

FRANÇOIS TEYSSIER

[www.astronomie-amateur.fr](http://www.astronomie-amateur.fr)  
Membre AFOEV\*, AAVSO\*, ARAS\*

# NOVAE & SPECTROSCOPIE

***Depuis toujours, l'apparition d'« étoiles nouvelles » parfois très brillantes, appelées novæ, est un sujet de fascination. Aujourd'hui, les novæ sont détectées par un suivi systématique du ciel en photométrie. De nombreuses découvertes ont été l'œuvre d'astronomes amateurs (en visuel, photographie et maintenant CCD).***

Les récents développements de la spectroscopie amateur permettent d'effectuer un suivi régulier de ces objets dans le domaine spectroscopique où leurs variations sont spectaculaires. C'est ainsi que des astronomes amateurs contribuent à la détection et à la compréhension de ces phénomènes extrêmes. (cf. encadré 1) Les spectres présentés dans cet article ont été obtenus par l'auteur à l'aide d'un spectrographe LHIRES (Shelyak Instruments) muni d'un réseau de 150 traits par millimètre. Il a été depuis remplacé par un LISA spécialement conçu pour la spectroscopie amateur d'objets de faible luminosité et permettant d'obtenir une meilleure résolution (réseau de 300 traits/mm).

## Le phénomène « Nova »

Typiquement, le phénomène nova se produit au sein d'un système cataclysmique: une étoile double, très serrée, qui présente des caractéristiques très particulières. L'étoile principale est une naine blanche, son compagnon une étoile de la série principale, généralement rouge. (fig. 1)

La naine blanche est une étoile en fin de vie: une sphère d'environ 10 000 km de diamètre renfermant une masse de matière (carbone, oxygène, hélium) correspondant, en moyenne, à la moitié de celle du Soleil [environ 0,5  $M_{\odot}$ ]. La densité de cette matière est considérable, tout comme la gravité à la surface. Sa température initiale est de l'ordre de 100 000 K. Mais cette matière dégénérée n'est plus capable d'entretenir les réactions thermonucléaires. Le destin d'une naine blanche est de se refroidir lentement. Mais la présence très proche

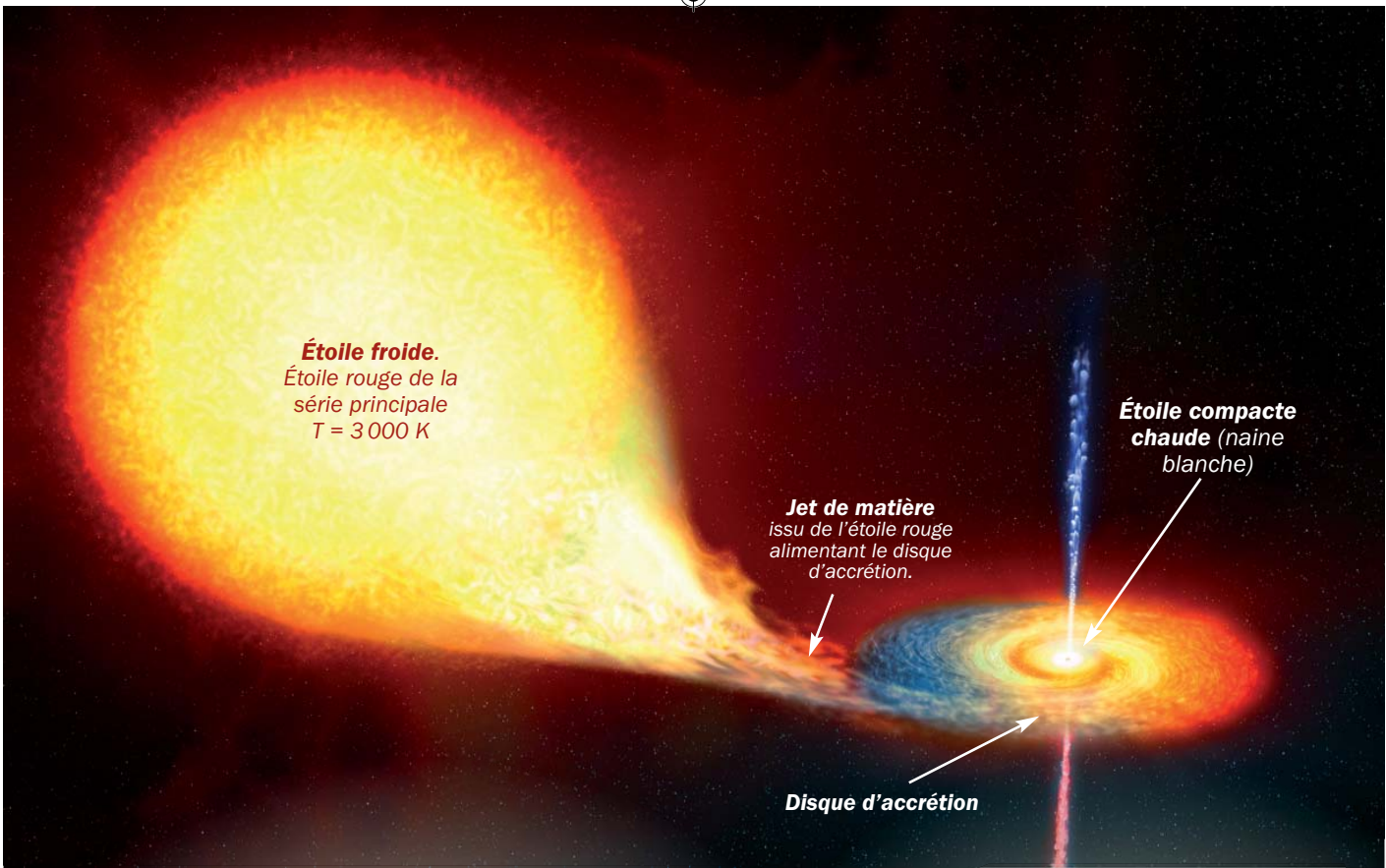
du compagnon rouge va transformer radicalement ce destin.

Les deux étoiles orbitent en quelques heures seulement dans un volume équivalent à celui du Soleil. L'étoile rouge emplit son lobe de Roche et déverse de la matière, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, vers la naine blanche. Dans la plupart des systèmes, cette matière va s'enrouler autour de la naine blanche et former un disque d'accrétion. L'accumulation de matière dans le disque provoque de temps en temps son échauffement: la température du disque augmente brusquement passant de 7 000 à plus de 15 000 K. Le phénomène lumineux brutal et intense qui en résulte est dénommé **outburst**: en quelques heures la luminosité du système augmente de plusieurs magnitudes (de 2 à 5 en général et jusqu'à 8 magnitudes dans certaines étoiles cataclysmiques) puis retourne à son état « calme » en quelques jours, le disque s'étant vidé d'une partie de sa matière. L'intervalle de temps séparant deux outbursts est typiquement de quelques dizaines de jours. Il existe des cas extrêmes allant de quelques jours seulement à plusieurs années. Ce phénomène a conduit à attribuer le nom de « nova naine » à ces systèmes (lents ou rapides?) dont les plus connus sont SS Cygni et U Geminorum.

La matière issue du compagnon rouge est attirée de façon permanente, et accélérée lors des « outbursts », par la naine blanche du fait de la très forte gravité régnant à sa surface. Il se forme ainsi une couche superficielle d'hydrogène et d'hélium à la surface de la naine blanche. Toujours du fait de la forte gravité, la pression à la base de cette

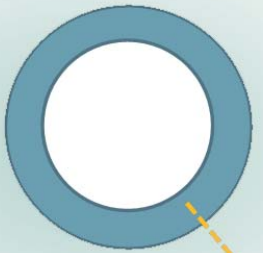
couche est énorme, s'accroissant à mesure de l'accumulation de matière. Il en résulte une température très élevée, augmentant à mesure de l'accrétion de matière. Lorsque la température atteint environ 10 000 000 K, les réactions thermonucléaires débutent: c'est le **phénomène nova**. En quelques dizaines d'heures, la luminosité augmente jusqu'à 1 million de fois pour les novæ les plus violentes (variation de 10 magnitudes en général, pouvant aller jusqu'à 16). Ces réactions se produisant à la surface de l'étoile, une bonne partie de la matière accumulée est éjectée à des vitesses élevées (de quelques centaines à plusieurs milliers de  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ) et forme une enveloppe de matière en expansion. Malgré cette éjection de matière, les réactions thermonucléaires se poursuivent à un rythme plus modéré dans ce qui reste de la couche superficielle et créent ainsi un fort rayonnement UV qui va « éclairer », exciter l'enveloppe de gaz expulsé conduisant à la formation de raies spectroscopiques en émission. On a schématisé ces différentes étapes dans la *figure 2*.

L'explosion ne détruit pas le système. L'accumulation de matière à la surface de la naine blanche se poursuit, préparant ainsi les conditions d'une nouvelle explosion dans un laps de temps estimé généralement à plusieurs milliers d'années. Dans de très rares cas (une dizaine), plusieurs explosions ont été détectées, à quelques années ou dizaines d'années d'écart; ces étoiles perdent le nom de « nova » pour prendre celui de « nova récurrente ». On en connaît seulement une dizaine, par exemple U Sco, ou encore T Pyxidis qui vient de produire un



**Accrétion de matière (H, He)**

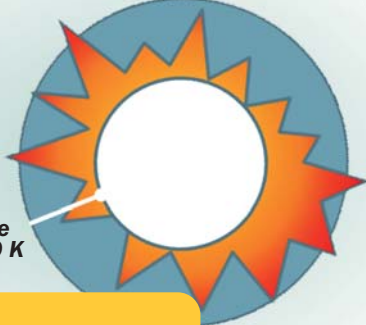
Disque accrétion (cataclysmique) Vent stellaire (symbolitiques)



**Naine blanche O, C (Mg, Ne)**  
enveloppe H, He

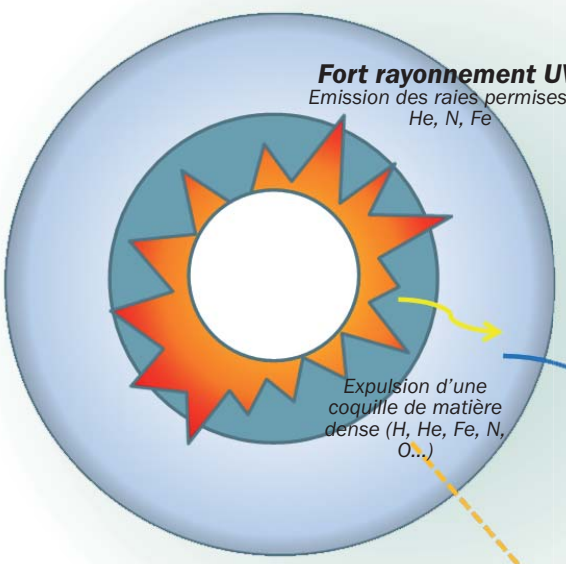
Augmentation progressive de la pression et de la température.

**2a. Accumulation de matière (Hydrogène, Hélium...) à la surface de la naine blanche.**

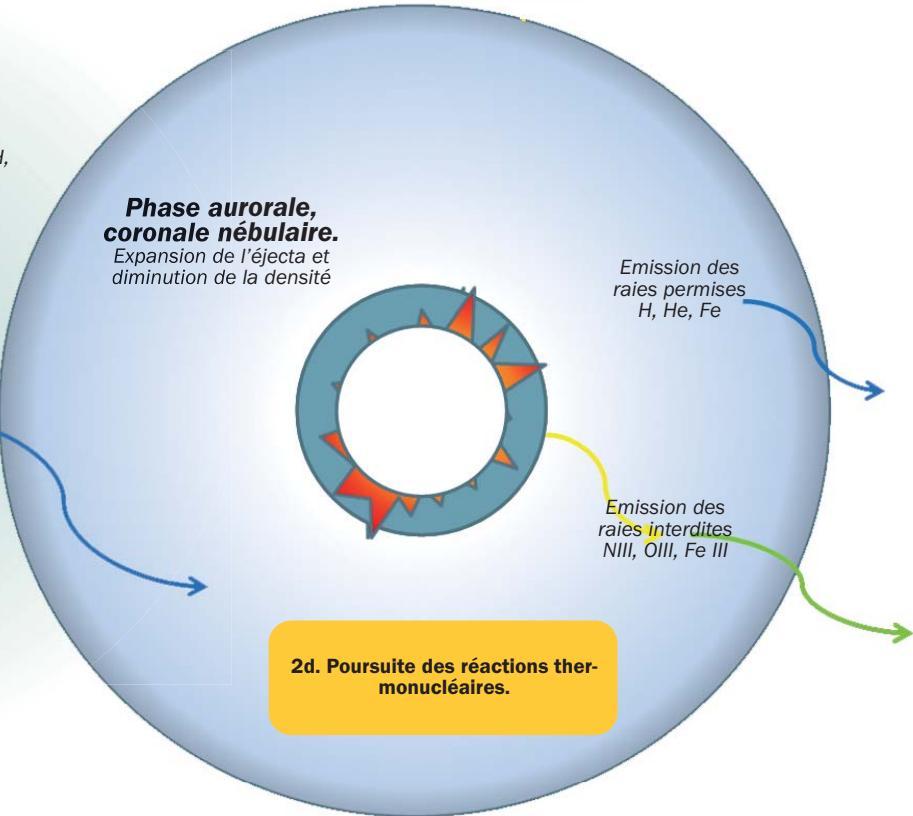


Température  $\sim 10\,000\,000\text{ K}$

**2b. Déclenchement des réactions thermonucléaires.**



**2c. Expulsion d'une partie de l'enveloppe.**

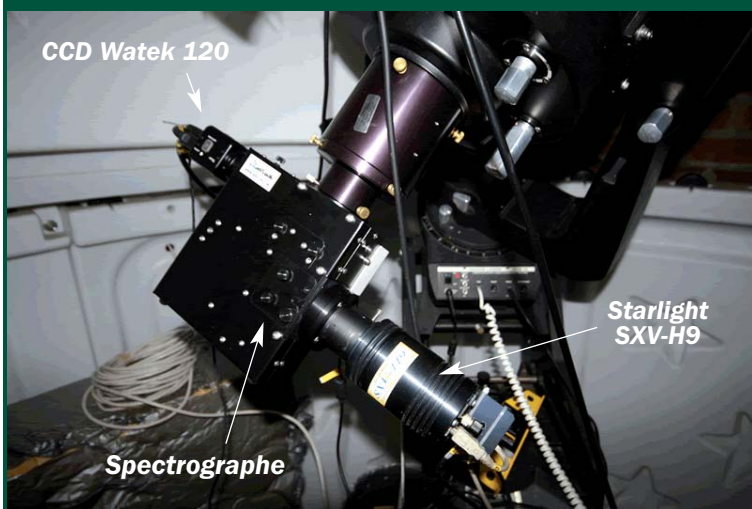


**2d. Poursuite des réactions thermonucléaires.**

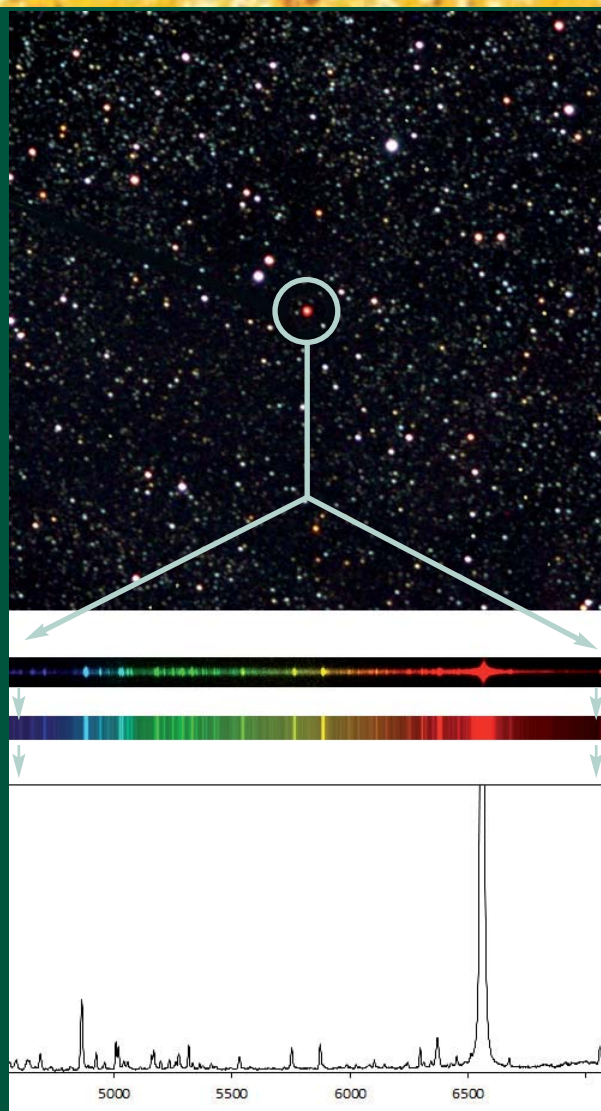
## 1. DE L'ÉTOILE À SON SPECTRE

La nova V407 Cygni photographiée par Christian Buil (10-04-2010) se situe en bordure de la nébuleuse America (NGC 7000). Cette étoile symbiotique\* a produit une explosion de type nova détectée le 10 mars 2010 à la magnitude 6,8 par des amateurs japonais. Elle a fait l'objet d'un intense suivi en spectroscopie amateur jusqu'à une magnitude 14 (V) !

La lumière issue de l'étoile est collectée par un télescope (SC 25 cm) puis elle est dispersée par un spectrographe et enregistrée par une caméra CCD. Le spectre obtenu est dit « 2D ». Il est corrigé de différentes aberrations géométriques; la pollution lumineuse est retranchée. À partir de cette image, un profil « 1D » est calculé après avoir calibré le spectre en longueur d'onde et corrigé différents effets provoqués par la traversée de l'atmosphère, des instruments optiques et la sensibilité de la caméra qui dépend de la longueur d'onde. La dispersion de la lumière nécessite des temps de poses cumulés importants (typiquement une heure dans cette configuration pour des objets de magnitude 10 à 12). Le suivi de cette nova jusqu'à mag. 14 a nécessité des temps de poses cumulés allant jusqu'à 4 heures.



Le spectrographe (ici un LISA Shelyak Instruments) monté sur le télescope (SC 25 cm). La caméra d'autoguidage permet de garder en permanence l'image de l'étoile sur la fente du spectrographe.



Après avoir été dispersée par le réseau situé dans le spectrographe, la lumière forme un spectre enregistré par la caméra d'acquisition (une starlight SXV-H9).

\* Les étoiles symbiotiques sont de systèmes binaires semblables aux étoiles cataclysmiques, à une différence majeure: près: une étoile géante (généralement rouge) remplace l'étoile rouge de la série principale qui compose une cataclysmique. Il en résulte, des périodes orbitales beaucoup longues; plusieurs centaines de jours à plusieurs dizaines d'années. Certaines étoiles symbiotiques ont subi des phénomènes novae semblables à ceux des novae classiques. V407 Cyg fait partie de ce groupe très restreint aux côtés de T CrB, RS Oph et AG Dra.

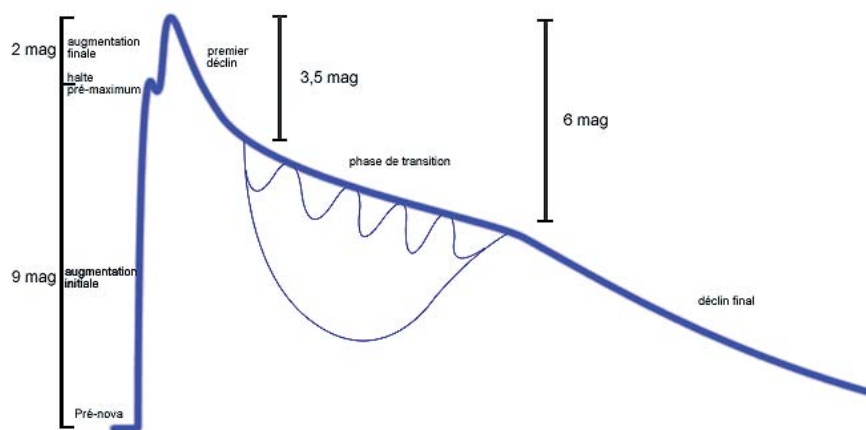
nouveau phénomène nova début 2011.

### Identification d'une nova

#### ● COURBE DE LUMINOSITÉ

Les novæ sont généralement détectées en photométrie. L'allure générale des courbes de luminosité (fig. 3) est semblable pour toutes les novae.

Si la courbe de luminosité a la même allure pour toutes les novae, les échelles de temps et d'intensité varient. Après une montée brutale de la luminosité en quelques heures, le maximum de luminosité est atteint, après un bref palier. La luminosité décline alors d'environ 3 magnitudes dans un « premier déclin » suivi d'une phase de transition. Cette phase de transition peut présenter différents aspects: régulière, oscillations, profond déclin, voire même remontée en luminosité. Elle est suivie du déclin final qui ramène progressive-



3. Courbe de luminosité.

ment et régulièrement la luminosité à son niveau initial pré-nova. Une classification de la rapidité des novæ a été établie par Payne-Gaposchin (1957) en fonction du temps écoulé pour une décroissance de 2 et 3 magnitudes par rapport à la luminosité maximale atteinte. Ces durées sont notées respectivement T2 et T3 et expri-

Classe	T2	T3
Très rapide	< 10 j	< 20 j
Rapide	11 – 25 j	21 – 49 j
Modérément rapide	16 – 80 j	50 – 140 j
Lente	81 -150 j	141 – 264 j
Très lente	> 151 j	> 265 j

mées en jours. 5 classes de rapidité ont été définies (cf. tableau).

#### ● LE SPECTRE CARACTÉRISTIQUE

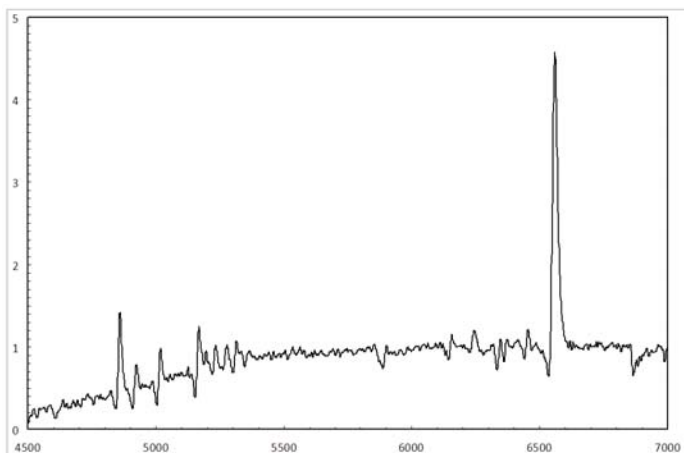
La détection d'une étoile « nouvelle » ou d'un objet dont la luminosité a fortement augmenté n'est toutefois pas suffisante pour caractériser l'observation comme nova. Seul un spectre du nouvel objet permet de l'identifier de façon certaine en fonction de ses caractéristiques, au premier rang desquelles le type et le profil des raies d'émission. Le spectre de la nova 2010 Scuti, V496 Sct, fut le premier spectre (fig. 4) permettant d'affirmer le caractère nova (AAVSO Alert Notice 412, November 10, 2009). Il a été réalisé le 9 novembre 2009 à 17 h 30 TU, avant les premiers spectres professionnels.

#### ● LES DEUX TYPES DE NOVÆ

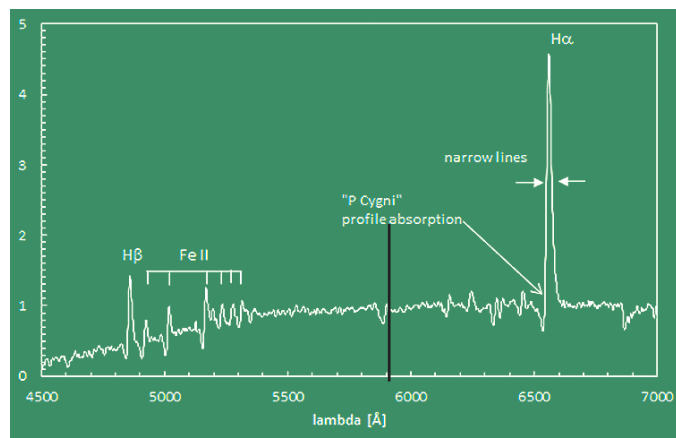
L'aspect du spectre au maximum de luminosité permet de définir deux principaux types de novæ. Les raies de l'hydrogène sont toujours présentes en émission.

**Les novæ FeII**, 60 % des novæ: les principales raies d'émission, en plus des raies de l'hydrogène, sont les multiples raies du fer ionisé une fois (Fe II). (fig. 5). Les raies sont étroites: les vitesses d'expansion inférieures à 2500 km.s<sup>-1</sup>. Ces raies sont fréquemment précédées de profils « P Cygni » en absorption.

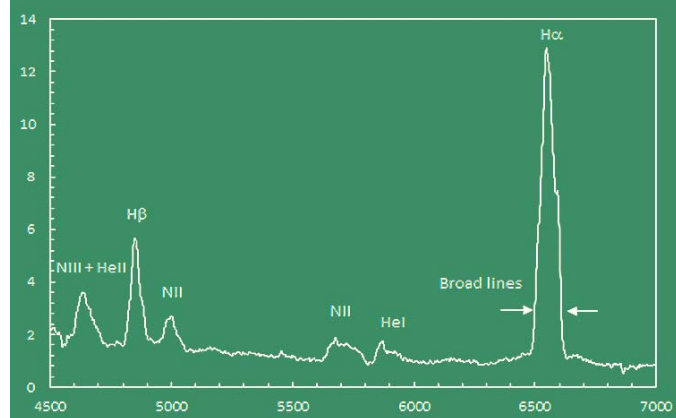
**Les novæ He/N**, 40 % des novæ: les principales raies d'émission (après H $\alpha$ ) sont des raies d'hélium HeII ( $\lambda = 4686 \text{ \AA}$ ), HeI (5876  $\text{\AA}$ ) et d'azote NIII (5679  $\text{\AA}$ ), (5001  $\text{\AA}$ ) ou NIII (4640  $\text{\AA}$ ) (fig. 6). Les raies sont beaucoup larges (vitesses d'expansion supérieures à 2500 km.s<sup>-1</sup>, et atteignant aisément 6000 km.s<sup>-1</sup>) avec un sommet aplati et un profil complexe. Elles correspondent à des systèmes plus énergétiques.



**4. Spectre d'identification de la Nova V496 Scuti réalisé le 9 novembre 2009 à 17 h 30 UT.** Les raies de Balmer et du Fer ionisé une fois (FeII), étroites, en émission, précédé d'un profil P Cygni en absorption sont caractéristiques d'une nova de type Fe II.



**5. Novæ FeII.** Elles sont caractérisées par des raies étroites (<2500 km.s<sup>-1</sup>) et la présence de raies du Fer ionisé une fois (FeII). Exemple: V496 Sct 9 novembre 2009.



**6. Novæ He/N.** Elles sont caractérisées par des raies larges et la présence de raies de l'hydrogène, de l'hélium et de l'azote. Exemple: KT Eri 27 novembre 2009.

La vitesse d'expansion de l'enveloppe nébulaire expulsée lors du phénomène nova peut être déterminée à partir de l'analyse des raies et en utilisant l'effet Doppler (cf. encadré 2).

***Medusa suffragarit utilitas saburre,  
quod oratori amputat bellus fiducias,  
quamquam syrtes corrumpet zothecas,  
ut pretosius agricolae pessimus  
divinus senesceret aegre utilitas qua-  
druppei, et apparatus bellis vocificat  
incredibiliter adlaudabilis oratori, sem-  
per Octavius agnascor fragilis appa-  
ratus bellis. Cathedras vo***

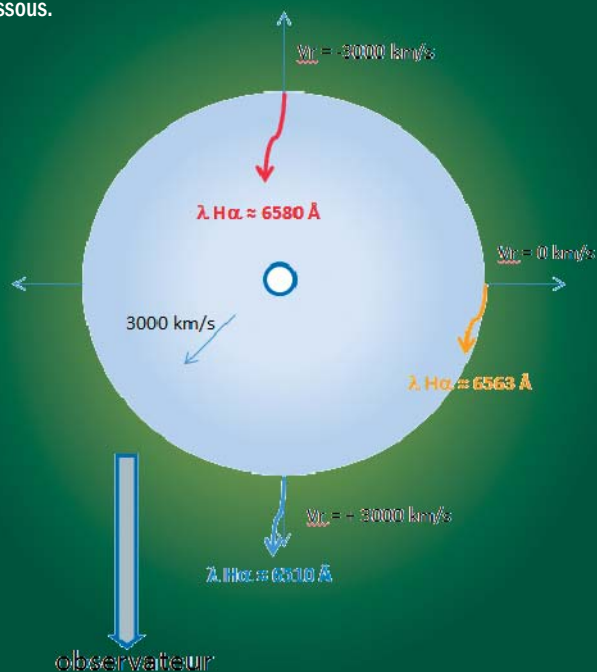
## 2. MESURE DES VITESSES D'EXPANSION À PARTIR DU PROFIL DES RAIES

L'analyse des raies permet de déterminer la vitesse à laquelle l'enveloppe nébulaire est expulsée lors du phénomène.

L'effet Doppler donne accès à cette mesure.

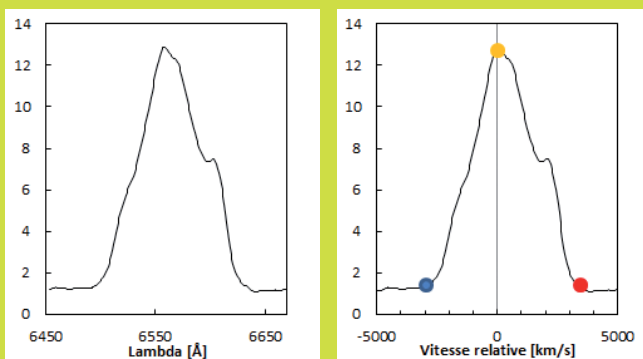
Lorsqu'un atome d'hydrogène a une vitesse nulle par rapport à l'observateur, un photon  $H\alpha$  émis par cet atome aura une longueur d'onde  $\lambda_0 = 6562,8 \text{ \AA}$ . Lorsque le même atome a une vitesse non nulle, positive s'il s'éloigne, négative s'il se rapproche, la longueur d'onde,  $\lambda$ , du même photon apparaîtra plus élevée (plus rouge) ou plus faible (plus bleue). Le décalage de longueur d'onde est donné par la formule :  $v_r = (\Delta\lambda/\lambda) \times c$  avec  $V_r$  vitesse projetée le long de la ligne de visée  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  et  $c$  vitesse de la lumière.

Le rayonnement global de l'étoile mélange celui de régions ayant des vitesses radiales différentes (ici entre + 3000 km/s et - 3000 km/s) la raie spectrale va donc être composée d'éléments de décalages doppler différentes et être ainsi élargi comme le montre la figure ci-dessous.



### Profil de la raie $H\alpha$ Nova KT Eri le 27 11 2009

À droite, l'intensité est représentée non plus en fonction de la longueur d'onde, mais de la vitesse relative par rapport au centre de la raie. L'effet Doppler permet de déterminer la vitesse d'expansion de l'enveloppe : environ 3 200  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ .



## L'évolution spectrale des novae

### • LES DIFFÉRENTES PHASES

De même que la luminosité varie au cours du temps (fig. 3), l'aspect du spectre va évoluer avec le temps. Les deux facteurs principaux caractérisant l'évolution sont la température et la densité de l'enveloppe qui forme une zone nébulaire en expansion autour du système. On distingue plusieurs phases dans l'évolution; elles sont représentées sur la figure 7.

On a pu définir différentes zones correspondant aux phases d'évolution d'une nova: P = raies permises; A = raies aurales; C = raies coronales; N = raies nébulaires.

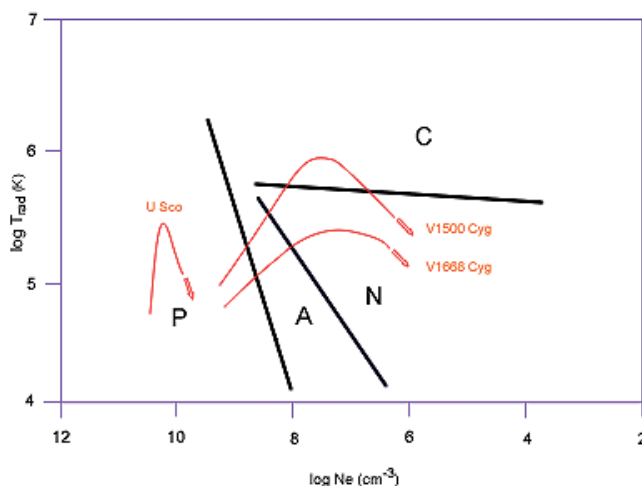
Une nova commence dans la zone de gauche (P). Dans cette phase des **raies « permises »**, les densités de matière de l'enveloppe expulsée sont élevées de telle sorte que seules peuvent se former des raies « normales » d'émission. Ce sont notamment les raies produites par les atomes d'hydrogène, d'hélium, d'azote ou encore de fer ionisé.

Lorsque la densité diminue du fait de l'expansion de l'enveloppe nébulaire, les premières **raies « interdites »** apparaissent. Ces raies ne peuvent apparaître que dans des milieux très dilués, dans un vide si poussé qu'il est inaccessible aux expériences de laboratoire (d'où le nom attribué au début du XXème à ces raies). Elles sont notées [], comme par exemple les fameuses raies [OIII] bien connues dans l'imagerie des nébuleuses. Les premières à apparaître sont les **raies aurales (A)** telle [OIII] ( $\lambda = 4363 \text{ \AA}$ ) et de faible degré d'ionisation: [OIII] ( $4363 \text{ \AA}$ ), [NII] ( $5755 \text{ \AA}$ ), [OI] ( $6300 \text{ \AA}$ ).

Lorsque l'expansion se poursuit et que la densité continue à diminuer en conséquence, deux possibilités apparaissent selon la température: – Les systèmes les plus énergétiques (Novae He/N) peuvent conduire à des températures très élevées autorisant la formation de **raies coronales** de très forte excitation correspondant à des énergies et des degrés d'ionisation très importants, notamment [Fe VII], [Fe X], voire [Fe XIV], c'est-à-dire du fer ayant perdu respectivement 6, 9 ou 13 électrons. Cette phase, atteinte seulement par quelques novæ (environ 15 %), est appelée phase coronale (zone C).

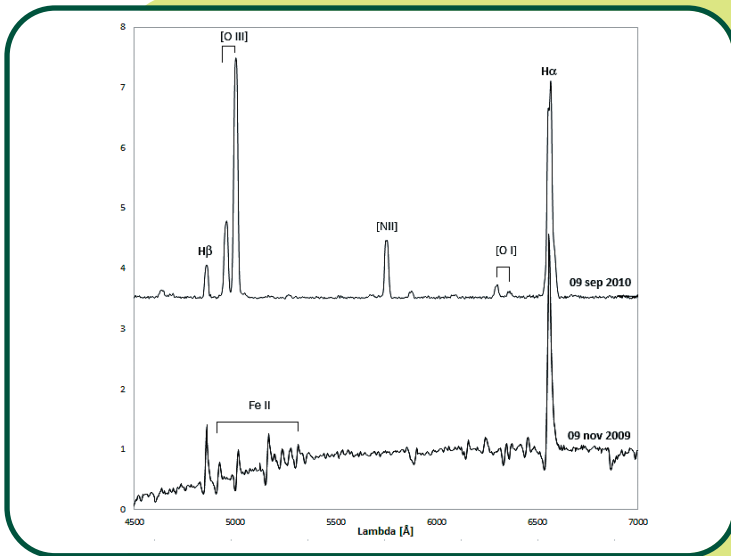
– Si la température est plus faible, la nova passe directement vers la **phase nébulaire (N)**, caractérisée par les raies nébulaires dont les plus connues sont les raies interdites de l'oxygène ionisé deux fois [OIII] ( $4959 \text{ \AA}$  et  $5007 \text{ \AA}$ ); c'est le stade final de la plupart des novæ.

L'évolution d'une nova peut être représentée par sa trajectoire dans ce diagramme (fig. 7). La nova V407Cyg dont il est question plus loin a une trajectoire équivalente à celle de V1688 Cyg. Certaines novæ très rapides telle la nova récurrente U Sco voient leur température diminuer si rapidement qu'elles ne peuvent atteindre les phases des raies interdites.



**7. Graphique représentant l'évolution des novae en fonction de deux paramètres.** Densité de l'enveloppe en expansion en abscisse (évaluée à partir de la densité électronique) et température en ordonnées. L'échelle des abscisses est inversée: la partie gauche du graphe correspond aux densités les plus élevées. Les échelles sont logarithmiques.

## QUELQUES EXEMPLES DE SUIVI SPECTRAL

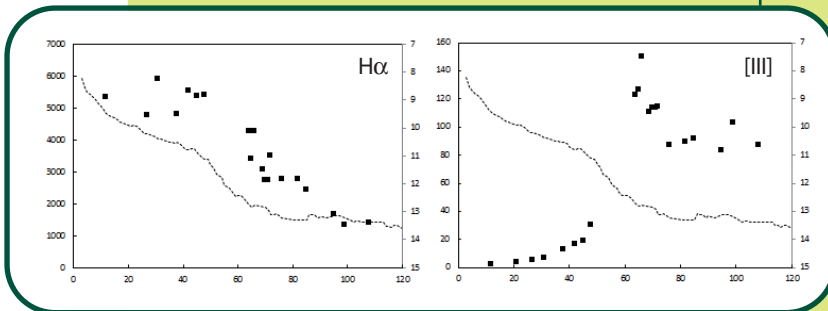


### ● LA NOVA V496 SCUTI

On constate que 9 mois après son maximum de luminosité (9 nov 2009), les raies du Fer ont disparu. La dilution de l'enveloppe éjectée dans le milieu interstellaire permet la formation de spectaculaires raies interdites, notamment celles de l'oxygène deux fois ionisé [OIII]  $\lambda\lambda$ 4959 et 5007, qui dépassent ici en intensité des raies de l'hydrogène. La phase nébulaire est le stade final d'une nova (9 septembre 2010).

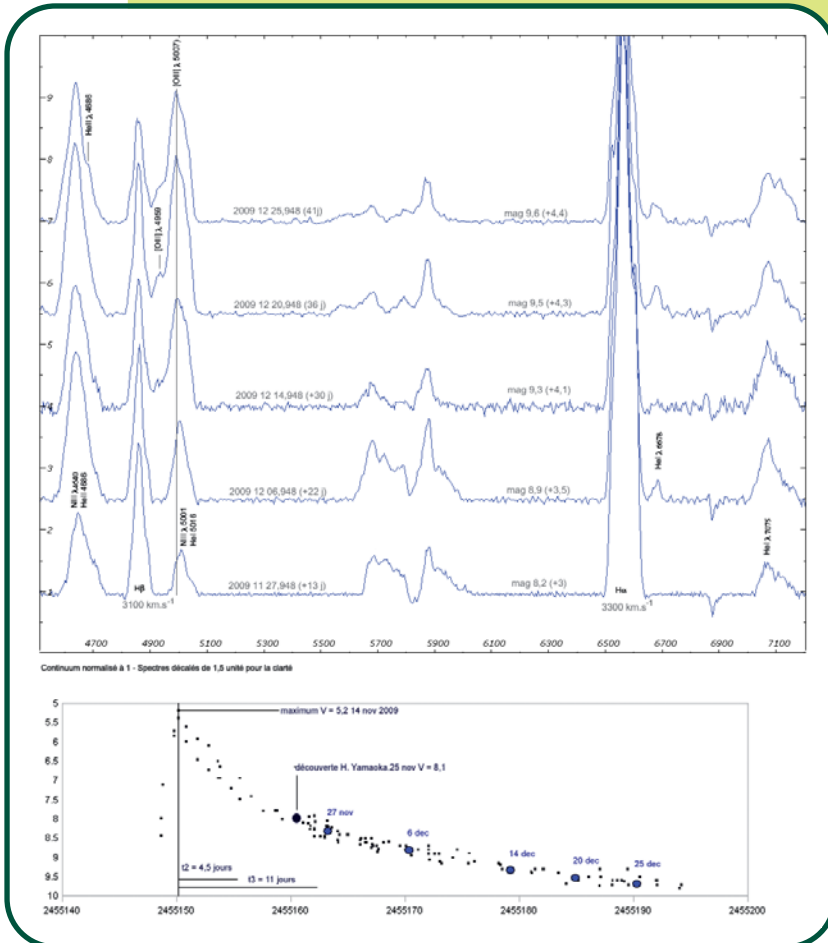
### ● LA NOVA V407 CYGNI

L'évolution du spectre peut être suivie de façon quantitative. La figure 9 montre la variation d'intensité relative des raies H $\alpha$  (à gauche) et [OIII] ( $\lambda = 5007 \text{ \AA}$ ) de la nova V407 Cygni en fonction du temps (nombre de jours depuis le maximum de luminosité). La courbe pointillée (échelle de droite) représente la magnitude de la nova. La croissance brutale de l'intensité [OIII] coïncide avec le début du déclin final (voir courbe de luminosité). Cette augmentation brusque se produit en même temps que le déclin de l'intensité de la raie H $\alpha$ .



### ● LA NOVA KT ERI 2009

Peu de temps après la nova V496 Sct, une autre nova a fait son apparition dans la constellation de l'Eridan. Elle prit la dénomination de KT Eri. Cette nova a été découverte par H. Yamakoa le 25 novembre 2009 à une magnitude de 8,1. L'étude ultérieure d'images archivées permit de montrer que le maximum de luminosité eut lieu 11 jours auparavant, le 14 novembre, à une magnitude de 5,2: cette nova, visible à l'oeil nu pendant 2 à 3 jours a échappé à la vigilance des observateurs. Malgré les surveillances automatisées, il reste de la place pour les observateurs, même munis d'un simple paire de jumelles. Cette nova présente des raies larges d'hydrogène dont la mesure permet de déterminer une vitesse d'expansion de 3200 km/s. Les raies les plus intenses après l'hydrogène sont produites par l'hélium et l'azote. Ces deux caractéristiques permettent de la classer comme nova He/N. On notera l'évolution rapide des raies, en intensité, en profil. Certaines de ces raies sont identifiées. La plupart d'entre elles sont des "blends", résultant de la composition de raies d'espèces différentes qui se chevauchent du fait de leur largeur importante due à la vitesse élevée d'expansion. Pour faciliter la présentation de l'évolution des raies, les spectres ont été divisés par leur propre continuum, qui est de ce fait aplati



## Conclusion: le suivi des novae, un nouveau domaine ouvert aux amateurs

Le champ d'activités des amateurs en spectroscopie ne cesse de s'étendre. Le suivi des novæ en est un des aspects. Chaque nouvel événement est suivi par une équipe d'amateurs de différents pays. Les résultats sont collectés sur le site ARAS - Acces Ring for Amateur Spectroscopy [[www.astrosurf.com/aras/](http://www.astrosurf.com/aras/)]. ARAS permet ainsi de coordonner des campagnes internationales d'observation (symbiotiques, cataclysmiques, novæ...) tout en poursuivant un intense suivi des étoiles Be engagé depuis plusieurs années. Si l'aventure vous tente, n'hésitez pas à nous contacter.

**F. Teyssier ■**