

# DE LA SPECTROSCOPIE BASSE RÉSOLUTION À LA DÉTERMINATION DU RAYON D'UNE ÉTOILE DEPUIS LE LYCÉE

Léna C. (TES2), Gaetan S. (1STI2D2), Rémy K. (1STI2D3), Dorian F. (1SEN), Valentin K. (1SEN) et Nicolas L. (2de) avec l'aide de leurs professeurs M. STORTZ Bertrand et M. DEVAUX Jean Sébastien.

*Cette activité a été réalisée en 2014 dans le cadre d'un club astronomie au lycée Jean Moulin de Béziers. À l'aide de l'équipement « Astro à l'école » et d'un simple réseau, elle permet de remonter jusqu'au rayon des étoiles...*

L'objectif de cet article est de montrer comment le questionnement, l'expérimentation permettent de faire émerger à travers la démarche scientifique des découvertes étonnantes avec nos élèves.

Dans le cadre du club Astronomie du lycée, nous avons invité les élèves à se lancer dans le concours C-génial. Le statut des élèves est passé d'apprenants à découvreurs de notions qui leur paraissaient inaccessibles d'autant que le groupe d'élèves impliqués n'avaient que peu de connaissances en sciences.

Après une rapide présentation du ciel avec la fabrication d'un cherche-étoiles et une présentation du logiciel libre Stellarium, nous nous sommes retrouvés autour du télescope dans la cour du lycée pour observer ce ciel que nous étions en train d'apprivoiser.

Le déclenchement de l'aventure s'est fait autour d'une expérience on ne peut plus classique : la décomposition de la lumière par un prisme.

La question que nous avons donc alors posée a été :

**Peut-on étudier la lumière des étoiles ?  
Ou plutôt qu'est-ce que cela peut nous apporter ?**

Pour faire l'étude de la lumière, on utilise depuis longtemps un prisme. Les élèves avaient toujours vu l'expérience réalisée par leur professeur et ce fut leur tour d'expérimenter.

Les éléments nécessaires en poche, un prisme et une lampe blanche, une fente fine, une lentille et un condenseur pour enfin obtenir un spectre ; puis une lampe à vapeur de mercure pour découvrir que la lumière bleutée de l'ampoule était composée de quelques lumières colorées seulement. La lumière était donc plus complexe que prévue.



Fig.1. Expérience en classe de la décomposition de la lumière.

Afin d'étudier la lumière, les élèves ont fabriqué un spectroscope maison. Avec un CDrom, on peut aussi décomposer la lumière. Mais il nous faut toujours une fente pour que, dans le spectre, les motifs ne se recouvrent pas afin que la décomposition soit exploitable.

Avec un tube en carton suffisamment long, muni d'une fente réalisée avec du scotch opaque et d'un bout de CD placé à l'autre extrémité du tube, nous avons réalisé notre propre spectroscope<sup>1</sup>.



Fig.2. Spectroscope maison et spectre d'un tube fluorescent.

Différentes sources de lumière sont observées jusqu'à la plus surprenante, le Soleil. Dans le spectre que l'on croyait continu, on voit apparaître des raies sombres.

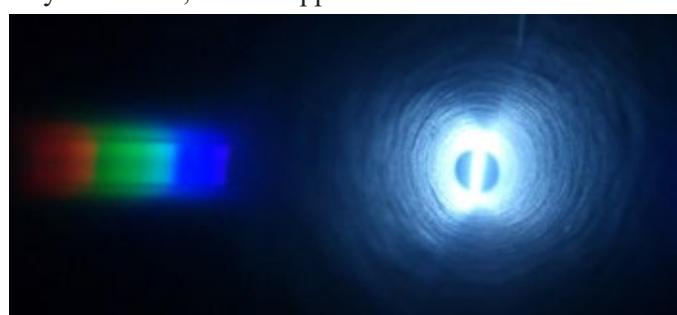


Fig.3. Spectre du Soleil à travers notre spectroscope.

<sup>1</sup> Il faut auparavant enlever la couche de « peinture » du CD avec du gros ruban adhésif pour le rendre transparent...

## Est-ce la même chose pour les autres étoiles ?

Le club est doté d'un Star Analyzer, un réseau de 100 traits au mm optimisé permettant d'obtenir un spectre des étoiles. Voici quelques résultats d'étoiles que nous avons obtenus en faisant un léger filé avec le télescope pour des étoiles particulièrement brillantes.



Fig.4. Le Star Analyser fixé sur la caméra. Le réseau doit être aligné avec le capteur : en plaçant les traits du réseau parallèles à la largeur du capteur, le spectre se forme suivant la longueur.

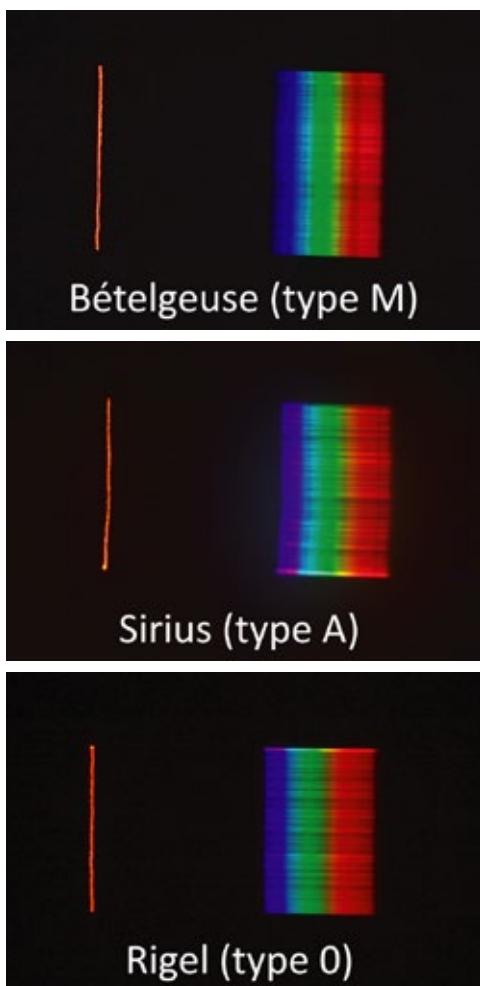


Fig.5. Spectres de trois étoiles réalisés avec le Star Analyser. Pour que les images soient lisibles, il faut étaler le spectre en utilisant la mouture. La caméra est orientée pour que le déplacement en ascension droite soit parallèle à la largeur du capteur. On déclenche et on réalise un filé sans la motorisation. Il n'y a d'ailleurs pas besoin de fente ici puisque les étoiles sont ponctuelles.

Les élèves découvrent alors que les trois étoiles n'ont pas le même spectre.

## Comment sont classées les étoiles ?

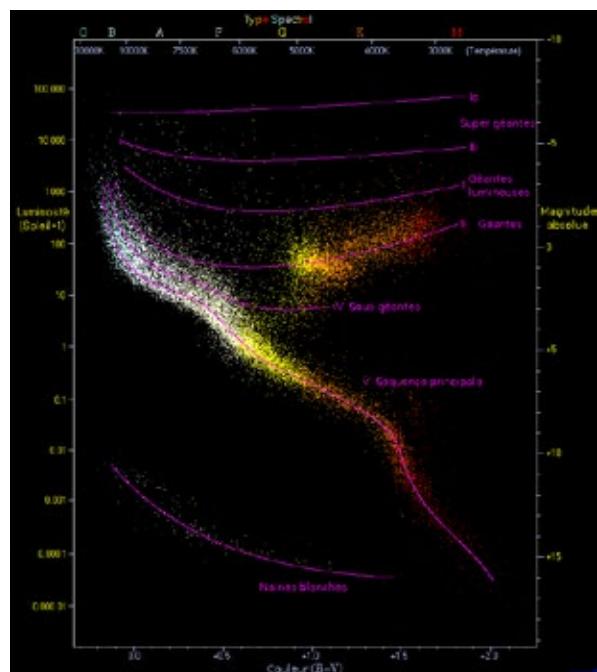


Fig.6. Diagramme HR (source Wikipédia).

On peut voir sur ce diagramme que les étoiles sont classées en fonction de 4 paramètres : la luminosité et la magnitude absolue d'une part, la température de surface et le type spectral d'autre part.

Il a fallu que les élèves par binôme se lancent dans la signification de chacun de ces termes. Par une recherche sur Internet, ils ont découvert les relations mathématiques qui relient ces grandeurs, ce qui permettra de se poser la question à l'origine de ce travail.

### La luminosité stellaire

En astronomie, elle représente la quantité totale d'énergie rayonnée (dans le domaine électro-magnétique) par unité de temps par un astre. Elle représente donc la brillance intrinsèque de l'astre, et non son éclat apparent qui lui dépend de la distance.

La relation entre température de surface ( $T$ ), rayon ( $R$ ) et luminosité ( $L$ ) d'un astre s'écrit :

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$4\pi R^2$  représente la surface de l'étoile (de rayon  $R$ ) ;

$T$  est sa température de surface ;

$\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5,670\,373 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

La luminosité est donc directement reliée au rayon de l'étoile (puisque la surface dépend de  $R^2$ ) ainsi qu'à sa température.

### La magnitude absolue

La magnitude est une grandeur permettant d'évaluer voire de comparer la luminosité des étoiles.

Elle est définie par la magnitude apparente qu'aurait cet

astre s'il était placé à une distance de référence fixée à 10 parsecs.

1 parsec c'est la distance à laquelle il faut placer un objet dont la taille est l'unité astronomique (distance Terre-Soleil) pour le voir sous un angle de 1" d'arc ( $1'' = 1/3600^\circ$ )

La magnitude s'obtient par la formule suivante :

$$M = -2,5 \log L + C$$

où  $L$  représente la luminosité d'une étoile, mesurée en « luminosité solaire », unité de mesure de la luminosité :

$$L_0 = 3,826 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

«  $C$  » correspond à une constante pouvant prendre différentes valeurs distinctes en fonction des bandes spectrales étudiées.

$C = 5,48 = Mb$  (magnitude bolométrique, dans tout le spectre)

ou  $C = Mv = 4,83$  (magnitude visuelle).

Remarque : la valeur de  $L_0$  peut varier selon le système d'unités utilisé, mais est souvent exprimée en watt.

## Le type spectral

On classe les étoiles en fonction de leur spectre, des étoiles les plus chaudes au plus froides : O B A F G K M. Une question se pose alors :

**Comment détermine-t-on la température d'une étoile ?**

### Rappel sur la loi empirique de Wien

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}$$

Grâce à cette loi, on peut déterminer la température de surface d'une étoile si on connaît la longueur d'onde correspondant au maximum de la courbe écrite par le spectre de l'étoile.

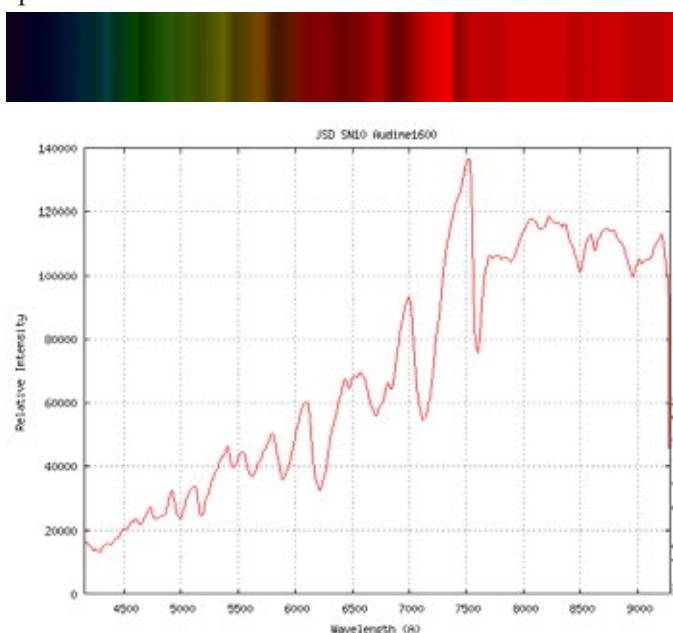


Fig.7. Le spectre de l'étoile  $\mu$  Gem que nous avons réalisé avec une caméra Audine. Si on essaie de faire correspondre à une courbe de corps noir, on trouve un  $\lambda_{\max}$  autour de 7750 Å.

L'ensemble des relations précédentes montrent le lien qui existe entre les quatre paramètres qui permettent de caractériser les étoiles.

**Cependant un nouveau paramètre vient d'apparaître, R le rayon de l'étoile.**

La nouvelle tournure est donc la suivante : sommes-nous capables de déterminer le rayon d'une étoile en lisant son spectre à l'aide du Star Analyzer...

**Pouvons-nous réellement déterminer le rayon d'une étoile au lycée ?**

Afin de vérifier que ce raisonnement est valable, nous l'avons utilisé pour l'étoile la mieux connue : le Soleil.

Pour traiter les étoiles dont nous obtiendrons le spectre il suffit de modifier les différentes formules afin de pouvoir les exploiter.

À l'aide de la magnitude<sup>2</sup> des étoiles que l'on peut trouver dans des catalogues, on peut déterminer la luminosité stellaire  $L$  :

$$L = 10^{\frac{C-M}{2,5}}$$

L'étude du spectre permet de trouver l'ordre de grandeur du  $\lambda_{\max}$  puis de déterminer ainsi la température de surface de l'étoile à l'aide de la loi de Wien.

On en déduit le rayon de l'étoile finalement à l'aide de la relation :

$$R = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma T^4}}$$

Ici une vérification de notre fichier avec le Soleil. On retrouve son diamètre à partir d'un  $\lambda_{\max}$  de 5 000 Å trouvé dans la littérature.

| Détermination du rayon ou diamètre d'une étoile par la mesure de son maximum d'émission |   |
|---|---|
| Application de la loi de Wien   |   |
| M =   | 4.83  |
| L =   | 3.826E+26 W                                 |
| R =   | 6.90E+08 m                                  |
| diamètre  | 1.380E+06 km                                |
| Constante de Stefan Boltzmann   |   |
| $\sigma =$  | 5.67E-08 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> |

Fig.8. Essai d'application des formules au Soleil. Si on entre la valeur du  $\lambda_{\max}$  (5E-7 m), on trouve la température de surface  $T$  (5 800 K) avec la loi de Wien. On donne ensuite la magnitude absolue  $M$  (4,83) et les formules permettent d'obtenir sa luminosité  $L$  puis son rayon  $R$  et son diamètre (1 380 000 km).

Si on reprend l'exemple de l'étoile  $\mu$  Gem, sur les infos que nous avons pu trouver, la taille de cette étoile est de l'ordre de 50 fois la taille de notre Soleil.

À l'aide notre étude, en entrant le  $\lambda_{\max}$  et la magnitude absolue  $M$ , nous obtenons que la taille de cette étoile est

<sup>2</sup> La magnitude absolue  $M$  peut être calculée à partir de la magnitude visuelle et de la distance de l'étoile.

de l'ordre de 42 fois celle du Soleil.

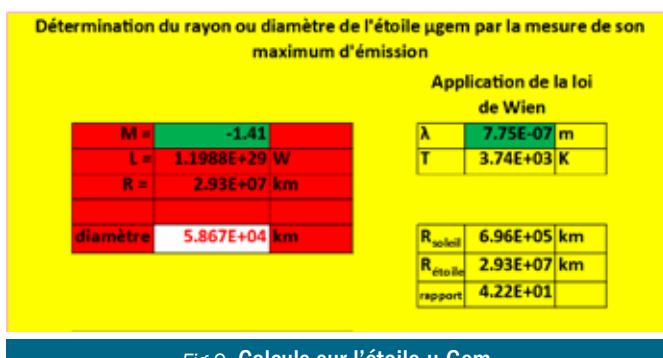


Fig.9. Calculs sur l'étoile μ Gem.

Nous avons donc commis une erreur relative de

$$\frac{(50 - 42)}{50} = 0,16$$

soit 16 %. Il est à noter également que nous sommes aussi limités par la précision de notre détermination du  $\lambda_{\text{max}}$  avec un Star Analyzer l'incertitude n'est pas négligeable. Pour nous aider dans notre travail, nous avons fait appel à un des développeurs du logiciel d'astronomie AUDELA, M. Mauclair Benjamin. Celui-ci nous a réalisé une routine permettant à partir des clichés et de fichiers cosmétiques de traiter les images afin d'obtenir les spectres étalonnés pour déterminer le  $\lambda_{\text{max}}$  et d'obtenir le rayon de quelques étoiles.

Pour étalonner les différents spectres, nous avons tout d'abord réalisé un spectre de Regulus et comparé avec son spectre connu et répertorié, en utilisant deux raies caractéristiques (H $\beta$  à 4 861 Å et O2 à 7 605 Å).

À l'époque du dépôt de dossier qui n'a pas été malheureusement retenu par le jury du concours, nous n'avons faute d'une météo conciliante pu faire que les deux mesures présentées ci-dessus.



Fig.10. Montage de la caméra iNova avec le Star Analyser sur un C8 avec réducteur de focale.

Voici les mesures sur deux étoiles que nous avons réalisées par la suite.

## 72 Leo

À l'aide du télescope (un C8 avec réducteur de focale) et d'une caméra iNova sur laquelle on a fixé un Star Analyzer, nous avons obtenu le spectre de l'étoile 72 Leo.

72 Léo

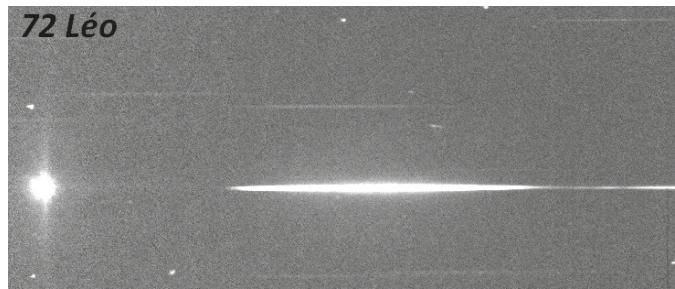


Fig.11. Le spectre obtenu de 72 Leo.

L'information contenue dans cette partie de l'image est ensuite traitée via le logiciel Audela afin d'obtenir le profil du spectre, et sa transcription colorée.

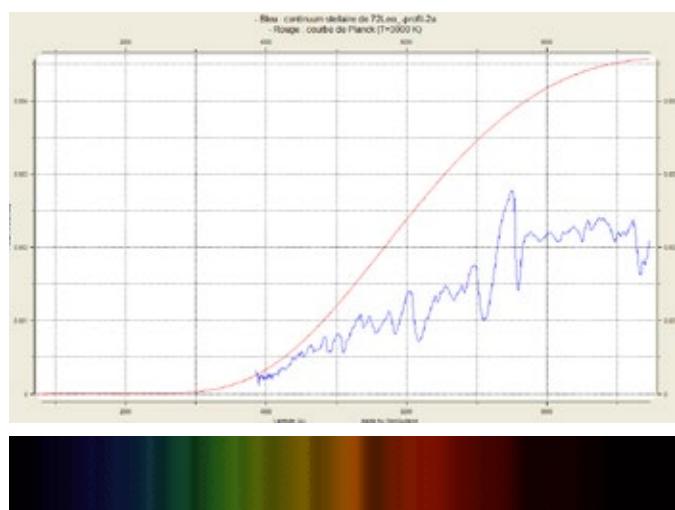


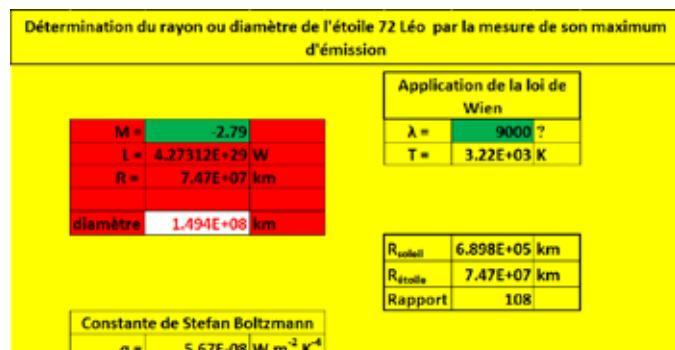
Fig.12. Le spectre de 72 Leo sous forme de courbe (en bleu) puis colorisé afin d'être plus facile à identifier. Au-dessus du profil du spectre, la courbe de Planck en rouge, courbe correspondant à un corps noir, modélisée par SpcAudace.

À partir du profil, on peut déterminer un encadrement de la valeur du  $\lambda_{\text{max}}$  en regardant la partie montante du profil et sa partie descendante et en essayant de faire correspondre une courbe de corps noir :

$$9\,000 \text{ Å} < \lambda_{\text{max}} < 10\,000 \text{ Å}$$

La magnitude absolue de cette étoile est obtenue avec le logiciel Stellarium

$$M = -2,79$$



| Application de la loi de Wien |   |
|-------------------------------|---|
| $\lambda =$                   | 10000 Å                                     |
| $T =$                         | 2,90E+03 K                                  |
| <b>diamètre</b>               |   |
| R <sub>étoile</sub>           | 6,898E+05 km                                |
| R <sub>soleil</sub>           | 9,22E+07 km                                 |
| Rapport                       | 133,7                                       |
| Constante de Stefan Boltzmann |   |
| $\sigma =$                    | 5,67E-08 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> |

Fig.13. La feuille de calcul pour 72 Leo avec un  $\lambda_{\max}$  à 9 000 puis à 10 000 Å.

Toujours avec la même feuille de calcul préparée à cet effet, on en déduit un encadrement du rayon de l'étoile :

On peut voir ici que cette étoile située à 959 al de la Terre (distance donnée par Stellarium) est mesurable, elle possède un rayon compris entre **108 et 134 fois** celui de notre Soleil.

## 60 Leo

Toujours à l'aide du télescope et d'une caméra iNova sur laquelle on a fixé un Star Analyzer, nous avons obtenu le spectre de l'étoile 60 Leo.



Fig.14. Le spectre obtenu de 60 Leo.

L'information contenue dans cette partie de l'image est ensuite traitée via le logiciel Audela afin d'obtenir le profil du spectre, et sa transcription colorée :

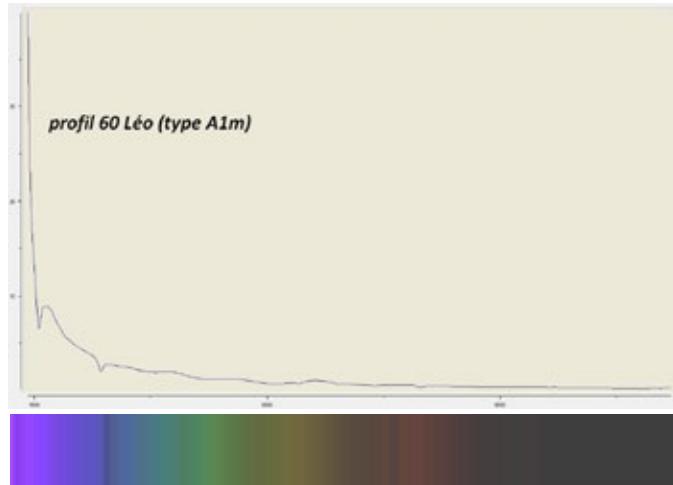


Fig.15. Le spectre de 60 Leo sous forme de courbe puis colorisé.

À partir du profil, on peut déterminer une valeur maximale du  $\lambda_{\max}$  :

$$4000 \text{ Å} > \lambda_{\max}$$

La magnitude absolue de cette étoile est obtenue avec le logiciel Stellarium

$$M = 1,45$$

| Détermination du rayon ou diamètre de l'étoile 60 Léo par la mesure de son maximum d'émission |   |
|---|---|
| <b>Application de la loi de Wien</b>  |   |
| $M =$   | 1.45  |
| $L =$   | 8,60488E+27 W                               |
| $R =$   | 2,09E+06 km                                 |
| <b>diamètre</b>   | 4,187E+06 km                                |
| R <sub>étoile</sub>   | 6,898E+05 km                                |
| R <sub>soleil</sub>   | 2,09E+06 km                                 |
| Rapport   | 3   |
| Constante de Stefan Boltzmann   |   |
| $\sigma =$  | 5,67E-08 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> |

Fig.16. La feuille de calcul avec un  $\lambda_{\max}$  à 4 000 Å.

On peut voir ici que cette étoile située à 127 al de la Terre (distance donnée par Stellarium) possède un rayon maximal de 3 fois celui de notre Soleil. Il s'agit bien d'une valeur maximale : si  $\lambda_{\max}$  est inférieur à 4 000 Å, T est supérieur à 7 250 K et R est inférieur à 2,09 Mkm.

## Conclusion

Même si la participation au concours n'a pas eu le succès escompté, les élèves ont pu mettre en œuvre une démarche expérimentale à son terme. Les résultats obtenus semblent montrer que nous ne sommes pas trop loin de la réalité. Le projet aurait pu être plus complet si nous avions eu la possibilité de réaliser davantage de mesures.

Il semblerait toutefois que la réponse à la question finale de notre projet soit :

*On peut s'approcher de la détermination du rayon des étoiles dans la cour du lycée.*