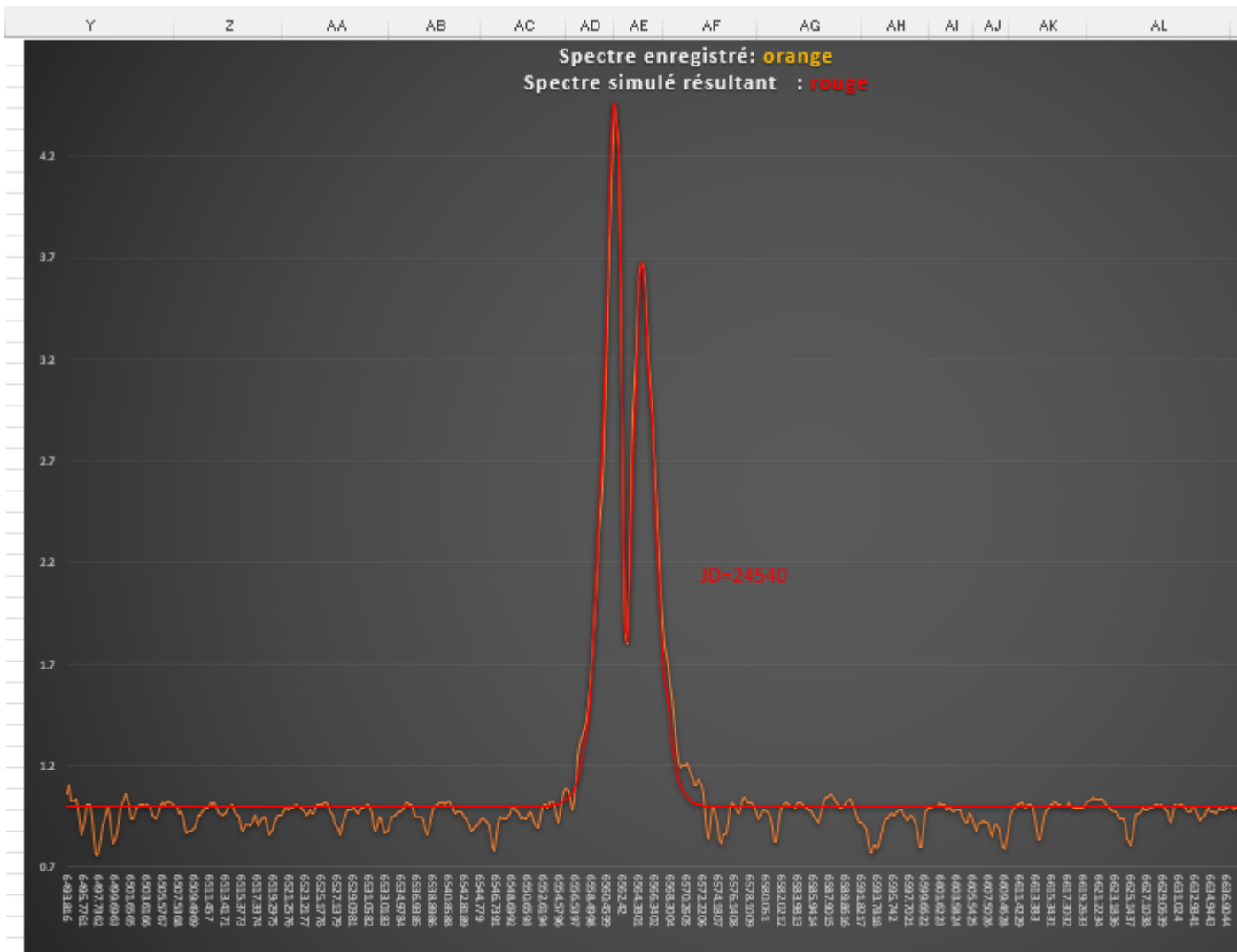
VV Cephei est une binaire à éclipse située à environ 4900al de nous. Elle est composée d'une hyper géante rouge (composante A) de type spectral M2iab et d'une géante bleue de type B0-2V. Le rayon de la composante rouge est estimé entre 1050 et 1900 fois celui du soleil. La composante bleue a un rayon estimé entre 14 et 20 fois celui du soleil. Un anneau de gaz entourant l'étoile produit une raie Ha en émission. En outre, lorsque VV Cephei A est au plus proche de son compagnon, elle remplit totalement son lobe de Roche et perd de la matière au profit de VV Cephei B. Nous montrerons comment, à l'aide d'un suivi prolongé de l'évolution des paramètres définissant nos fonctions, il serait possible de mettre en évidence des phénomènes encore mal connus.

Tout d'abord, la feuille de calcul des mouvements Keplériens :

Calcul de Vr et décalages spectraux sur binaires spectroscopiques en fonction du temps									
Objet	P=Période en jours	e=excentricité	a=demi grand axe en km	Ω=longitude du périastre en degrés	Passage au périastre en jours	M=Moyen mouvement en radians/jours	Vo	a1 sin(i)	a2sin(i)
VVCe	7430.5	0.346	1.86E+09	59.2	2438535.1	0.000845594	-20.2	1.86E+09	1.83E+09
				1.033234917					
Date en cours (JD)	Calcul de l'anomalie excentrique: (u-e.sinu)= M.t				Anomalie moyenne (en radians)	13.13558213	en °	en °	
2454069.25	temps depuis périastre en jours= 15534.15				Calcul de l'anomalie vraie : v=	1.11859137	64.0905645	424.0905645	784.0905645
	Uo=	20.08498797			Calcul de K1:	K1=	19.36928125		
	u1=	13.46230664			Calcul de K2:	K2=	19.06979983		
		13.40573694			Vr1=	-27.39991703	-7.20 delta V1		
		13.39308226			Vr2=	-13.11140571	7.09 delta V2		
		13.39013715			Lamda Ha=	6562.82			
		13.38944588			Lamda1=	6562.220183	-0.16 delta lamda1		
		13.38928333			Lamda2=	6562.532975	0.16 delta lamda2		
		13.38924505							
		13.38923605							
		13.38923393							
		13.38923343							
		13.38923332							
		13.38923329							
	u (en radians) =	13.38923328							
	u(en radians)=	13.38923328							
	<p align="center"><b>Precession de la Be</b></p> <p align="center">EW=Evo+Ew1.cos(2π/T1.t-t0) -0.047142687</p>								

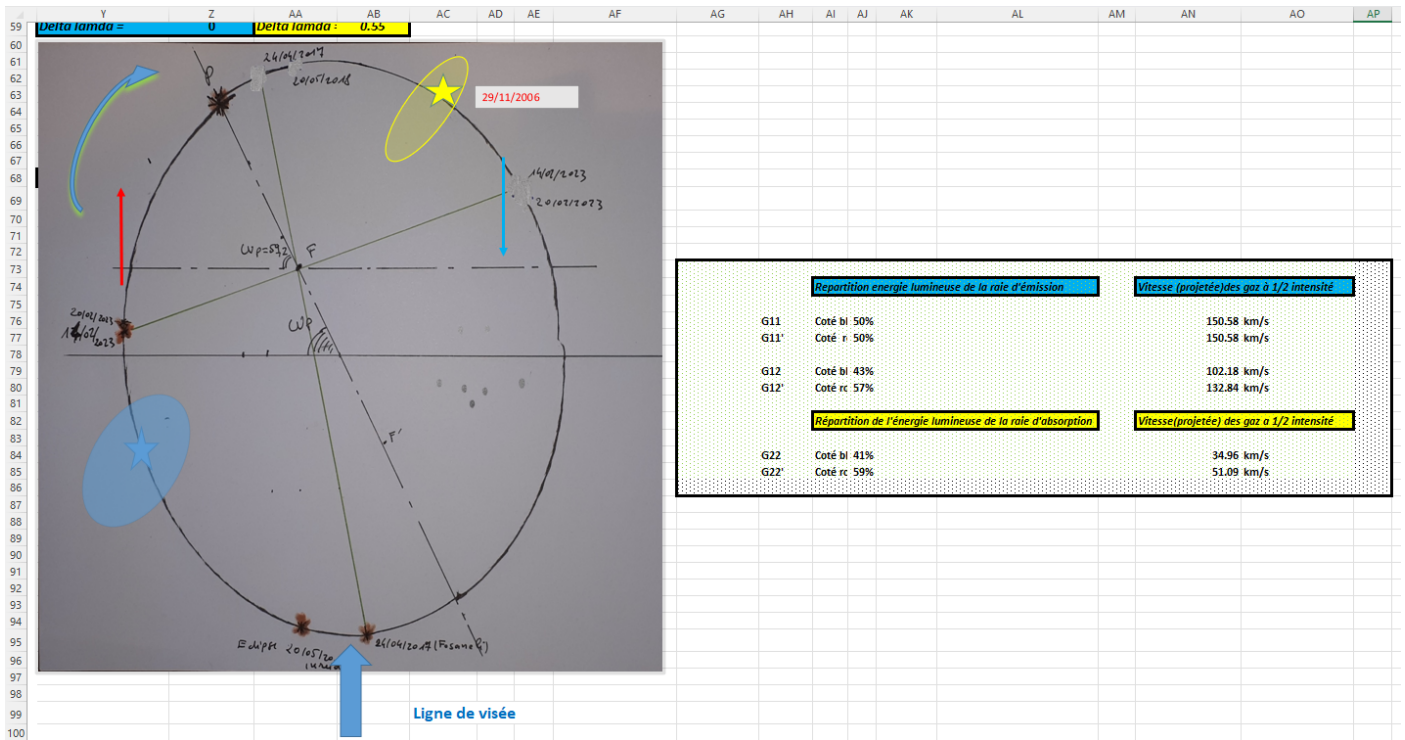
Comme mentionné dans les paragraphes précédents, les longueurs d'onde « Lamda1 » et « Lamda2 » sont directement reliées aux feuilles de calculs qui permettent la construction des simulations.

Pour chaque spectre pour lequel nous voulons produire une simulation mathématique, nous allons ouvrir une feuille semblable à la feuille ci-dessous. Pour chacune d'elles, nous chercherons les paramètres permettant d'épouser au mieux les contours du spectre enregistré. Nous veillerons à minimiser le nombre de fonctions afin de faciliter l'exploitation ultérieure des résultats. Pour le spectre ci-dessous deux gaussiennes en émission pour représenter l'étoile bleue et une seule gaussienne en absorption pour l'hyper géante rouge se sont révélées suffisantes. Les fonctions pour lesquelles le « facteur d'échelle  $K_{ii}$  » =0 ne sont pas actives. La première remarque est que les paramètres gauche et droit d'une même fonction ne sont plus toujours égaux. Cette dissymétrie atteste de la déformation des nuages de gaz entourant chaque composante. Ces écarts type gauches et droits sont directement proportionnels à la vitesse des gaz à mi-hauteur de la gaussienne ou lorentzienne. Le rapport des surfaces gauches et droites, donné par le rapport des coefficients  $K_{ii}/K'_{ii}$ , renseigne sur la forme du champ des vitesses.



				EW	D11= 1	JD= 2454069.25		
ecart type11=	2.80	Gauss 11	Lambda11=	6562.53	facteur d'echell 5.50	5.50	1	ON/OFF
ecart type11'	2.80	Gauss 11'			facteur d'echell 5.50		1	1
FWHM1	3.40	Lorentz L1	LambdaL1=	6562.53	facteur d'echell 0.00	27.00	1	
FWHM1'	3.40	Lorentz L1'			facteur d'echell 0.00			
ecart type 12=	1.90	Gauss 12	Lambda12=	6562.53	facteur d'echell 18.00	20.7	1	
ecart type 12' =	2.47	Gauss 12'			facteur d'echell 23.40		1 ou 1	
ecart type 21=	0.65	Gauss 21	Lambda21=	6562.77	facteur d'echell 6.10	7.508	Y021: 1	ON/OFF
ecart type 21' =	0.95	Gauss 21'			facteur d'echell 8.92			1
FWHM2	1.00	Lorentz L2	LambdaL2=	6562.77	facteur d'echell 0.00	0.00	1	
FWHM2'	1.00	Lorentz L2'			facteur d'echell 0.00			offset=
ecart type22=	0.75	Gauss 22	Lambda22=	6562.77	facteur d'echell 0.00	0	Y022: 1	0.00
ecart type22' =	0.75	Gauss 22'			facteur d'echell 0.00			
Delta lamda =	0	Delta lamda	0.55					

Repartition energie lumi



De façons identiques nous avons actuellement numérisé environ 80 spectres de la raie Ha de VV\_Cep.

Tous les coefficients (écarts type, FWHM, et facteurs d'échelle Kii) sont regroupés dans un tableau récapitulatif et classés en fonction du temps (jour JD) .

Tableau récapitulatif																		
Titre	JD-2400000	delta lambda2	G11	G11'	K11	K11'	EW11	G12	G12'	K12	K12'	EW12	G21	G21'	K21	K21'	EW21	K11+K12
10 variables indépend	51852.21	-0.50	2.80	2.80	8.50	8.50	8.50	2.50	0.85	18.30	6.22	12.26	0.85	0.85	7.20	7.20	7.20	26.80
	52141.35	-0.10	2.50	3.50	8.00	11.20	9.60	2.00	2.00	8.90	8.90	8.90	1.10	0.80	5.45	3.96	4.71	16.90
	52196.33	-0.40	1.00	5.20	2.60	16.90	9.75	2.20	4.00	8.30	16.18	12.54	1.40	4.50	2.50	8.04	5.27	11.50
	52593.26	-0.90	1.00	5.35	4.60	24.61	14.61	2.20	4.00	9.00	16.36	12.68	1.50	5.00	4.70	15.67	10.18	13.60
	52619.29	-0.96	2.50	1.60	7.50	4.80	6.15	2.40	4.50	10.50	19.69	15.09	1.05	1.10	3.15	3.30	3.23	18.00
	52684.6	-0.40	2.20	1.95	19.00	16.84	17.92	4.00	6.00	5.00	7.50	6.25	0.80	0.90	5.50	6.19	5.84	24.00
	52719.55	-0.04	2.10	2.80	13.70	18.27	15.98	4.00	4.00	2.00	2.00	2.00	0.82	0.95	3.15	3.65	3.40	15.70
	52743.59	-0.07	2.30	2.92	20.50	26.03	23.26	4.00	4.00	2.00	2.00	2.00	0.82	0.80	5.95	5.80	5.88	22.50
	52763.61	-0.07	2.30	2.88	17.20	21.54	19.37	4.00	4.00	2.00	2.00	2.00	0.88	0.90	5.10	5.22	5.16	19.20
	52791.61	-0.08	2.30	2.75	26.00	31.09	28.54	4.00	4.00	2.00	2.00	2.00	0.88	0.75	8.40	7.16	7.78	28.00
	52855.47	0.53	2.00	3.50	15.00	26.25	20.63	4.00	4.00	2.00	2.00	2.00	1.00	0.60	5.80	3.48	4.64	17.00
	52872.45	0.39	2.00	3.10	21.30	33.02	27.16	4.00	4.00	2.00	2.00	2.00	1.30	0.55	11.20	4.74	7.97	23.30
	52893.37	0.39	2.00	3.10	21.00	32.55	26.78	4.00	4.00	2.00	2.00	2.00	1.30	0.65	10.40	5.20	7.80	23.00
	52936.29	0.38	2.00	3.60	19.50	35.10	27.30	4.00	4.00	2.00	2.00	2.00	1.30	0.65	7.60	3.80	5.70	21.50
	52976.3	0.38	1.80	3.30	18.50	33.92	26.21	4.00	4.00	2.00	2.00	2.00	1.30	0.65	9.40	4.70	7.05	20.50
	53091.39	0.55	2.00	4.20	15.00	31.50	23.25	2.80	2.80	2.00	2.00	2.00	1.30	0.55	5.20	2.20	3.70	17.00
	53202.39	0.15	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.10	3.40	12.50	20.24	16.37	0.60	0.80	2.05	2.73	2.39	12.50
	53257.38	0.10	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.30	3.65	16.75	26.58	21.67	1.05	0.85	3.60	2.91	3.26	16.75
	53333.24	0.00	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.35	2.95	17.50	21.97	19.73	1.00	1.05	3.75	3.94	3.84	17.50
	53444.6	0.00	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.40	2.70	19.50	21.94	20.72	0.77	1.05	4.45	6.07	5.26	19.50
	53501.45	0.00	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.40	2.65	16.00	17.67	16.83	0.77	1.20	3.58	5.58	4.58	16.00
	53531.45	0.10	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.40	2.75	20.06	22.99	21.52	0.77	1.25	4.91	7.97	6.44	20.06
	54069.25	0.55	2.80	2.80	5.50	5.50	5.50	1.90	2.47	18.00	23.40	20.70	0.65	0.95	6.10	8.92	7.51	23.50
	54172.65	0.76	2.80	2.80	5.50	5.50	5.50	1.85	2.85	14.50	22.34	18.42	0.65	0.90	5.05	6.99	6.02	20.00
	54295.41	-0.47	2.80	3.40	5.50	5.50	5.50	2.47	1.55	22.10	13.87	17.98	0.55	1.49	4.87	13.19	9.03	27.60
	54342.37	-0.57	2.80	2.80	5.50	5.50	5.50	2.60	1.40	22.50	12.12	17.31	0.55	1.50	4.75	12.95	8.85	28.00
	54404.27	-0.38	2.80	2.80	5.50	5.50	5.50	2.60	1.80	21.50	14.88	18.19	0.50	1.58	4.20	13.27	8.74	27.00
	54564.52	0.80	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.00	2.80	18.00	25.20	21.60	0.48	1.00	3.60	7.50	5.55	18.00
	54565.26	0.65	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	1.60	2.60	17.00	27.63	22.31	0.55	1.08	5.80	11.39	8.59	17.00
	54709.47	0.35	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.05	2.30	16.50	18.51	17.51	0.60	1.45	4.10	9.91	7.00	16.50
	54829.24	1.45	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	1.75	3.59	12.20	25.03	18.61	0.48	0.95	2.90	5.74	4.32	12.20
	55100.28	0.30	2.45	1.75	17.00	12.14	14.57	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	0.45	1.05	3.35	7.82	5.58	22.00
eclipse	57868.3	0.00	1.20	1.20	0.00	0.00	0.00	2.10	2.10	22.50	22.50	22.50	0.45	1.05	4.95	11.55	8.25	22.50
eclipse	58202.68	-0.02	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.74	1.12	20.20	30.57	25.39	0.71	0.89	19.20	23.93	21.57	20.20
eclipse	58258.5	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	1.00	1.01	15.00	18.94	16.97	0.80	0.80	15.15	15.15	15.15	15.00
eclipse	58373.36	0.00	0.30	0.30	0.00	0.00	0.00	1.10	1.40	6.40	8.15	7.27	0.50	0.62	3.10	3.84	3.47	6.40
	58771.32	0.10	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.10	2.80	19.85	26.47	23.16	0.48	1.00	4.80	10.00	7.40	19.85
	58779.29	-0.04	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.18	2.67	18.70	22.90	20.80	0.48	1.00	4.50	9.38	6.94	18.70
	58767.31	0.20	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.20	2.67	18.75	22.76	20.75	0.48	0.95	4.32	8.55	6.44	18.75
	58804.71	0.00	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	2.20	2.85	16.20	23.09	19.64	0.43	0.95	3.85	8.51	6.18	16.20
	58822.29	0.10	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	1.95	2.80	17.00	24.41	20.71	0.43	0.95	3.95	8.73	6.34	17.00
	58836.19	0.10	2.30	2.30	0.00	0.00	0.00	1.95	2.80	14.50	21.56	18.03	0.43	0.85	3.50	6.92	5.21	14.50
	59399.87	-0.25	3.00	1.00	3.00	1.00	2.00	2.30	2.90	18.00	22.70	20.35	0.32	0.70	3.10	6.78	4.94	21.00
	59414.81	-0.30	3.00	1.00	3.00	1.00	2.00	2.30	2.90	14.00	17.65	15.83	0.32	0.55	2.52	4.33	3.43	17.00
	59433.05	-0.27	3.00	1.00	3.00	1.00	2.00	2.20	2.60	19.00	22.45	20.73	0.32	0.65	3.25	6.60	4.93	22.00
	59452.13	-0.30	3.00	1.00	3.00	1.00	2.00	2.20	2.60	17.00	20.09	18.55	0.32	0.65	3.00	6.09	4.55	20.00
	59485.15	-0.46	3.20	3.50	3.00	3.28	3.14	2.30	2.30	24.50	24.50	24.50	0.30	0.77	3.70	9.50	6.60	27.50
	59514.1	-0.25	1.20	1.20	0.00	0.00	0.00	2.20	2.25	18.00	18.41	18.20	0.35	0.60	3.15	5.40	4.28	18.00
	59572.28	-0.37	1.20	1.20	0.00	0.00	0.00	2.30	2.05	22.25	19.83	21.04	0.35	0.60	3.65	6.26	4.95	22.25
	59761.15	-0.50	1.20	1.20	0.00	0.00	0.00	1.95	1.85	24.50	23.24	23.87	0.35	0.85	4.57	11.10	7.83	24.50

Des graphiques permettant de suivre l'évolution de ces paramètres seuls ou des combinaisons correspondant aux phénomènes étudiés sont très facilement réalisables.



La base de données des étoiles variables AAVSO nous a été d'une grande utilité et un très grand nombre de spectres n'ont pas encore été numérisés à ce jour. Les premières analyses mettent en lumière la nécessité d'un soin tout particulier à accorder lors d'enregistrement et du traitement de ces spectres. Nous pensons ici à l'importance majeure d'un étalonnage rigoureux. Comme l'ensemble du profil spectral est mathématisé et numérisé la qualité des corrections de réponses instrumentales prend également une importance inhabituelle en spectroscopie haute résolution.