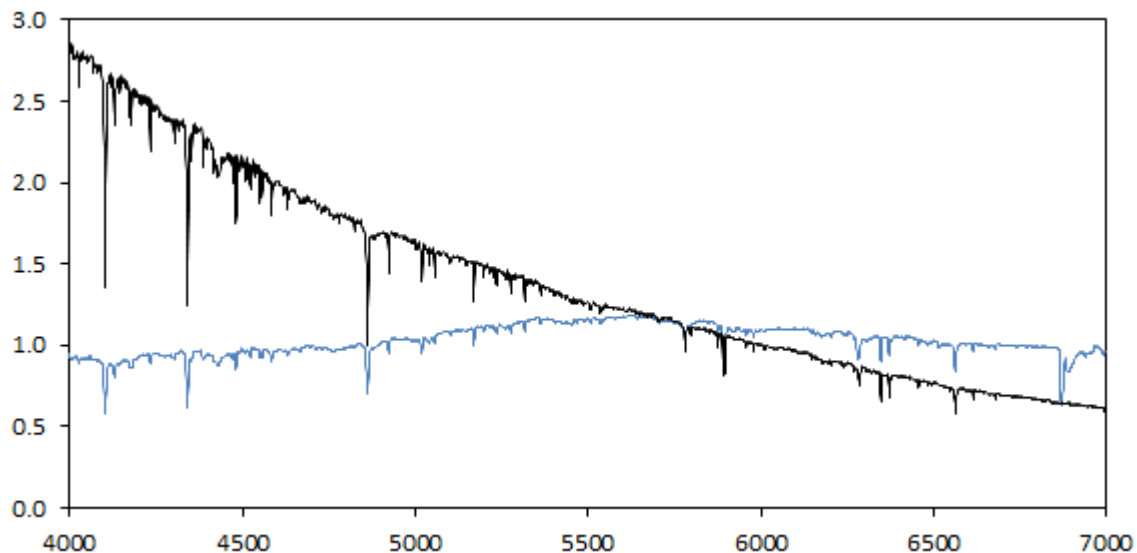




Déroutissement d'un spectre

Introduction

A l'origine de ce travail, un spectre de l'étoile HD 20041 obtenu par Christian Buil en étudiant la base de spectres stellaires MILES.



Le spectre obtenu par C. Buil après correction de la réponse instrumentale (incluant la correction de l'extinction atmosphérique) est en bleu. Le spectre de la librairie Miles en noir.

HD 20041 (A.D. = 03:15:48 Dec = +57:08:26.20.73) est une étoile de magnitude 5.83, de type A0Ia. Le spectre bleu ne correspond manifestement pas à une étoile de type A. En fait le rayonnement émis par HD 20041 est fortement atténué par la traversée du milieu interstellaire. Son excès de couleur est de 0.73, correspondant à une atténuation de plus de deux magnitudes dans le vert. Le rayonnement rouge est moins atténué que le bleu, d'où l'aspect anormal du spectre pour une étoile A.

Quelles conséquences ?

- **Certains objets étudiés nécessitent le déroutissement car leur excès de couleur est élevé (voir table : Excès de couleur de quelques étoiles symbiotiques)**

- Lorsque que l'on utilise une étoile pour calculer la correction instrumentale, il convient de vérifier que son excès de couleur est nul ou très faible

Notations

λ = longueur d'onde

$I_\lambda = I(\lambda)$

I_0 = Intensité réelle

I = Intensité observée

Remarque : dans certaines présentations les indices sont intervertis, l'indice « 0 » correspond à l'intensité observée et l'absence d'indice à l'intensité réelle.

Extinction



Lorsque le rayonnement, d'intensité I_0 , issu d'un astre, traverse le milieu interstellaire (MIS) il subit une atténuation du fait de son absorption et de sa diffusion partielles par les atomes, molécules et poussières constituant le MIS. Cette atténuation est appelée **extinction**. L'intensité du rayonnement observé est noté I .

Pour une longueur d'onde λ la relation entre l'intensité émise et l'intensité observée est donnée par la formule (1), dans laquelle τ est l'épaisseur optique du milieu traversé, pour une longueur d'onde donnée. τ sera d'autant plus élevé que 1) la distance parcourue sera grande 2) l'interaction entre rayonnement et milieu interstellaire sera grande (densité, composition de la matière, taille des particules ...)

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\tau} \quad (1)$$

$$I_\lambda / I_{0\lambda} = e^{-\tau}$$

L'extinction peut s'exprimer sous la forme de magnitude, A_λ étant l'extinction en magnitude à la longueur d'onde λ

$$\Delta m = m_{\lambda} - m_{0\lambda} = A_{\lambda}$$

$$A_{\lambda} = -2.5 \log (I_{\lambda} / I_{0\lambda})$$

Ce qui permet d'exprimer l'intensité émise par rapport à l'intensité observée :

$$I_{0\lambda} = I_{\lambda} 10^{0.4 A_{\lambda}} \quad (2)$$

La connaissance de A_{λ} permet donc de retrouver l'intensité du rayonnement émis à la longueur d'onde λ .

Remarque :

$$A_{\lambda} = -2.5 \log (I_{\lambda} / I_{0\lambda})$$

$$A_{\lambda} = -2.5 \log (e^{-\tau})$$

$$A_{\lambda} = -2.5 \log(e) (-\tau)$$

Ce qui permet d'obtenir les relations liant l'extinction et l'extinction en magnitude

$$A_{\lambda} = 1.0857 \tau$$

$$\tau = A_{\lambda} / 1.0857$$

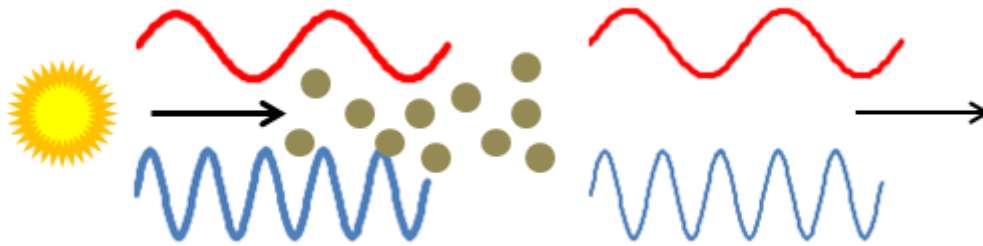
Indice de couleur

L'indice de couleur, B-V, d'une étoile est défini comme la différence entre la magnitude dans la bande bleue (4400 Å) et rouge (5500 Å)

$$B - V = m_B - m_A$$

Rougisement du spectre - Excès d'indice de couleur

La taille moyenne des poussières du MIS est telle que le rayonnement de faible longueur d'onde (bleu, UV) va interagir plus fortement que le rayonnement de plus grande longueur d'onde (rouge, IR).



Il en découle une extinction plus grande dans le bleu que dans le rouge. L'intensité relative rouge/IR augmente par rapport au rayonnement bleu/UV, l'astre apparaît plus rouge qu'il n'est en réalité.

Pour une longueur d'onde λ , l'extinction en magnitude est la différence entre la magnitude observée (m_λ) et la magnitude réelle ($m_{0\lambda}$) :

$$A_\lambda = m_\lambda - m_{0\lambda}$$

Ce qui donne pour les bandes V (centrée sur 5500 Å) et B (4400 Å) :

$$A_v = V - V_0 \quad (3)$$

$$A_b = B - B_0 \quad (4)$$

(4) – (3) donne :

$$(A_b - A_v) = (B - V) - (B_0 - V_0)$$

On note **E(B-V)** ou **E_{B-V}** la différence des extinctions dans les bandes B et V, c'est **l'excès de couleur** :

Notation : $E_{B-V} = E(B-V)$

$$E_{B-V} = (A_b - A_v) \quad (5)$$

qui donne :

$$E_{B-V} = (B - V) - (B_0 - V_0) \quad (6)$$

L'excès de couleur est donc la différence entre la couleur observée (B- V) et la couleur réelle (B₀ – V₀) de l'étoile.

Extinction à une longueur d'onde λ

De la même façon que l'on a exprimé l'excès de couleur B par rapport à V, on peut exprimer $E_{\lambda-v}$, excès de couleur à une longueur quelconque par rapport à V, qui a été choisi comme valeur de normalisation.

$$E_{\lambda-v} = A_{\lambda} - A_v$$

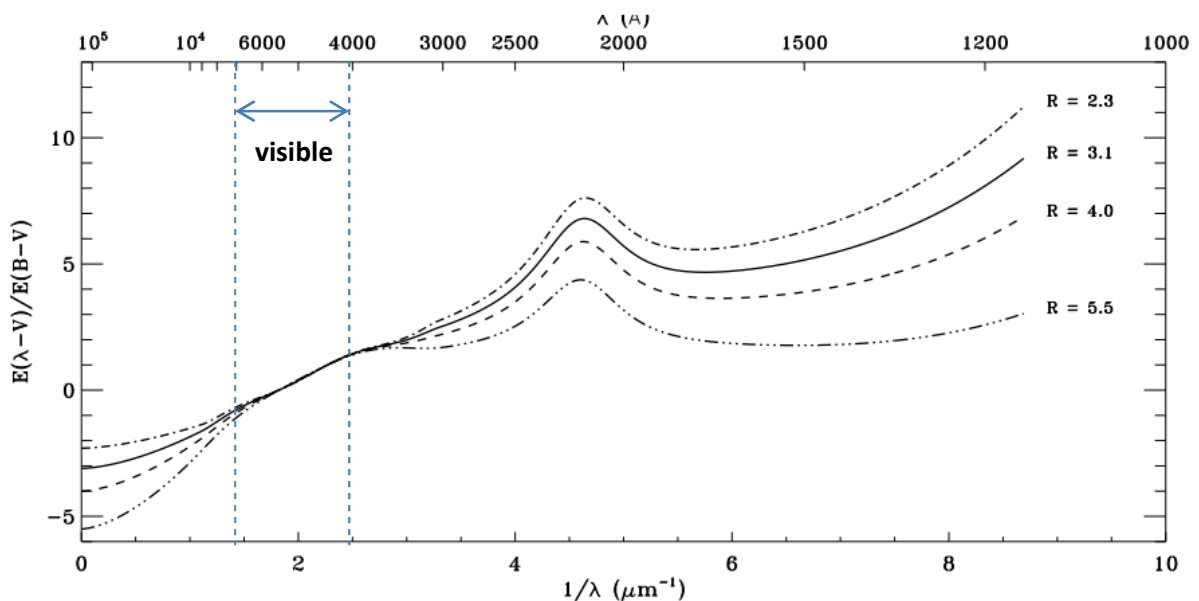
$$\frac{E_{\lambda-v}}{E_{B-v}} = \frac{A_{\lambda} - A_v}{E_{B-v}}$$

$$\frac{A_{\lambda}}{E_{B-v}} = \frac{E_{\lambda-v}}{E_{B-v}} + \frac{A_v}{E_{B-v}}$$

Le rapport $R_v = A_v / E_{B-v}$, est globalement constant dans notre galaxie ; sa valeur est établie à $R_v = 3.1$

Remarque : dans la direction de la nébuleuse d'Orion, $R_v = 5$

Une courbe expérimentale, basée sur la photométrie donne $E_{\lambda-v} / E_{B-v}$ sous la forme $f(\lambda)$, souvent présentée en fonction de $1/\lambda$.

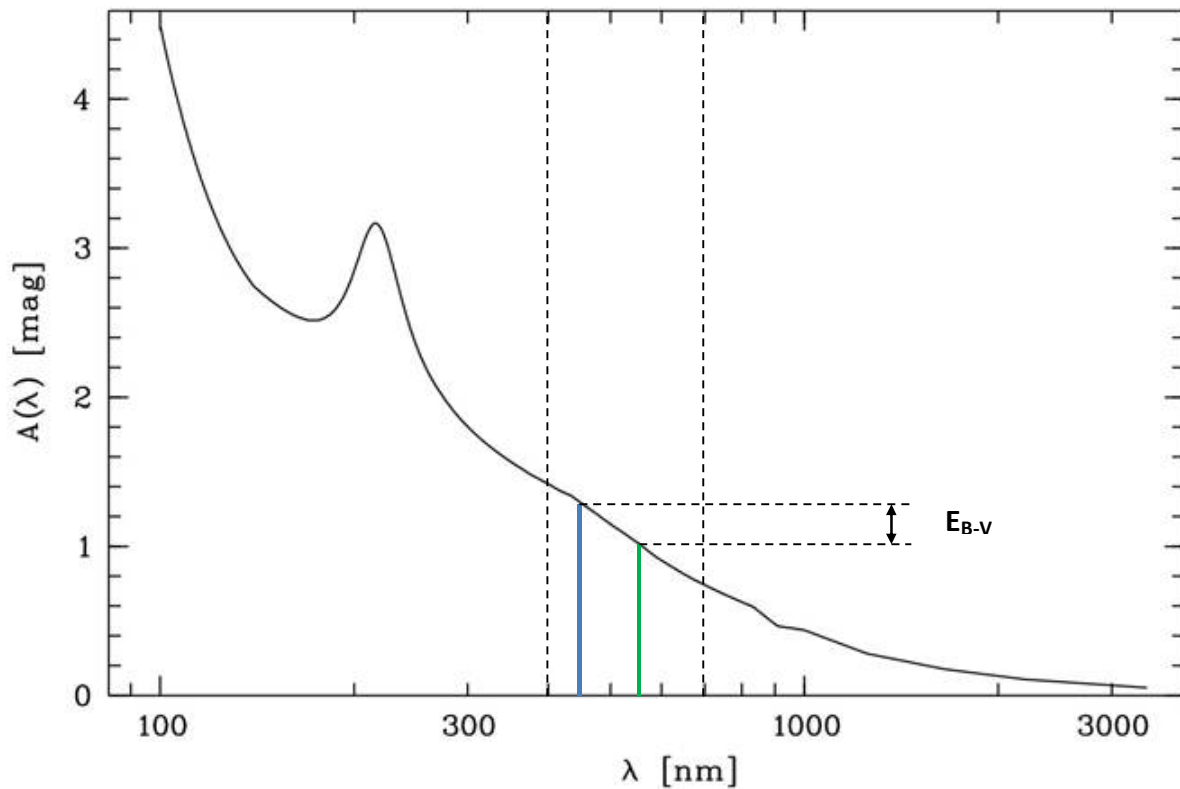


Courbe d'extinction issue de Fitzpatrick (2008) pour 4 valeurs du paramètre R_v .

On note que :

1. La courbe d'extinction est presque linéaire dans le domaine visible
2. Du fait du choix de la normalisation par rapport à V le choix de R_v (ici représenté de 2.3 à 5.5) influe peu sur la valeur de $E_{\lambda-v} / E_{B-v}$

La courbe d'extinction est également parfois présentée sous la forme $A_\lambda / A_V = f(\lambda)$



Astronomie und Astrophysik, A. Weigert et al.

Dans le domaine visible, la courbe d'extinction est pratiquement droite.

Enfin, la courbe est souvent normalisée par rapport à V, avec $f(B) = 1$ et $f(V) = 0$

$$A_\lambda = E_{B-V} (f(\lambda) - R_V)$$

avec

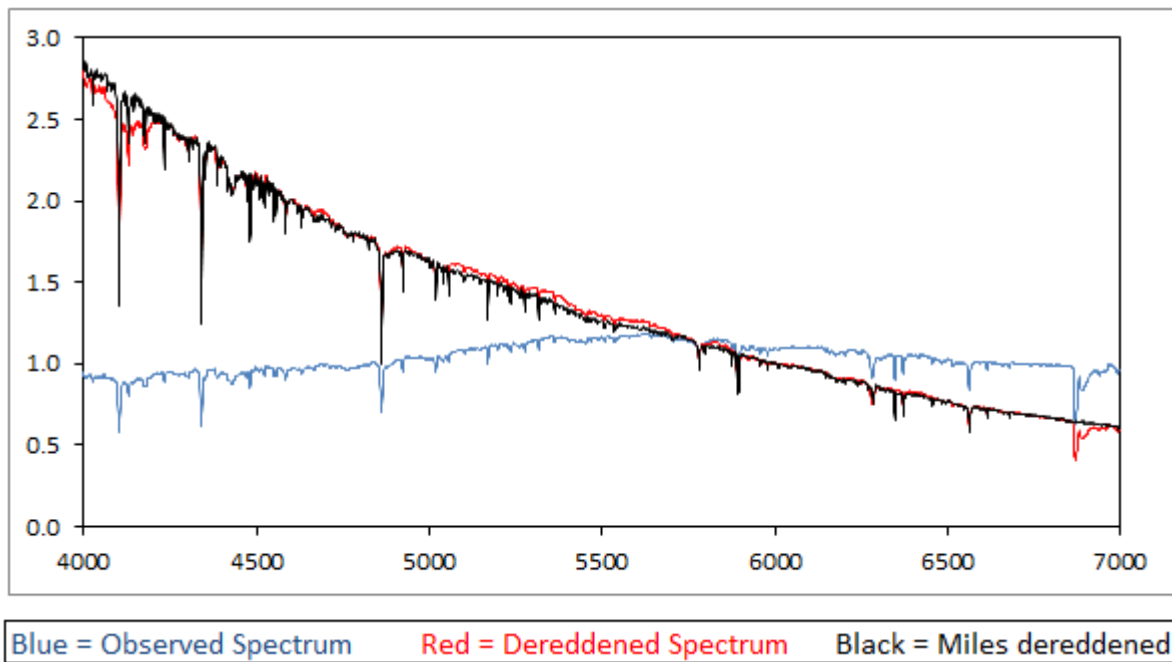
$$R_V = A_V / E(B-V) \quad (7)$$

On en déduit, à partir de (2), la relation permettant de déterminer l'intensité réelle de l'étoile :

$$I_0 = I \cdot 10^{0.4 E(B-V) [f(\lambda) - R_V]} \quad (8)$$

Résultat

Après correction du rougissement, en appliquant un excès de couleur $E_{B-V} = 0.82$ et les valeurs d'extinction MILES, le spectre de Christian Buil devient (courbe rouge) :



Et correspond au spectre de la librairie MILES (courbe noire)

Lois d'extinction

Cardelli & al. (1989)

L'une des études de référence sur la loi d'extinction (The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction).

Cardelli & al. Utilisent la forme A_λ/A_v et en donnent une expression analytique sous la forme

$$A_\lambda/A_v = a(x) + b(x)/R_v$$

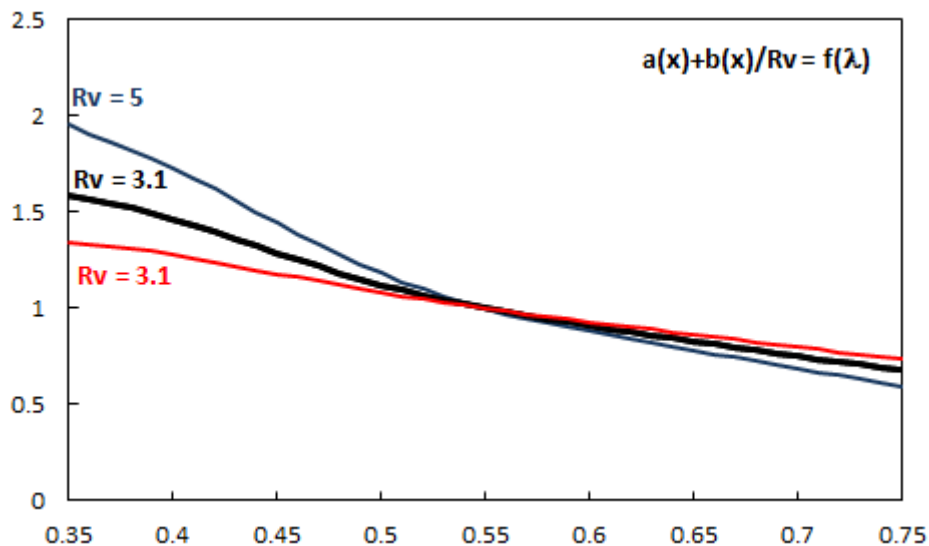
a et b étant des polynômes de degré 7 et x l'inverse de la longueur d'onde exprimée en nm

$$x = 1/\lambda$$

$$a(x) = 1 + 0.17699y - 0.50447y^2 - 0.02427y^3 + 0.72085y^4 + 0.01979y^5 - 0.7753y^6 + 0.32999y^7$$

$$b(x) = 1.41338y + 2.28305y^2 + 1.07233y^3 - 5.38434y^4 - 0.62251y^5 + 5.30260y^6 - 2.09002y^7$$

$$\text{avec } y = x - 1.82$$



A_λ/A_v en fonction de λ (μm) pour 3 valeurs de R_v

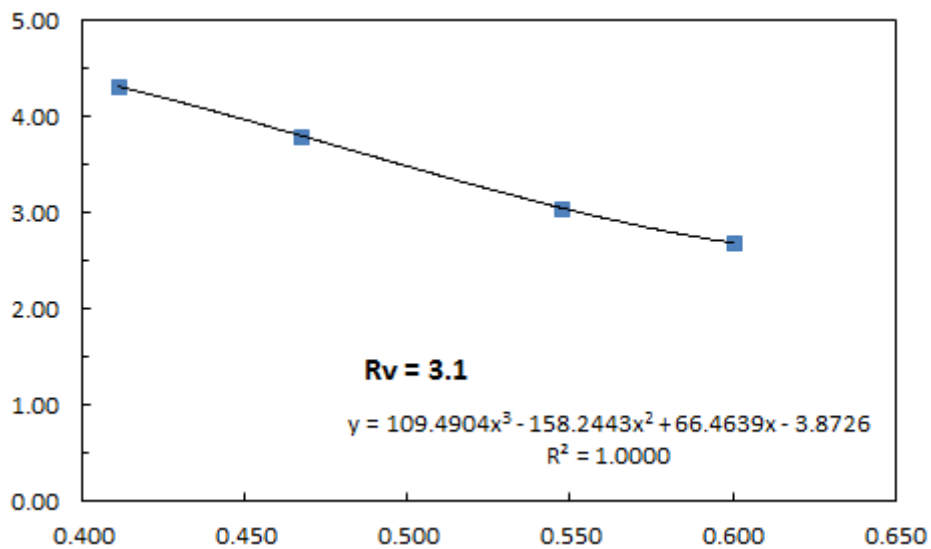
Fitzpatrick (1999)

Cubic spline anchors for R = 3.1 curve

λ [Å]	λ^{-1} [μm^{-1}]	$A\lambda/E_{B-V}$
4110	2.433	4.315
4670	2.141	3.806
5470	1.828	3.055
6000	1.667	2.688

R dependant values of optica spline anchor points

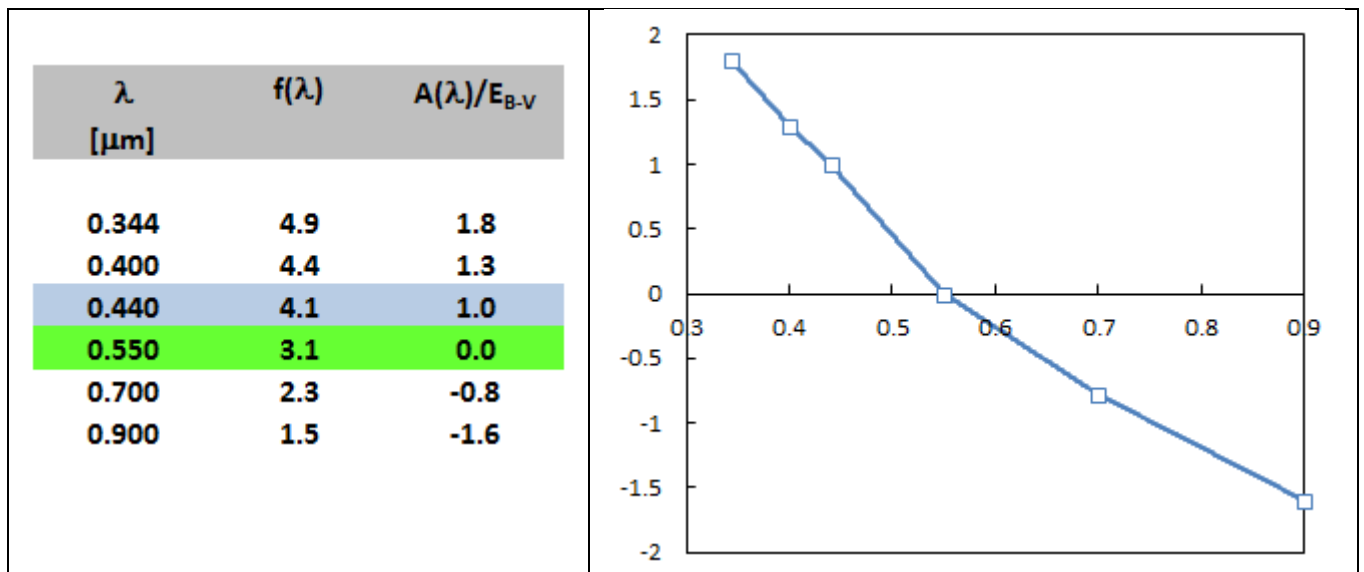
λ [Å]	λ^{-1} [μm^{-1}]	$A\lambda/E_{B-V}$
4110	2.433	$1.208 + 1.0032R - 0.00033R^2$
4670	2.141	$0.701 + 1.0016R$
5470	1.828	$-0.050 + 1.0016R$
6000	1.667	$-0.426 + 1.044R$



$A\lambda/E_{B-V}$ en fonction de λ (μm) pour $Rv = 3.1$

MILES

Le programme de dé-rougissement utilisé pour la librairie fait une simple régression linéaire par segment.



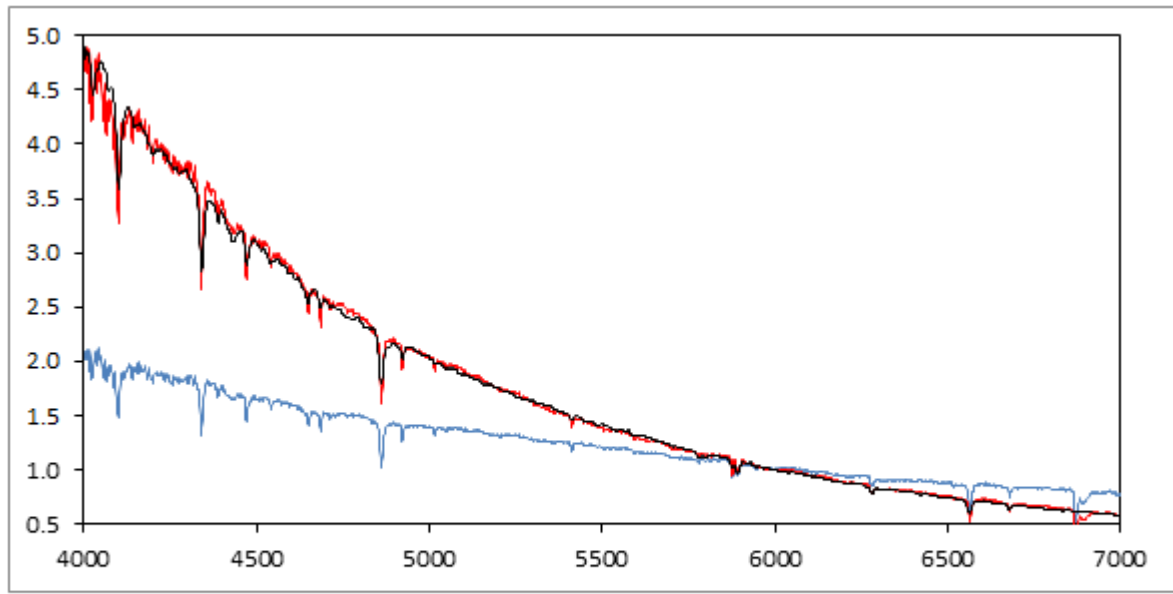
A droite : A_λ/E_{B-V} en fonction de λ exprimée en μm

Quelques exemples

Les spectres ci-dessous ont été obtenus à l'aide d'un LISA. Ils sont corrigés de la réponse instrumentale en utilisant une étoile de référence située à la même hauteur.

Le spectre corrigé par la réponse instrumentale est en bleu. Le spectre dérougi en rouge. Le spectre de référence en noir.

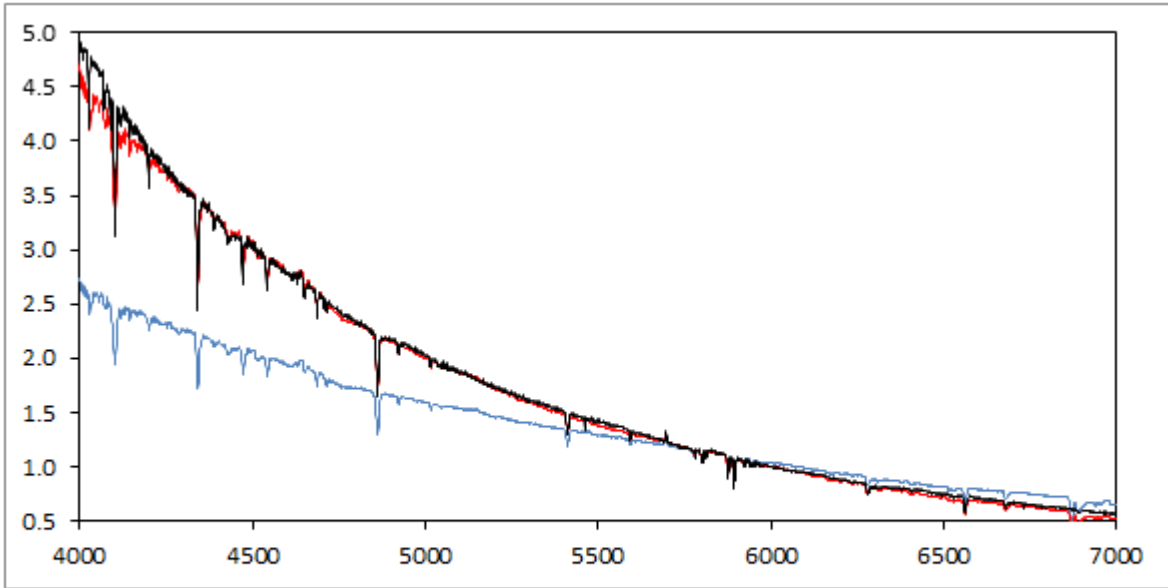
AE Aurigae



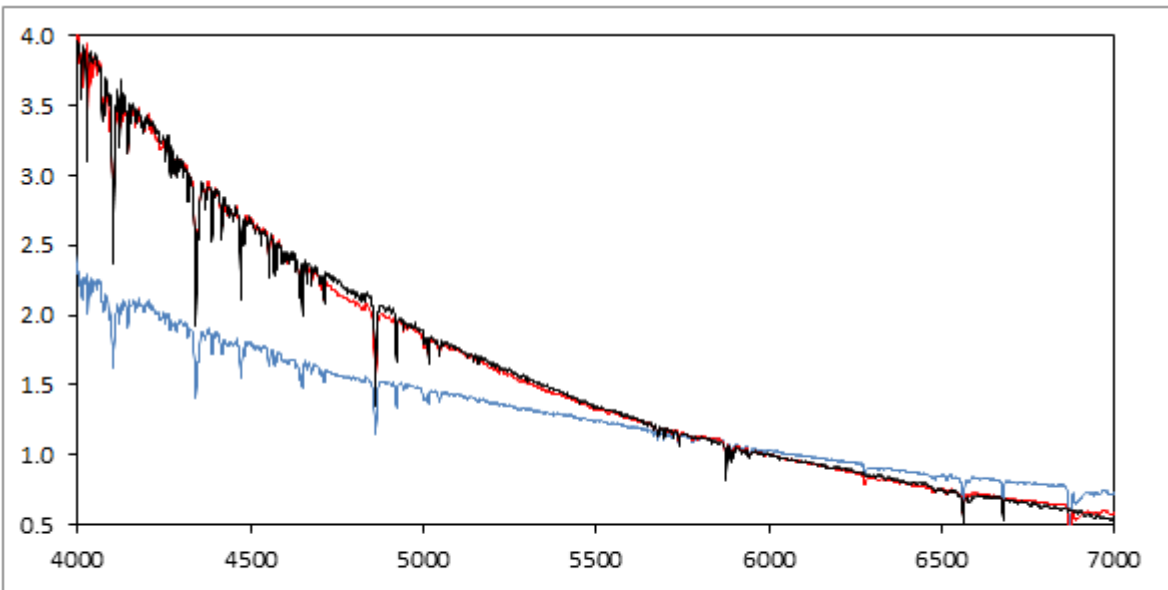
Blue = Observed Spectrum	Red = Dereddened Spectrum	Black = Pickles O9v
AE Aur	O9.5v	$E_{B-V} = 0.53$

Etoile utilisée pour calculer la réponse instrumentale = HR 1752

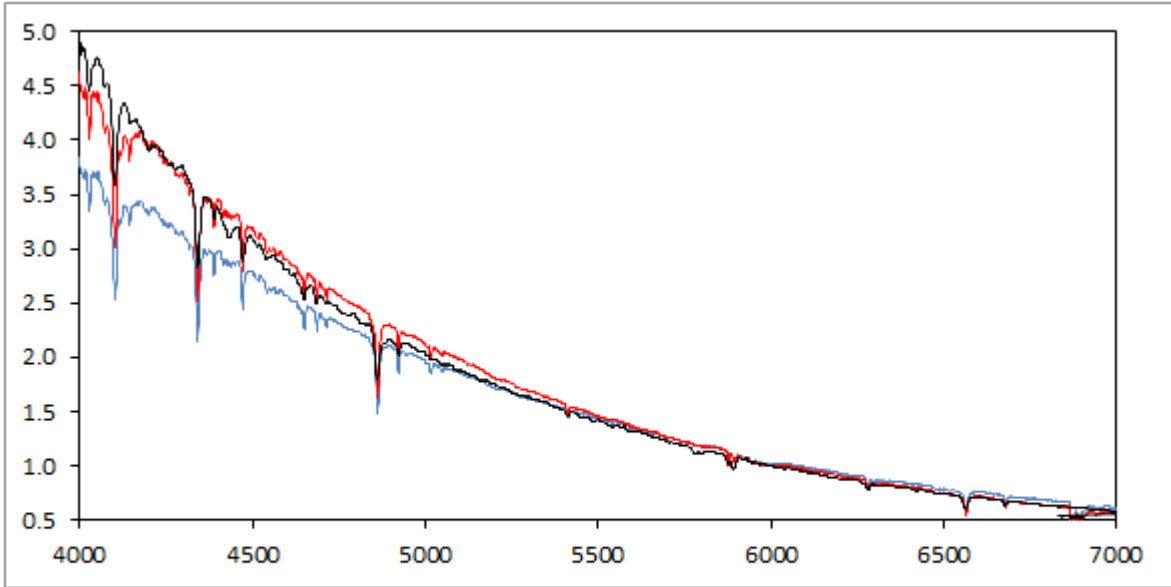
Excès de couleur utilisé pour dérougir le spectre $E_{B-V} = 0.59$



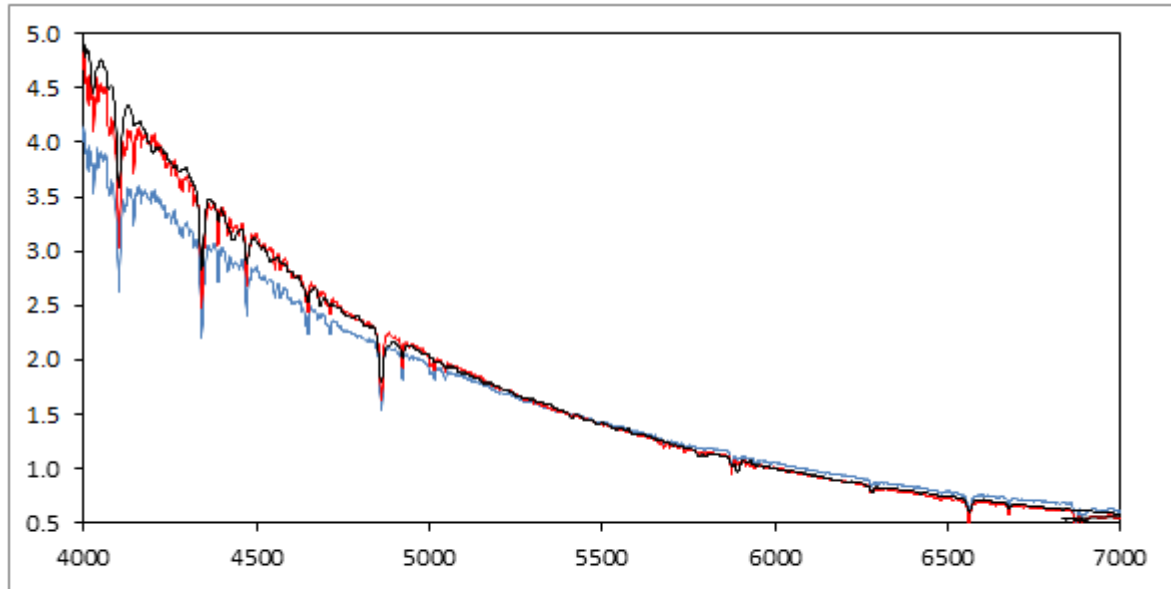
Blue = Observed Spectrum		Red = Dereddened Spectrum	Black = Indo O7III
ξ Per	O7.5I	$E_{B-V} = 0.33$ (BCS)	$E_{B-V} 0.4$



Blue = Observed Spectrum		Red = Dereddened Spectrum	Black = Miles B1Ib
ζ Per	B1Ib	$E_{B-V} = 0.33$ (BCS)	

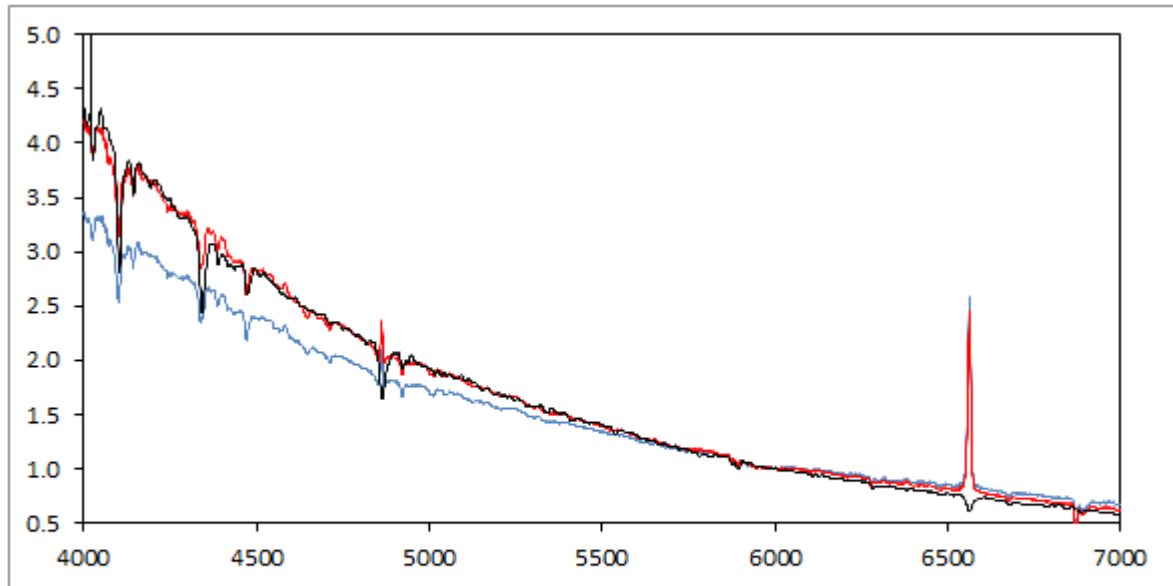


Blue = Observed Spectrum	Red = Dereddened Spectrum	Black = Pickles O9v
σ Ori	O9.5v	$E_{B-V} = 0.06$



Blue = Observed Spectrum	Red = Dereddened Spectrum	Black = Pickles B0v
ϵ Per	B0.5III	$E_{B-V} = 0.10$

φ Per (Etoile Be)



Blue = Observed Spectrum	Red = Dereddened Spectrum	Black = Pickles B2v
φ Per	B2v PE	$E_{B-V} = 0.11$ Tur 1988
		$E_{B-V} 0.16$

Dans ces quelques exemples, j'ai souvent été obligé d'utiliser des indices d'excès de couleur un peu supérieures à celles fournies par la littérature.

On notera que les indices publiés peuvent être fort divergents : voir par exemple les valeurs extrêmes des indices publiés pour les étoiles symbiotiques en annexe 2.

De même, si pour Phi Per (ci-dessus), Tur 1988 donne $E_{B-V} = 0.11$ alors que j'ai utilisé 0.16, on relèvera dans le tableau des indices publiés par Dougherty & al. 1994 que la valeur retenue est 0.21.

Tout ce travail d'investigation est à poursuivre collectivement. Il implique une très grande rigueur tant dans l'acquisition (notamment calcul de la réponse instrumentale, choix de l'étoile de référence ...) que le traitement.

Remerciements :

Merci à Martin Dubs pour ses corrections et les échanges constructifs que nous avons eu sur ce sujet.

Sources et références

Base de donnée MILES : <http://miles.iac.es/>

Cardelli J.A., Geoffrey C.C., and Mathis, J.S., ApJ, 1989, **345**, 245

Dougherty, S. M. & al., A&A, 1994, **290**, 609

Fitzpatrick E.L., ASP Conference Series, 2004 [arXiv:astro-ph/0401344v1](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0401344v1)

Fitzpatrick E.L., PASP, 1999, **111**,63

ANNEXE 1 : Valeurs E_{B-V}

1415 étoiles types O à B7

A catalog of ultraviolet interstellar extinction excesses for 1415 stars

Savage, B. D.; Massa, D.; Meade, M.; Wesselius, P. R.

Astrophysical Journal Supplement Series (ISSN 0067-0049), vol. 59, Nov. 1985, p. 397-432

72* O à M

A new library of stellar optical spectra

Silva, David R.; Cornell, Mark E.

Astrophysical Journal Supplement Series (ISSN 0067-0049), vol. 81, no. 2, Aug. 1992, p. 865-881

ANNEXE 2 : E_{B-V} Etoiles symbiotiques

Source : Contemporaneous Ultraviolet and Optical Observations of Direct and Raman-scattered O VI Lines in Symbiotic Stars

J.J. Birriel, B.R. Espey, R.E. Schulte-Ladbeck, 2000, ApJ, 545, 1020

Cette publication fournit une compilation d'excès d'indice de couleurs provenant de plusieurs sources.

	Min E_{B-V}	Max E_{B-V}
EG And	0.05	0.1
Z And	0.21	0.24
BF Cyg	0.24	0.40
CH Cyg	0.0	0.1
V1016 Cyg	0.17	0.40
AG Dra	0.0	0.15
AX Per	0.22	0.32
HM Sge	0.40	0.65

On notera la dispersion élevée des valeurs publiées par différents auteurs

ANNEXE 3 : Valeurs E_{B-V} Etoiles Be

Be stars near-IR excess (Dougherty+, 1994)

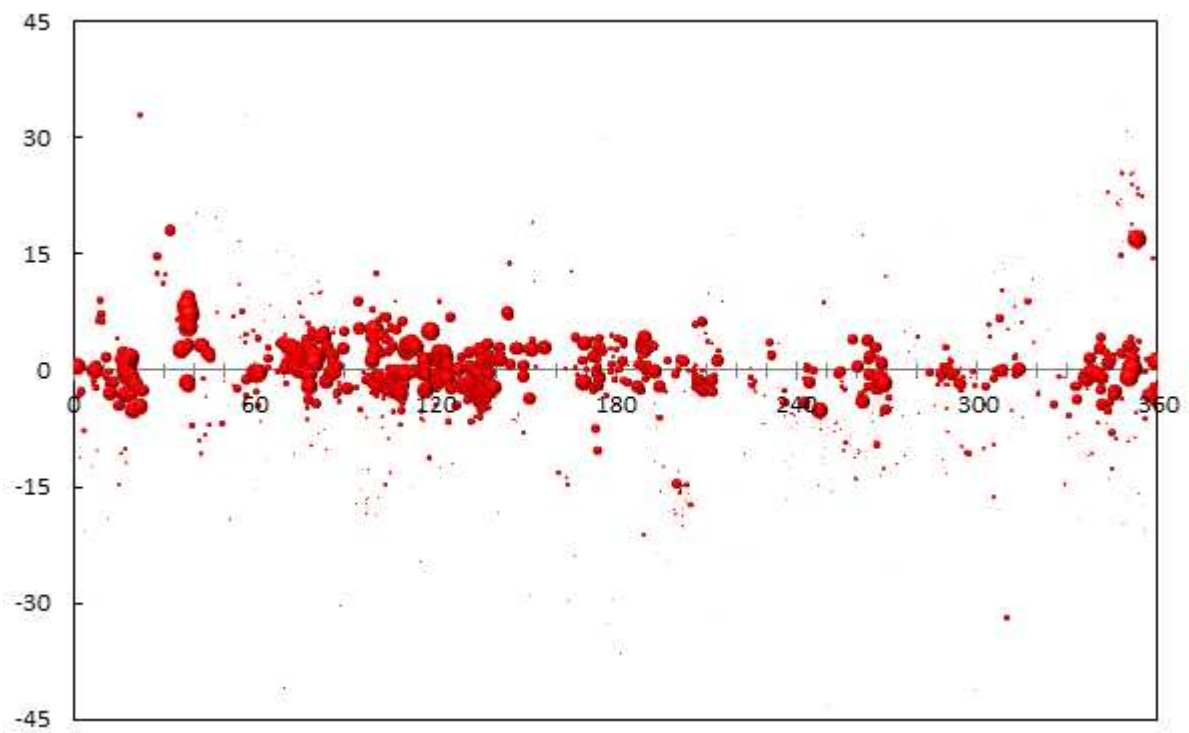
HR	HD	NAME	Spectral Type	EB-V
2819	58155		B5 IIIne	-0.01
1956	37795	{alpha} Col	B7 Ve	-0.01
5938	142926	4 Her	B9 Vpe	-0.02
1910	37202	{zeta} Tau	B4 IIIpe	0.00
1960	37935		B9.5 Ve	0.00
9098	225132	2 Cet	B5 Vn	0.01
8628	214748	{epsilon} PsA	B8 Ve	0.01
7739	192685		B3 V	0.01
2845	58715	{beta} CMi	B8 Ve	0.01
7719	192044	20 Vul	B7 Ve	0.02
5440	127972	{eta} Cen	B1.5 Vne	0.02
5193	120324	{mu} Cen	B2 IV-Ve	0.02
3498	75311	V344 Car	B3 Vne	0.02
8408	209522		B4 IVne	0.02
2412	46860	{mu} Pic	B9 Ve	0.02
8386	209014	{eta} PsA	B8 Ve	0.03
5778	138749	{theta} CrB	B6 Vnne	0.03
5250	121847	47 Hya	B8 Vp-sh	0.03
4787	109387	{kappa} Dra	B6 IIIpe	0.03
4696	107348	{zeta} Crv	B8 Vne	0.03
7457	185037	11 Cyg	B8 Vne	0.03
7843	195554		B9 Vne	0.03
8260	205637	{epsilon} Cap	B2.5 Vpe	0.03
7040	173370	4 Aql	B9 V	0.03
472	10144	{alpha} Eri	B3 Vpe	0.03
2343	45542	{nu} Gem	B6 IIIe	0.04
2745	56014	27 CMa	B3 IIIe	0.04
3858	83953		B6 Ve	0.04
8356	208057	16 Peg	B3 Ve	0.04
9068	224544		B6 IVe	0.04
7335	181409		B2 IVe	0.04
7418	183914	6{beta}^2^ Cyg	B8 Ve	0.04
7803	194244		B9 V	0.05
8009	199218		B8 Vnne	0.05
8773	217891	{beta} Psc	B6 Ve	0.05

3670	79621		B9 Ve	0.05
1142	23302	17 Tau	B6 IIIe	0.05
8053	200310	60 Cyg	B1 Ve	0.05
7039	173300	{phi} Sgr	B8 III	0.05
7647	189687	25 Cyg	B3 IVe	0.05
8402	209409	o Aqr	B7 IVe	0.05
7565	187811	12 Vul	B2.5 Ve	0.05
3330	71510		B2 Ve	0.06
3213	68324		B1 IVe	0.06
7807	194335		B2 Vne	0.06
4123	91120		B9 Vne	0.06
6720	164447		B8 Vne	0.06
1788	35411	{eta} Ori	B2 Ve+B1 V	0.06
3593	77320		B2.5 Vne	0.06
7789	193911	25 Vul	B8 IIIne	0.06
7708	191610	28 Cyg	B2.5 Ve	0.06
7890	196712		B7 IIIne	0.06
894	18552		B8 Vne	0.06
1165	23630	{eta} Tau	B7 IIIe	0.06
8603	214168	8 Lac	B2 Ve	0.06
7963	198183	{lambda} Cyg	B5 Ve	0.06
2356	45725	{beta} Mon	B3 Ve	0.06
8762	217675	o And	B6 IIIpe+A2p	0.07
6519	158643	51 Oph	B9.5 Ve	0.07
6984	171780		B5 Vne	0.07
2749	56139	{omega} CMa	B2 IV-Ve	0.07
2790	57219	NW Pup	B2 IVne	0.07
985	20336	BK Cam	B2.5 Vne	0.07
4140	91465	PP Car	B4 Vne	0.08
3356	72067		B2 Vne	0.08
6510	158427	{alpha} Ara	B2.5 Vne	0.08
3946	86612		B4 Ve	0.08
7927	197419	V568 Cyg	B2 IV-Ve	0.08
8438	210129	25 Peg	B7 Vne	0.08
1126	23016	13 Tau	B9 Vne	0.09
5941	142983	48 Lib	B5 IIIpe	0.09
1180	23862	28 Tau	B8 Vpe	0.09
7403	183362		B3 Ve	0.09
335	6811	{phi} And	B7 Ve	0.10
7	144	10 Cas	B9 IIIe	0.10
8758	217543		B3 Vpe	0.10
1423	28497	DU Eri	B1 Vne	0.10
8520	212076	31 Peg	B2 IV-Ve	0.10
4621	105435	{delta} Cen	B2 IVne	0.10

1156	23480	23 Tau	B6 IVe	0.11
1087	22192	{psi} Per	B5 Ve	0.11
2309	44996		B5 Ve	0.11
8682	216057		B5 Vne	0.11
193	4180	o Cas	B5 IIIe	0.11
2921	60855		B2 Ve	0.12
2690	54309	FV CMa	B2 IVe	0.12
8731	217050	EW Lac	B4 IIIpe	0.12
9070	224559	LQ And	B3 IVne	0.12
5316	124367	V795 Cen	B4 Vne	0.12
8259	205551		B9 IIIe	0.13
7074	173948	{lambda} Pav	B2 II-IIIe	0.13
1622	32343	11 Cam	B2.5 Ve	0.13
2787	57150	NV Pup	B3 IVne+ B2 V	0.13
1508	30076	56 Eri	B2 Ve	0.13
2911	60606	OW Pup	B3 Vne	0.13
3135	65875		B2.5 Ve	0.13
7158	175869	64 Ser	B9 IIIpe:Hg	0.14
1934	37490	{omega} Ori	B3 IIIe	0.14
2501	49131		B2 III	0.15
5730	137387	{kappa}^1^ Aps	B1 Vpne	0.15
1789	35439	{psi} Ori	B1 Vpe	0.15
7084	174237	CX Dra	B2.5 Ve	0.15
4009	88661	QY Car	B2 IVpne	0.16
3147	66194	V374 Car	B2 IVpne	0.16
2538	50013	{kappa} CMa	B1.5 IVne	0.16
3237	68980	MX Pup	B1.5 IIIe	0.17
6304	153261		B2 Vne	0.17
2825	58343	FW CMa	B2.5 IVe	0.17
8171	203467	6 Cep	B3 IVe	0.18
7249	178175	V4024 Sgr	B2 Ve	0.18
2142	41335		B2 Vne	0.18
6451	157042	{iota} Ara	B2 IIIne	0.19
8146	202904	{upsilon} Cyg	B2 Vne	0.19
1273	25940	48 Per	B3 Ve	0.19
6712	164284	66 Oph	B2 Ve	0.19
6819	167128		B3 IIIpe	0.20
6873	168797		B3 Ve	0.20
496	10516	{phi} Per	B2 Vpe	0.21
1500	29866		B8 IVne	0.21
1160	23552		B8 Vne	0.21
5907	142184		B2.5 Vne	0.21
5223	120991	V767 Cen	B2 IIIe	0.21
7554	187567	V1339 Aql	B2.5 IVe	0.21

8047	200120	59 Cyg	B1 Vne	0.21
8539	212571	{pi} Aqr	B1 Ve	0.22
2855	58978	FY CMa	B0 IV:pe	0.22
264	5394	{gamma} Cas	B0 IVe	0.22
8375	208682		B2.5 Ve	0.22
3034	63462		B0 V:pe	0.26
1858	36576	120 Tau	B2 IV-Ve	0.31
2284	44458	FR CMa	B1 Vpe	0.31
8690	216200	14 Lac	B3 IV:e	0.32
1659	32990	103 Tau	B2 Ve	0.33
4930	113120		B1.5 IIIne	0.34
2545	50123		B6 Vnpe	0.34
6929	170235	V4031 Sgr	B2 IVpe	0.35
6621	161756	V3894 Sgr	B4 IVe	0.36
6422	156325		B5 Vne	0.37
1660	32991	105 Tau	B2 Ve	0.45
8153	203025		B2 IIIe	0.55
4830	110432		B2 Vpe	0.57
6118	148184	{chi} Oph	B2 IV:pe	0.60
	45910	AX Mon	B2 IIIe+K0 III	0.68
2577	50820		B3 IVe+K2 II	0.88

ANNEXE 4



Excès de couleur des 1415 étoiles du catalogue Savage en fonction des coordonnées galactiques. La taille des symboles est proportionnelle à E_{B-V}