

## **Chapitre 7 : Faire de la photométrie pour la science**

Dans les six premiers chapitres de ce guide, vous trouverez toutes les explications nécessaires pour réaliser, à l'aide d'une caméra CCD, des mesures d'étoiles variables potentiellement utiles à la science. Sont décrits la plupart des prérequis, procédures, techniques d'observation et d'analyse pour débiter en toute sérénité. Dans le chapitre suivant, il s'agit d'apporter quelques astuces complémentaires, afin de vous aider à planifier et à réaliser vos propres observations. Tout ceci en s'assurant qu'elles débouchent sur des résultats utilisables scientifiquement. Très souvent, dans le cadre d'une campagne d'observation (lancée par l'AAVSO ou tout autre organisme), la manière de procéder aux mesures vous sera de toute façon longuement détaillée et justifiée. Ici, notre objectif est de vous donner un cadre général pour vous guider dans vos techniques d'observation. Le chapitre 7 peut être considéré comme optionnel, mais il est conseillé de le lire au moins une fois afin d'être au courant des pratiques de l'AAVSO en la matière. Nous voulons attirer votre attention sur deux points en particulier : 1) l'utilité des filtres pour réaliser des mesures photométriques ; 2) les choix cruciaux à réaliser lors d'observations d'une classe spécifique d'étoiles variables, comme l'utilisation (ou non) d'un filtre, la fréquence et la durée des poses.

Avant toute observation, il est conseillé de consulter le site web de l'AAVSO. Vous y trouverez certaines ressources mises à la disposition des observateurs, comme par exemple des listes d'étoiles cibles. En effet, l'AAVSO (comme d'autres associations) organise des campagnes, pour des étoiles spécifiques à observer pendant une période donnée. Il y a également beaucoup de cibles permanentes, pour lesquelles des observations continues sont requises. Vous ne serez jamais à court de cible... Nous n'en donnerons pas la liste exhaustive dans ce guide. Il y en a beaucoup trop méritant l'attention des observateurs (et il y aurait de quoi écrire un livre entier à ce sujet). Souvenez-vous cependant que le choix de vos cibles est un critère déterminant si vous souhaitez que vos données soient utilisées par des chercheurs. Sauf bien sûr si vous êtes chercheur, et que vous cherchez à répondre à une question précise sur un sujet bien défini. Mais cette situation sort également du cadre de ce document.

### **L'utilisation de filtres pour la photométrie**

Avant de continuer, il vous sera utile de vous référer aux Annexes A et B. Ces dernières traitent des aspects physiques de la lumière et de la manière dont les étoiles rayonnent. En résumé, il est possible d'obtenir bien plus d'informations que la simple quantité de lumière reçue par le télescope à un moment donné. On peut en apprendre beaucoup plus si on décide d'utiliser des filtres standards. Les filtres photométriques laissent passer des longueurs d'onde bien définies, et ont des propriétés de transmission précises. Ils ont été conçus pour se rapprocher le plus possible des systèmes standards, comme celui de Johnson-Cousins ou de Sloan. Lorsque vous mesurez la luminosité d'une étoile à travers l'un de ces filtres, vous mesurez en fait une sous-partie de la lumière reçue : celle dont la longueur d'onde correspond à la bande spectrale définie par ce filtre.

L'utilisation de filtres peut fournir des informations astrophysiques très utiles. Les étoiles ayant des propriétés physiques différentes (comme la température ou la composition chimique) auront des spectres caractéristiques à travers chacun de ces systèmes de filtres. Par exemple, une étoile de type spectral « A » aura un spectre qui, vu au travers d'un filtre calibré Johnson B ou V, donnera une différence de magnitudes calibrées proche de 0. Dit autrement, l'indice (B-V) d'une étoile A est proche de 0. Ce résultat est une convention, décidée lors de la création du système Johnson. L'indice (B-V) d'une étoile de type G, plus froide qu'une étoile de type A, tournera autour de + 0,7 : la magnitude de cette étoile, obtenue pour la bande calibrée B, sera plus faible de 0,7 magnitude que celle obtenue pour la bande V. Les types spectraux des étoiles sont déterminés en grande partie par leur température, qui influent quant à elles sur la manière dont leur spectre apparaît. Si vous réalisez une série de mesures photométriques avec des filtres calibrés pour une étoile donnée, vous pouvez alors comparer ces résultats avec ceux de spectres connus et déterminer approximativement son type spectral. Il est difficile d'obtenir le type spectral précis, mais ces mesures peuvent apporter de toute manière des informations utiles à propos des propriétés des étoiles. Le diagramme couleur-magnitude en est un exemple, mais nous ne le détaillerons pas ici. En résumé, les magnitudes et les couleurs des étoiles forment des groupes de points situés dans des zones bien définies du diagramme, et ces zones correspondent à différentes étapes d'évolution, comme la séquence principale et la phase de géante rouge.

Cela devient encore plus intéressant pour les étoiles variables, car leurs couleurs peuvent changer pendant leur variation de luminosité. N'oubliez pas que la couleur d'une étoile peut correspondre en partie à sa température. Nous savons aussi que la température de certaines étoiles peut changer au cours de ces variations. Une étoile pulsante comme une céphéide ou une RR-Lyrae peut varier de plus de 1000 degrés Kelvin pendant un cycle de pulsation. Ce changement de température accompagne un changement substantiel de couleur, impactant notamment l'indice (B-V). Ainsi, l'utilisation de filtres calibrés vous permettra d'observer différentes choses avec une mesure photométrique de céphéide. D'abord, vous remarquerez que la courbe de lumière dans la bande V aura une amplitude différente que dans la bande B (et peut également présenter une forme et une phase un peu différentes). Ensuite, du fait de la différence entre la bande V et la bande B, vous obtiendrez aussi une courbe de couleur variable (graphique de l'indice B-V en fonction du temps). Ceci est très utile pour les céphéides, car c'est un bon moyen de mettre en évidence les moments pendant lesquelles l'étoile est la plus chaude. Vous trouverez des exemples similaires pour d'autres classes de variables, comme les novæ naines : leur disque d'accrétion passe par un état chaud et brillant qui occulte temporairement la lumière émise par leur étoile compagne, plus froide et plus rouge. La poussière émet dans des longueurs d'onde plus proches du bleu en dehors de la ligne de vue. Ainsi, l'étoile sous-jacente apparaît plus rouge qu'elle ne le serait autrement. La présence de poussières est l'une des raisons pour laquelle certaines variables à période longue et les étoiles de type R Coronae Borealis apparaissent très rouges.

Vous vous demandez donc certainement en quoi cela peut être utile à la photométrie d'étoiles variables... Notez que nous avons utilisé le mot « calibré » de nombreuses fois dans les paragraphes précédents. Quand les standards en terme de spectres ont été créés, ils ont été établis avec des filtres très bien définis, et du matériel dont les propriétés ont été mesurées et comprises. Ils ont aussi été fixés de manière à ce que l'extinction due à l'atmosphère soit calibrée et retirée des mesures. Vos filtres, votre matériel, et vos conditions d'observation ne seront presque jamais identiques à celles des observateurs qui ont créé ces standards de spectre, reflétant les différentes propriétés des étoiles. Ainsi, si vous obtenez une magnitude V et une magnitude B pour une étoile sans calibrer vos filtres et votre matériel, ou sans déterminer l'extinction due à l'atmosphère, elles seront différentes de celle des standards connus. Vous pourriez mesurer un indice de couleur (B-V) pour une étoile de type G décrite plus haut, et trouver + 0,8 au lieu de + 0,7 ; ou pour une étoile de type A, + 0,05 au lieu de 0,0. C'est la raison pour laquelle vous devez déterminer vos coefficients de transformation en utilisant des standards bien définis : il s'agit de déterminer les corrections que vous avez besoin d'appliquer à vos données afin que vos mesures se basent sur le même système que ceux des standards reconnus. Ainsi, vos magnitudes peuvent être facilement comparées à celles des autres observateurs. Cela ne veut pas dire que vos magnitudes personnelles sont « fausses ». Elles sont juste différentes. Le problème se pose de la manière suivante : comment exploiter des données provenant de nombreux observateurs différents. Vos données seront beaucoup plus utiles si vous minimisez les différences entre vos magnitudes et les magnitudes standards. C'est pour cela que nous passons autant de temps à demander aux gens d'appliquer ces transformations à leurs données.

### **Considérations sur la précision temporelle : période de variabilité, durée d'exposition et échantillonnage**

Si vous avez déjà une petite expérience dans l'observation d'étoiles variables, vous savez probablement déjà que les étoiles varient de manières différentes. Certaines étoiles peuvent varier sur une période de quelques secondes ou quelques minutes (certaines variables cataclysmiques, par exemple), alors que d'autres peuvent le faire sur des semaines, des mois ou des années. Certaines étoiles peuvent même montrer ces deux types de variabilité à la fois. C'est quelque chose dont vous devez vous souvenir lorsque vous décidez d'observer une étoile donnée. Si vous avez de nombreux types d'étoiles variables dans votre programme d'observation, vous ne pourrez certainement pas utiliser la même méthode pour chaque étoile. Trois principes sont à appliquer :

1. Vous devez être capable d'obtenir un bon rapport signal sur bruit avec une durée d'exposition inférieure à la durée de la variation.
2. Vous devrez effectuer une moyenne des mesures réalisées sur des étoiles brillantes, pour lesquelles la durée d'intégration est très courte (dix secondes ou moins) afin de parer au phénomène de scintillation.
3. Il faut éviter d'observer trop souvent une étoile dont la période de variabilité est très longue, et s'attacher à observer assez souvent une étoile dont la période de variabilité est très

courte. Le point 1 s'applique aux étoiles dont la variabilité est très rapide et dont l'amplitude de variation est faible. Un exemple classique est la courbe de lumière orbitale ou le sursaut d'une étoile variable cataclysmique à période courte. Certaines ont des périodes orbitales de moins de 90 minutes, dont l'amplitude est aussi très faible. Il faut alors trouver un compromis entre le rapport signal sur bruit et l'échantillonnage des variations rapides.

Le point 2 est un problème que rencontrent les observateurs travaillant sur des cibles lumineuses, plus brillantes que la magnitude 7 ou 8, avec un système SCT + CCD. La scintillation est un changement rapide d'intensité de la lumière de l'étoile, causée par les inhomogénéités de l'atmosphère terrestre. On ne peut pas l'éviter. On ne peut que moyenniser ses effets. Les remous de l'atmosphère responsables de la scintillation ont des amplitudes très variées, et ont un effet maximal (a) avec des petites ouvertures et (b) des durées de pose courtes. Vous ne pouvez, bien sûr, pas augmenter la taille de votre tube à volonté. Du coup, la seule méthode correctrice possible est de faire de multiples mesures et d'en réaliser une moyenne. Il est probable que vous obtiendrez un écart-type de l'ordre de quelques centièmes de magnitude lorsque vos durées d'exposition sont de moins de 10 secondes. Si les étoiles que vous observez varient sur des périodes bien plus longues que votre durée d'exposition (Miras et autres géantes par exemple), vous devrez absolument prendre plusieurs poses, mesurer les magnitudes, et moyenniser ces magnitudes avant de soumettre vos résultats. Envoyer la magnitude de chaque pose n'a aucun intérêt scientifique.

Cela nous amène au point 3 concernant l'optimisation de la fréquence des poses. L'ordre de grandeur de la variabilité des étoiles dépend de sa classe, et peut aller de quelques millisecondes à plusieurs millénaires. Vos observations doivent être adaptées au type de variabilité que vous cherchez à mettre en évidence. Vous devez aussi savoir que certaines variabilités peuvent se trouver hors de portée de votre instrument.

Par exemple, prenons le cas d'une étoile variant lentement et émettant beaucoup de photons, comme les Miras brillantes présentes dans le programme AAVSO. La plupart des Miras les plus suivies dans les archives de l'AAVSO sont mesurables facilement à l'aide d'une CCD (avec filtres), sur à peu près la totalité de leur variation. Il y a des centaines de Miras qui voient leur luminosité dépasser la plupart du temps  $V = 14 - 15$ . La question à se poser est : à quelle fréquence les observer ? Le conseil donné aux observateurs en visuel (pas plus qu'une fois toutes les 1 à 2 semaines) vaut aussi pour les observateurs munis d'une CCD. Une réponse plus sophistiquée est de prendre quelques séries de mesures (3 ou 4 poses pour chacun des filtres) une seule nuit, puis de moyenniser l'ensemble pour chacun des filtres. Vous soumettez alors les moyennes plutôt que les magnitudes individuelles, et vous les soumettez en tant que groupe de magnitudes, afin que le chercheur puissent exploiter l'ensemble des couleurs. La fréquence de cette manipulation dépend de l'étoile, mais en général, pour les étoiles périodiques, il est bien d'obtenir 20 à 50 mesures étalées de façon homogène sur la période de variation de l'étoile. Si la période est de 500 jours, une nuit tous les 10 jours suffit. Si la période est de 100 jours, il faudra alors faire la mesure un jour sur deux.

Certains observateurs n'appliquent pas cette méthode. Il y a certains exemples dans la base de données internationale de l'AAVSO pour lesquels des séries de données intensives d'une Mira ont été réalisées comme si c'était une variable rapide. Ces données ne sont pas techniquement fausses, mais l'effort requis pour les obtenir n'en vaut pas la chandelle. Pour la plupart, elles ne sont même pas utiles aux chercheurs (sous cette forme). [La seule utilité dans la réalisation de telles mesures est la recherche de variations rapides, inhabituelles sur ce type d'étoiles, que pourrait causer l'accrétion de matière avec une éventuelle étoile compagnon.] De manière générale, un observateur peut contribuer plus efficacement en effectuant une petite série de mesures sur une étoile, puis en faisant de même sur d'autres étoiles. Il y a beaucoup d'étoiles variables ayant besoin de mesures, et un observateur consciencieux, équipé d'une caméra CCD, peut potentiellement apporter une série de données très utiles à propos de beaucoup d'étoiles.

Parfois, vous pouvez voir le cas opposé : vous avez un objet de faible luminosité qui varie rapidement, et vous manquez de photons (à moins d'avoir un énorme télescope). Par exemple, voici une nuit d'observations du polar à éclipse CSS 08131:071126+440405, réalisées par Arto Oksanen :

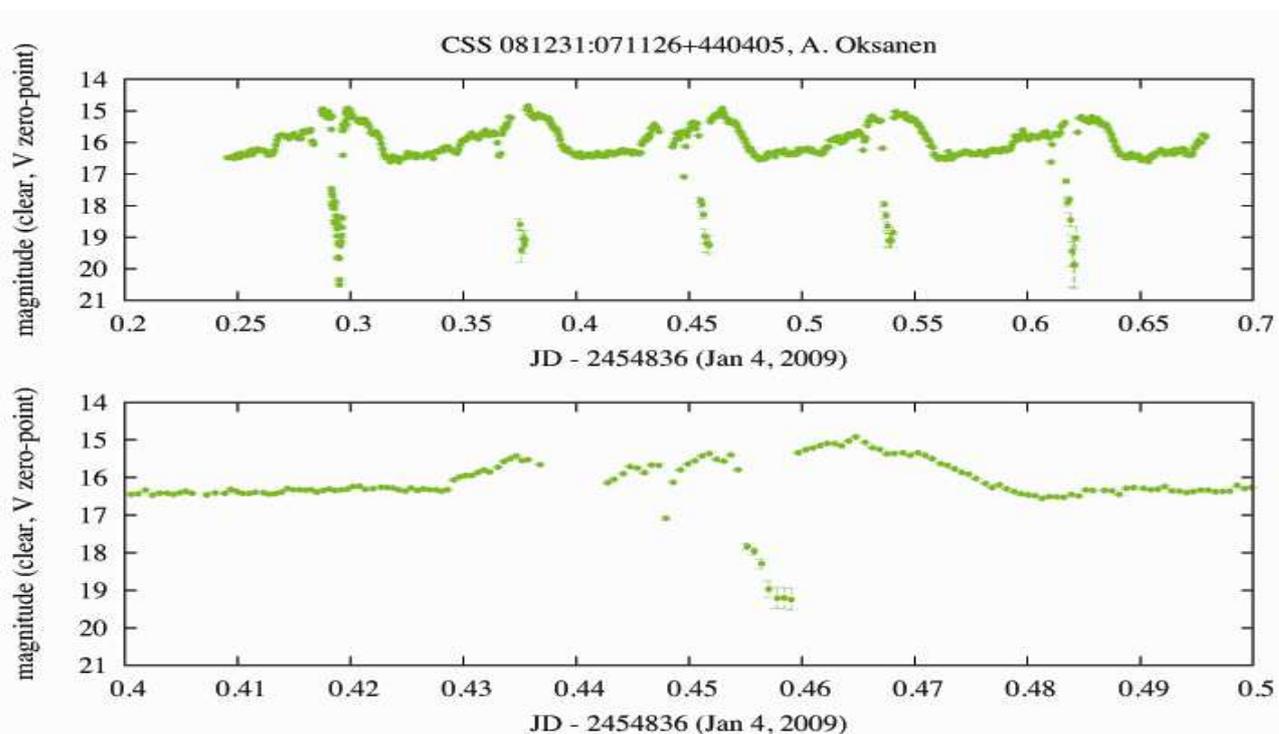


Figure 7.1 – Série de données non filtrées d'une étoile variable cataclysmique de type AM Herculis à éclipse. Notez que les barres d'incertitude sont très petites, et notez aussi le nombre d'observations. La fréquence des poses est approximativement d'une par minute, temps de lecture compris.

Ces données ont été capturées à l'aide d'un filtre clair (clear) et d'un télescope de 400mm de diamètre (16 pouces). Lorsque la magnitude de l'étoile est entre 15 et 17, l'incertitude est aux alentours de 0,015 à 0,02 magnitudes, ce qui est négligeable par rapport à l'amplitude globale. La période orbitale de l'étoile est d'un peu plus de 117 minutes. Ainsi, la fréquence des poses permet d'avoir une bonne couverture du cycle orbital. La plupart des variations

orbitales de cette étoile sont très bien mesurées, et la courbe de lumière globale a une belle allure.

Là où cela devient problématique, c'est lorsqu'il y a une éclipse profonde et extrêmement courte, et que l'étoile descend en dessous de la magnitude 20. Tout d'abord, l'entrée dans l'éclipse est abrupte (quelques secondes seulement). Il n'est donc pas possible de résoudre cet événement avec un échantillonnage d'une pose par minute. Ensuite, l'éclipse est très marquée (plus de 3 magnitudes). S'ajoute alors un problème de faible rapport signal sur bruit. Les incertitudes lors de l'éclipse sont proches de 0,3 magnitude, soit environ 10 fois plus grandes que précédemment.

Dans ce cas, vous ne pouvez pas faire grand-chose pour améliorer la résolution temporelle ou le rapport signal sur bruit pendant l'éclipse : vous êtes limités par le diamètre de votre télescope et par la quantité de photons détectables. Et il n'y a aucune raison pour raccourcir ou allonger le temps de pose. Raccourcir le temps de pose pour améliorer la résolution temporelle rendrait la photométrie trop bruitée pour être exploitable. Tandis qu'allonger le temps de pose estomperait tout simplement la trace de l'éclipse, ne laissant plus que quelques points de données pendant ces événements. Ceci est un cas extrême, mais le nombre d'étoiles faiblement lumineuses intéressantes, comme celle-ci ne va cesser de croître avec les campagnes d'observation de grande envergure comme LSST. En résumé, gardez à l'esprit que ce type de variabilité existe, et prévoyez à l'avance quelle fréquence et quelle durée de pose vous devez choisir.

Vous me ferez alors remarquer que dans cet exemple, aucun filtre n'a été utilisé. Il faut savoir que le fait d'utiliser un filtre a aussi un impact sur la durée d'exposition. En effet, tous les filtres réduisent le signal total reçu. Ils ont ainsi une influence sur la durée d'exposition et le rapport signal sur bruit. Certains filtres peuvent tellement réduire le signal qu'ils rendent les mesures impossibles avec votre instrument. Il y a deux principes à retenir :

1) Si la cible est brillante et que vous pouvez obtenir un bon rapport signal sur bruit avec un temps d'exposition adéquat, vous devez toujours utiliser des filtres (le niveau de qualité du rapport signal sur bruit à atteindre sera défini par les objectifs de votre projet, mais  $> 20$  est une valeur raisonnable).

2) Si la cible a une couleur très rouge, vous devez utiliser des filtres, à moins qu'il y ait une autre bonne raison de ne pas utiliser de filtres (par exemple la recherche de transit et de rayonnement rémanent de sursauts gamma). Si vous ne pouvez pas utiliser de filtre pour une cible rouge, il vaut mieux changer de cible.

Dans le cas décrit ici, l'objet devient très peu brillant (avec des éclipses en dessous de la magnitude 20). La cible est donc très avare en photons. Les variations sont aussi relativement rapides, donc vous voulez garder le temps d'exposition aussi court que possible. Mais la raison principale pour laquelle vous pouvez vous abstenir d'utiliser un filtre est que l'étoile est très bleue, comme la plupart des variables cataclysmiques. Si vous deviez réaliser le spectre de cette étoile, vous vous apercevriez qu'il est relativement plat, et ne présente pas

trop de variations en fonction de la longueur d'onde. Dans ce cas, les variations en large bande sont quasiment équivalentes aux variations mesurées au travers de filtres. Des observations non filtrées sont un bon compromis, qui permettent d'obtenir un meilleur rapport signal sur bruit et/ou des temps d'exposition plus courts, au détriment de l'information spectrale qui, ici, est bien moins importante.

### **Exceptions**

Toute règle a des exceptions, et les conseils donnés plus haut dans le choix de la fréquence et de la durée des expositions n'y échappent pas. La chose la plus importante à retenir de la discussion précédente est que votre temps d'exposition doit être suffisant pour détecter le comportement que vous cherchez à mettre en évidence. Votre fréquence d'observation doit aussi correspondre à l'échelle de temps que vous souhaitez couvrir. Il peut y avoir des projets de recherche qui ont des objectifs différents de ceux habituellement choisis pour une classe d'étoiles variables donnée. Un exemple pourrait être la découverte de transits de planètes extrasolaires, autour de géantes de type M ou K. Vous devriez normalement observer de telles étoiles une fois tous les quelques jours. Mais un transit s'étale sur plusieurs minutes voire plusieurs heures. Vous devez donc plutôt réaliser des poses très rapprochées. De manière générale, de tels cas sont rares, et se produisent habituellement lorsqu'une étoile est déjà connue pour sa spécificité (par exemple une variable Mira dans un système symbiotique). Vous pouvez bien sûr réaliser des captures avec une grande fréquence pour rechercher de tels phénomènes, mais souvenez-vous que de telles données seront rarement utilisables sous cette forme. Vous devez traiter ces données de votre côté, puis les moyenniser avant de les soumettre aux archives de l'AAVSO, plutôt que d'envoyer les mesures individuelles.

Une précaution supplémentaire pour les étoiles Mira : ne faites pas d'observations non filtrées des Miras, semi-régulières, ou d'autres variables rouges de manière générale. Les observations non filtrées ne conviennent vraiment qu'aux étoiles « bleues » (avec un indice B-V autour de 0.0). Pour les variables rouges, votre CCD est certainement sensible dans l'infra-rouge proche, et les étoiles rouges apparaîtront bien plus brillantes que prévu. Vous trouverez sûrement des exemples de personnes soumettant des magnitudes « CV » pour une étoile Mira ou une étoile semi-régulière avec des magnitudes 2 ou 3 fois plus brillantes qu'à la fois les données visuelles et les données CCD filtrées. De telles observations sont très mauvaises, car la bande « CV » est assez ambiguë pour les chercheurs. Vous pourriez être tenté d'observer des étoiles Mira très peu brillantes sans filtre de façon à couvrir leur minimum, mais les propriétés spectrales de telles mesures sont si peu contraintes qu'elles ne fourniront que très peu d'informations utiles aux chercheurs. Elles pourraient même apporter plus de confusion qu'autre chose. Si vous ne possédez pas de filtres pour votre caméra CCD, vous devriez éviter à peu près tout les types de variables rouges, et restreindre votre travail à l'étude des variables cataclysmiques. Ici encore, peuvent être considérés comme des exceptions les transits très peu brillants et les sursauts gamma.