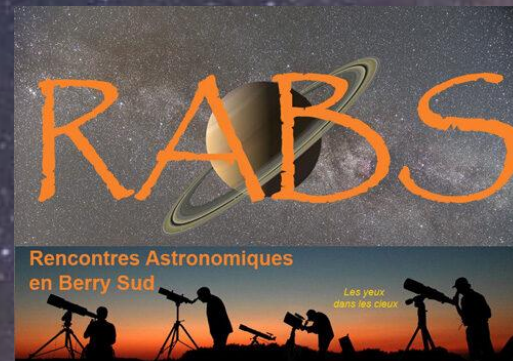




Novae et supernovae

Des étoiles variables particulières

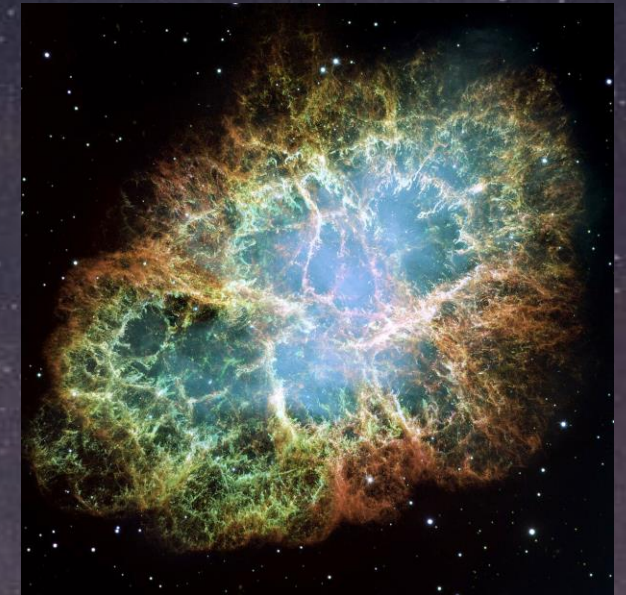
Pierre Jacquet - Laurent Cassignard (A.F.O.E.V)



Rencontres Astronomiques en Berry Sud – RABS – septembre 2025

Propos introductifs

- Des étoiles qui apparaissent dans le ciel
- Les novae et supernovae sont des phénomènes qui ont fasciné les humains depuis les temps anciens.
- On trouve dans les écrits anciens quelques informations concernant des étoiles apparues subitement dans le ciel et qui ont disparu après quelques mois (SN de l'an 185 relatée par les astronomes chinois ; SN 1054 qui a donné la nébuleuse du Crabe, etc.)
- Les anciens ont utilisé le terme latin « **Nova Stella** » (nouvelle étoile) à l'origine du terme « Nova » toujours employé de nos jours



Neb. Crabe

-Crédit photo : [NASA](#), [ESA](#), J. Hester and A. Loll (Arizona State University) HubbleSite: [gallery](#), [release](#)

Propos introductifs

- Les observations se sont poursuivies et précisées avec le développement de l'astronomie, puis de l'astrophysique.
- On a découvert que les novae et supernovae sont des phénomènes cataclysmiques affectant des étoiles en fin de vie, donnant lieu à des explosions d'une violence extrême:
 - Soit dans les couches superficielles de ces étoiles (novae),
 - Soit dans leur couches profondes (supernovae)
- Au cours de cette présentation, nous allons
 - évoquer les mécanismes physiques à l'origine des novae (1) et des supernovae (2)
 - et voir quelle peut être la contribution des amateurs variabilistes (3)



Dentelles du Cygne

I- Les novae – Un système binaire

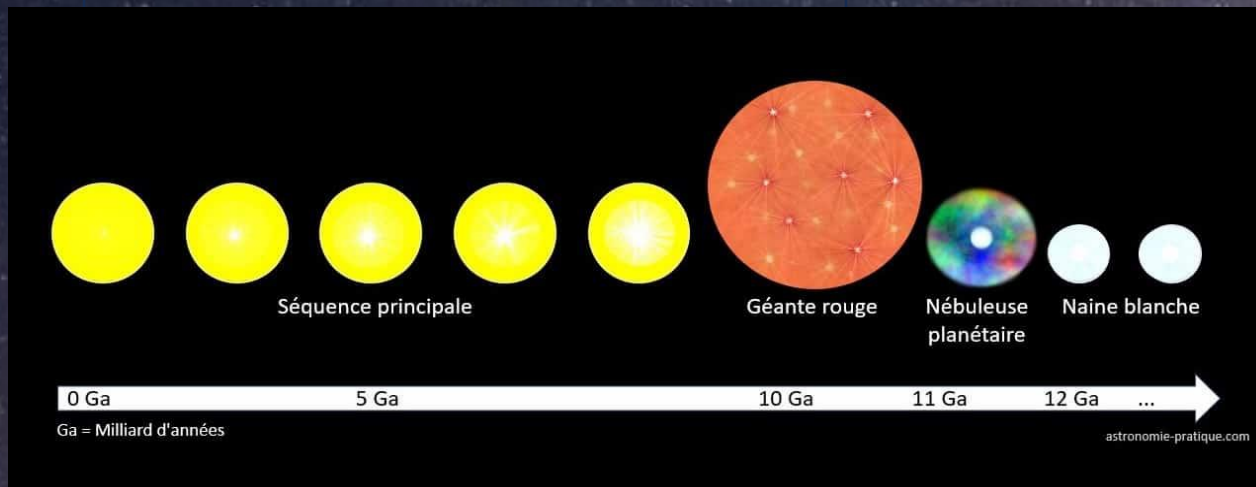
- Les novae ne sont pas une mais **deux étoiles** liées gravitationnellement entre elles :
 - Une **géante rouge** : étoile de 0,6 à 10 M sol qui est sortie de la séquence principale
 - Une **naine blanche** : résidu du cœur d'une étoile de même type à un stade plus avancé, composé essentiellement de carbone et d'oxygène et très massive (0,5 à 1,4 M sol pour la taille de la Terre)



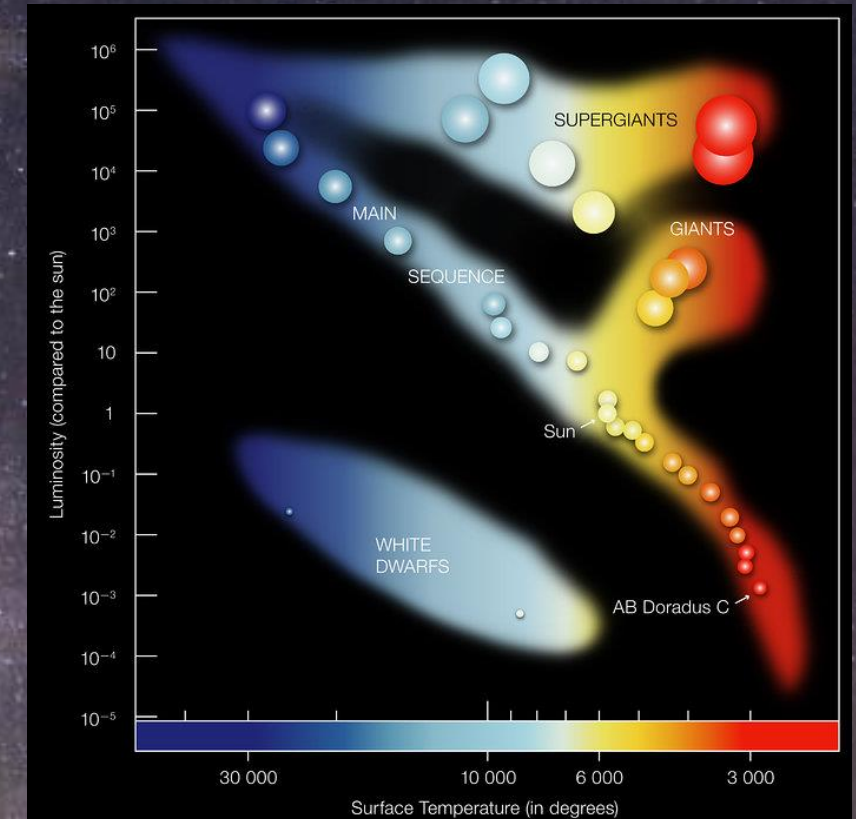
Crédit photo : Observatoire de Paris PSL

1 - Les novae – Un système binaire

➤ Un petit rappel du cycle de vie des étoiles de type solaire



Crédit photo : astronomie-pratique.com



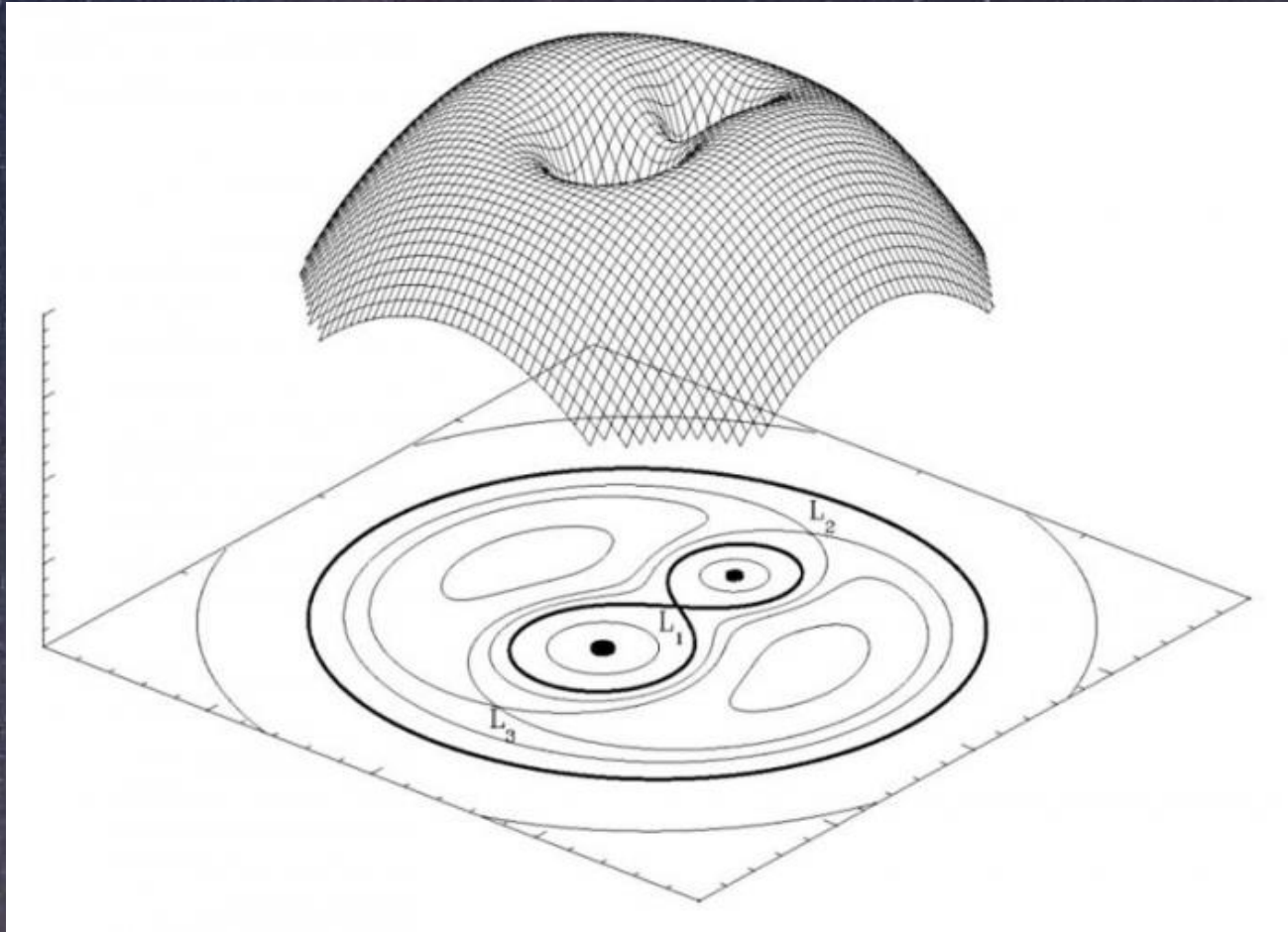
Crédit photo : E.S.O.

1 – Les novae – Un transfert de matière

- Dans ce système binaire, chaque étoile exerce une force gravitationnelle sur n'importe quel corps ayant une masse dans son voisinage mais la naine blanche à cause de sa masse exerce une force gravitationnelle importante sur son environnement.
- Chaque étoile du système, a un **Lobe de Roche** = zone dans laquelle la matière va être attirée vers cette étoile plutôt que vers l'autre.
- Dans un système binaire les deux Lobes de Roche ont une forme de goutte d'eau en raison de la combinaison de la force de gravité des étoiles et de la force centrifuge du système.
- Les deux Lobes de Roche se rencontrent au **point de Lagrange L 1** (schéma à suivre)

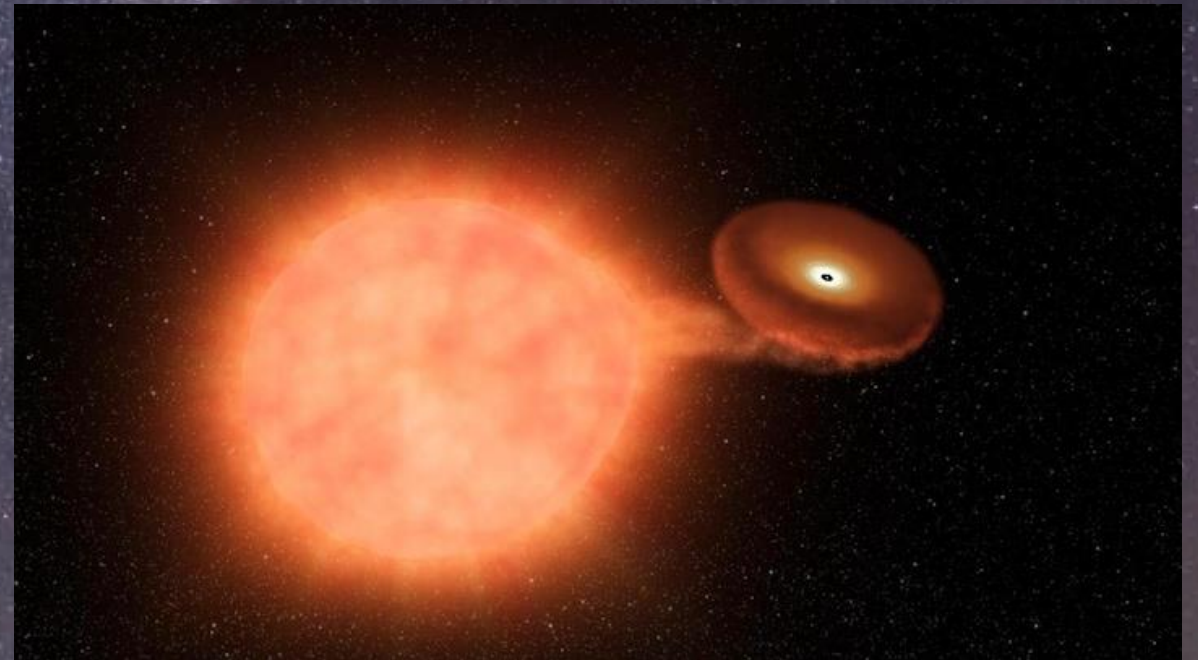
1 – Les novae – Un transfert de matière

Modélisation des Lobes de Roche des
étoiles dans un système binaire



1 - Les novae – Un transfert de matière

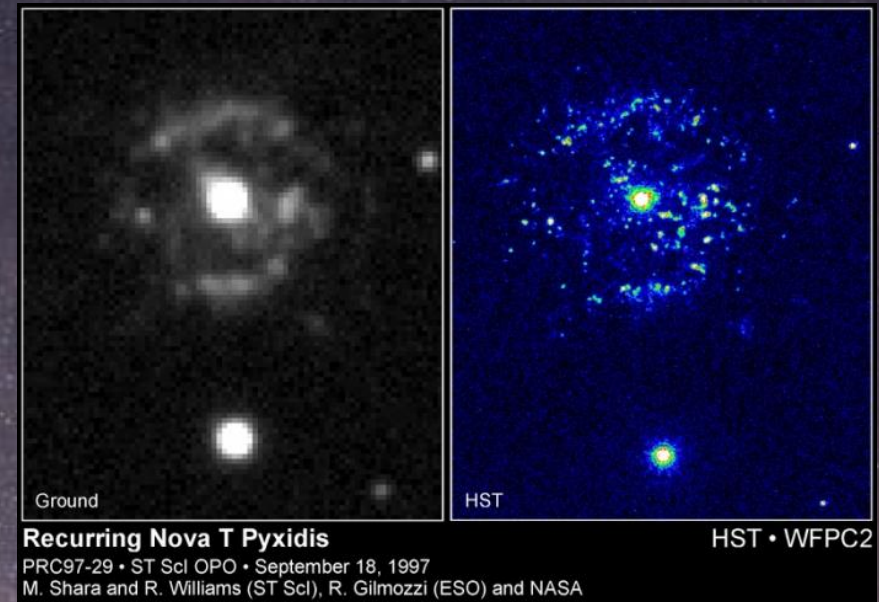
- Lors de la phase d'évolution de la géante rouge, sa matière gazeuse va remplir totalement son Lobe de Roche et un **transfert de matière** à partir de ses couches externes va s'opérer vers la naine blanche au point de Lagrange L 1 (essentiellement hydrogène et un peu d'hélium)
- A partir de cette matière transférée, un **disque d'accrétion** composé d'hydrogène et d'un peu d'hélium va se former autour de la naine blanche



Crédit PHOTO: NASA/JPL-Caltech

1 - Les novae – Une explosion thermonucléaire

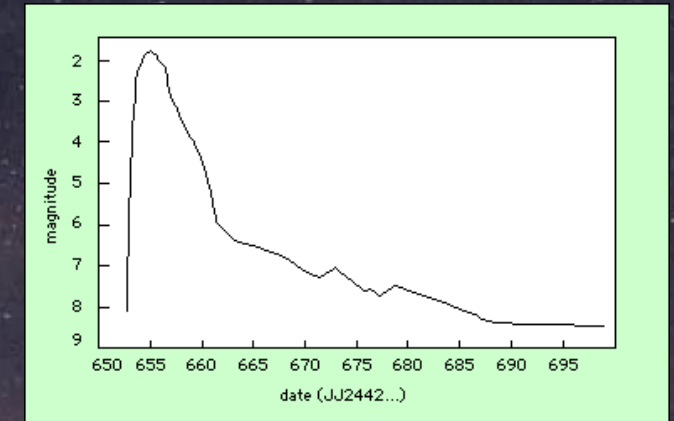
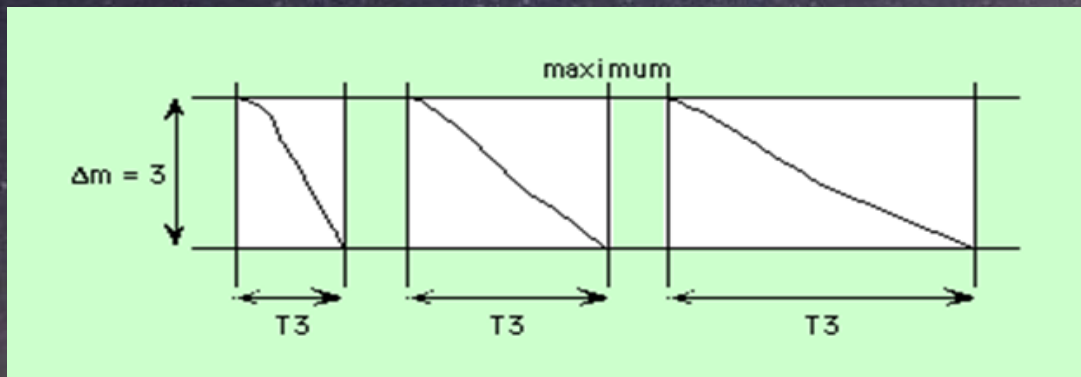
- Forces de friction internes font que la matière gazeuse du disque d'accrétion va tomber sur la naine blanche et être comprimée à sa surface en raison de la très forte gravité.
- Qui dit compression, dit échauffement (de l'ordre de 15 millions de degrés)
- La pression et la température vont devenir suffisantes pour déclencher une explosion thermonucléaire qui va expulser dans l'espace les gaz accumulés à la surface de la naine blanche et produire un éclat très lumineux (+ 7 à 19 magnitudes).
- Les deux étoiles ne sont pas détruites



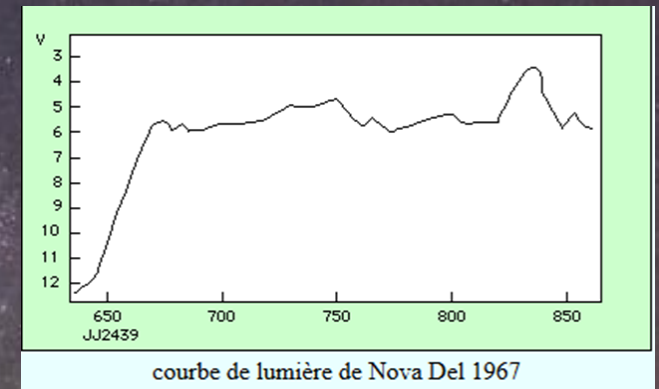
Crédit photo : HubbleSite

1 – Les novae - Ce que les observations ont montré

- A l'aide des courbes de lumière on a pu constater des différences importantes : montée en luminosité et redescente plus ou moins rapide.
- On va mesurer le temps « T » de descente sur une courbe de lumière - T = temps mis par la nova pour perdre 3 mag depuis sont maximum
- Cela permet de distinguer des novæ rapides et lentes



Nova Cyg 1975

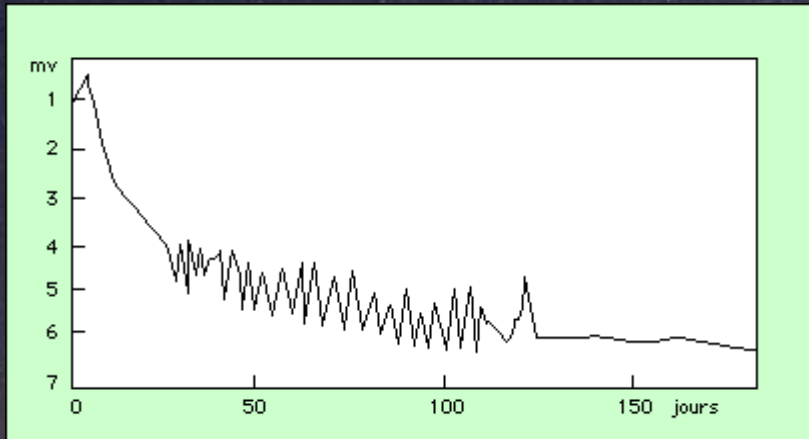


Source : Cours d'Astronomie
Obs de Marseille - LAM)

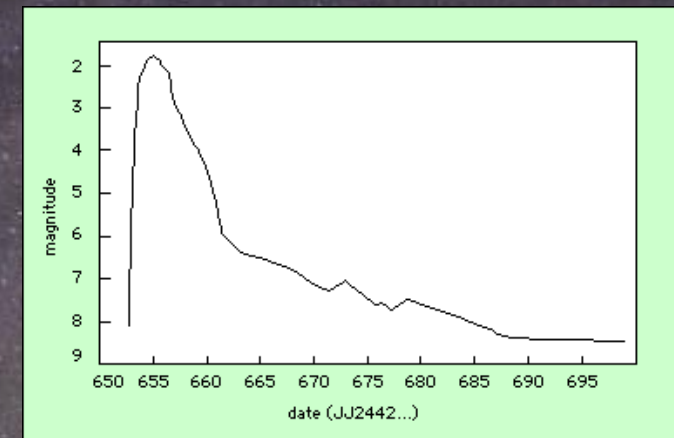
1 – Les novae – Ce que les observations ont montré

➤ Novae rapides :

- Montée en luminosité extrêmement rapide (10 mag en 24h)
- Descente commence immédiatement après le maximum et dure quelques jours à quelques dizaines de jours avec parfois des oscillations jusqu'à 1 mag (expansion rapide = refroidissement = baisse de luminosité)
- Temps T rapide (ex. Nova Cyg 1975 = 5 jours)



Nova GK Per (Nova Per 1901)

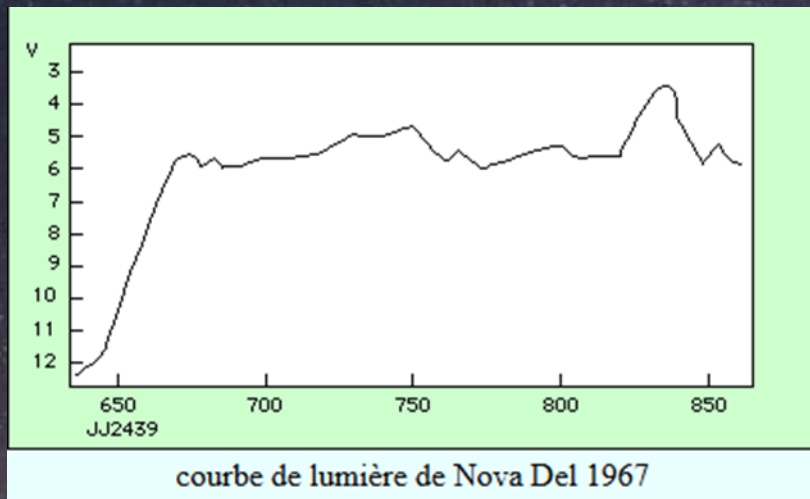


Nova Cyg 1975

1 – Les novae – Ce que les observations ont montré

➤ Novae lentes :

- Montée en luminosité progressive et lente (quelques mois à quelques années)
- On observe un palier assez long avant une descente progressive
- Cela est dû à une accrétion lente de la matière sur la naine blanche qui va déclencher une réaction thermonucléaire moins explosive mais plus durable
- Les courbes de lumière sont variées



Nova Del 1967 :

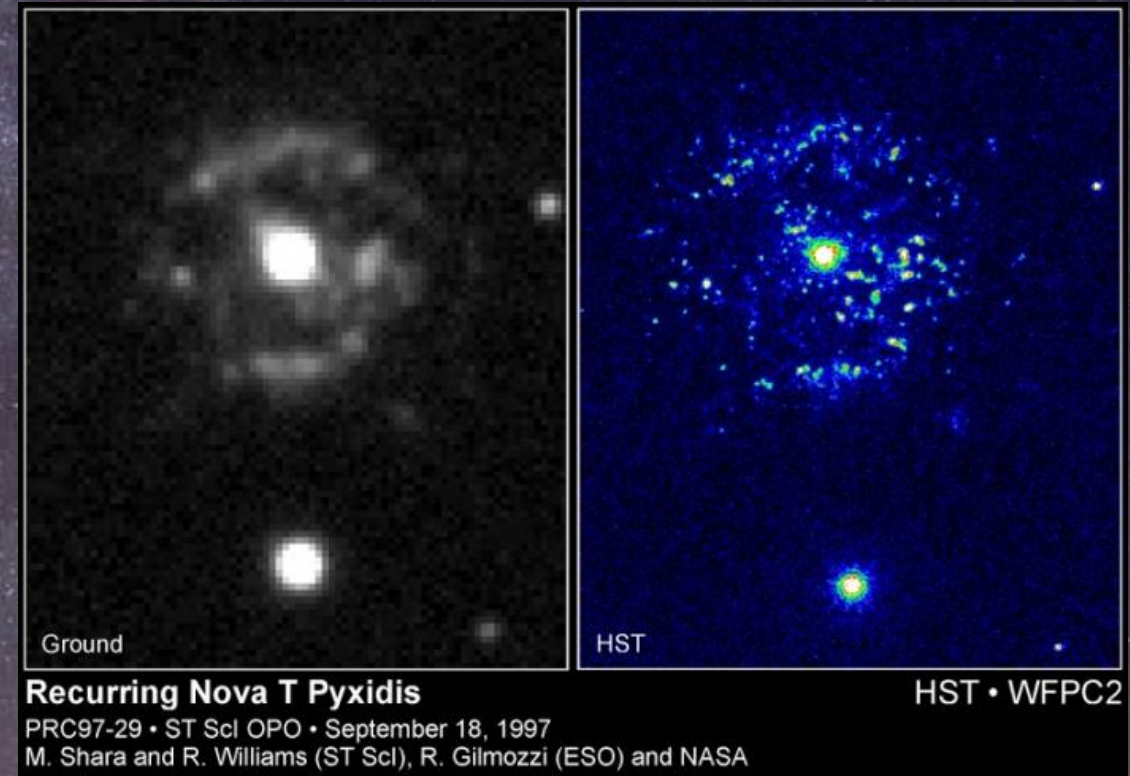
- Montée m 12 à m 6 en 1 mois
- Puis m 6 à m 3,7 en 5 mois
- Puis descente très lente

1 – Les novæ – Ce que les observations ont montré

- Le fait que l'on observe des novæ rapides et des novæ lentes est la conséquence de différences dans le mécanisme d'explosion.
- En fonction de la masse de la naine blanche, de la composition chimique des étoiles et du taux et de la vitesse d'accrétion, l'explosion sera plus ou moins violente et la vitesse d'expansion des gaz accumulés à la surface de la naine blanche sera plus ou moins grande :
 - 200 à 500 km/s pour les novæ lentes,
 - 1.000 à 4.000 km/s pour les novæ rapides.
- Ce sont ces éléments qui sont la cause d'une montée en luminosité et d'une redescente plus ou moins rapide révélées sur les courbes de lumière.

1 – Les novae – Parfois récurrentes

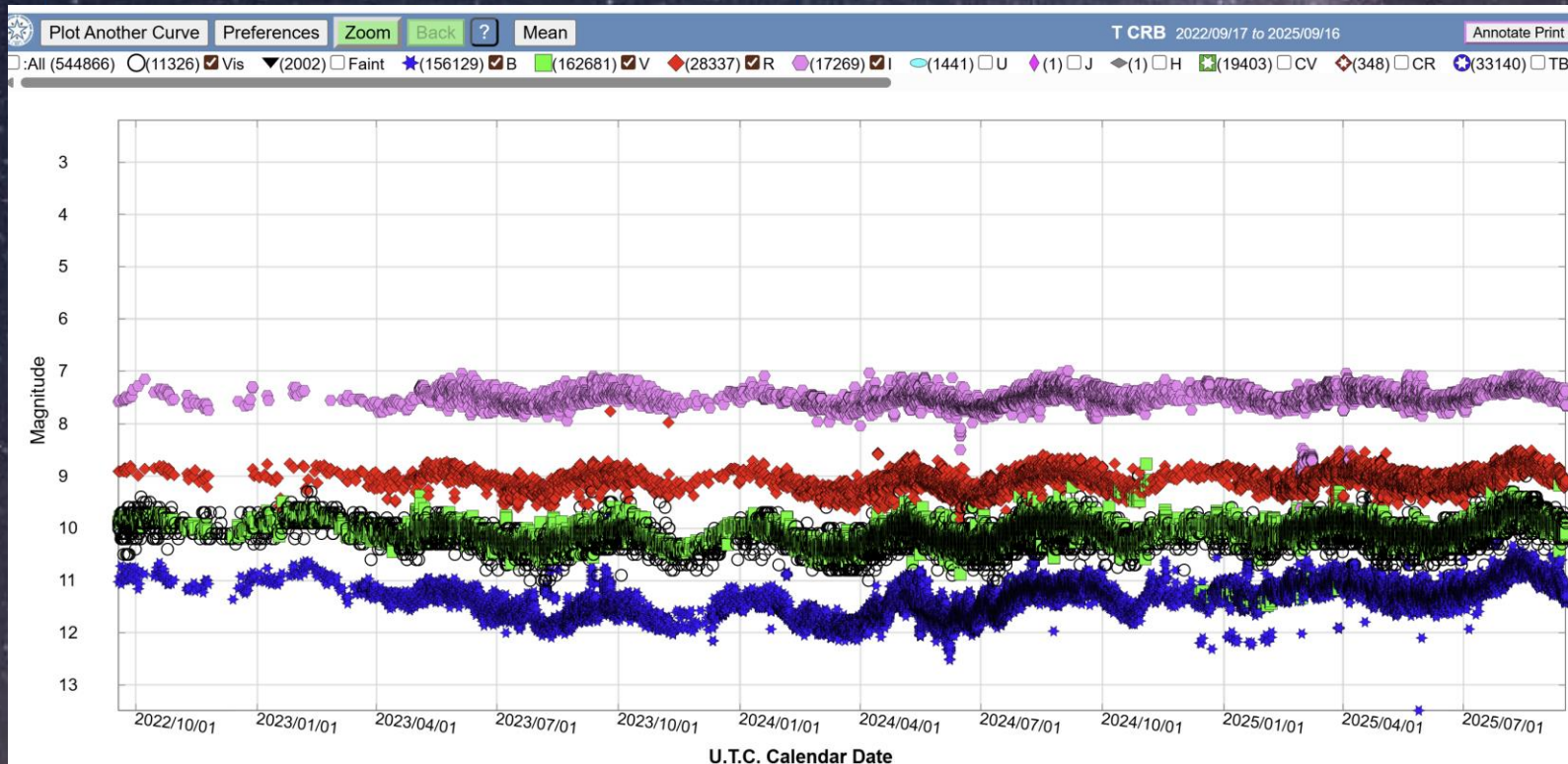
- Si la naine blanche n'attire pas toute la matière de la géante rouge le processus de transfert de masse suivi d'une explosion thermonucléaire peut se reproduire régulièrement : on parle alors de « nova récurrente »
- T Crb : périodicité de 80 ans environ
- T Pyxidis (Boussole) : périodicité de 20 à 50 ans
- RS Ophiuchi : périodicité de 15 ans environ



Crédit photo : HubbleSite

1 – Les novae – Parfois récurrentes

➤ Des nouvelles de T Crb



Courbe de lumière T Crb
17/09/2022 au 16/09/2025
Crédit aavso.org

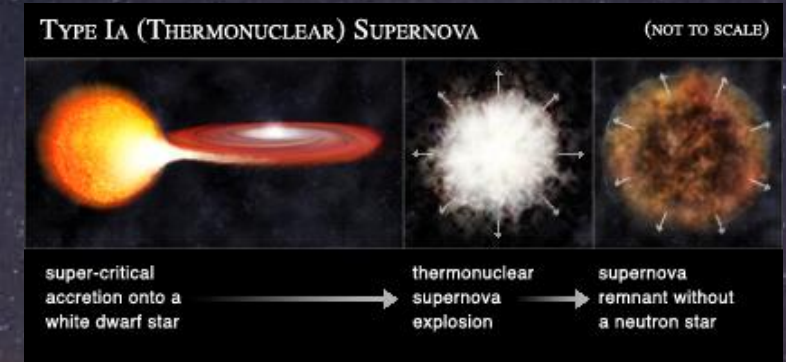
2 – Les supernovæ – L'explosion extrême

- Comme les novæ, les **supernovæ** sont des étoiles dont la luminosité augmente brutalement à cause d'un phénomène explosif d'une extrême violence entraînant :
 - Une montée très rapide en luminosité de plus de 20 mag.
 - La disparition de l'étoile
- Les supernovæ sont causées :
 - Soit, par l'effondrement gravitationnel d'une étoile d'au moins 8 à 10 Ms;
 - Soit, par la fusion nucléaire incontrôlée dans un système binaire, lorsque le transfert de matière à la surface de la naine blanche va la conduire à dépasser 1,4 Ms (limite de Chandrasekhar) = masse maximale que peut avoir une naine blanche avant de s'effondrer sous sa propre gravité

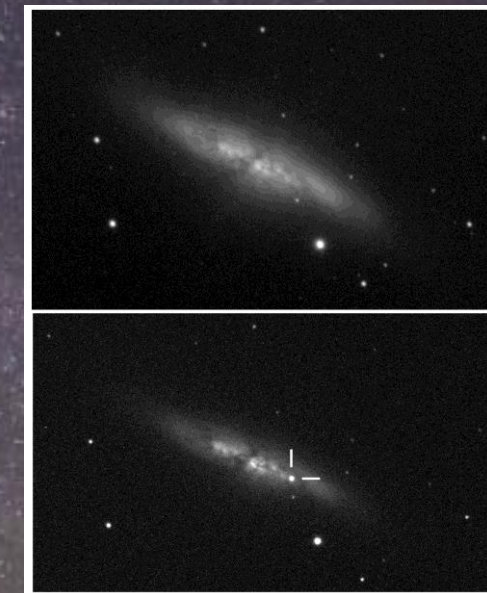
2 – Les supernovae – L'explosion extrême

Les supernovae thermonucléaires (Type I-a)

- Transfert de matière dans un système binaire (Cf. mécanisme des novae). Si suffisamment de matière tombe à la surface de la naine blanche, dépasse limite de Chandrasekhar (1,4 Ms) et s'effondrer sur elle-même.
- Entraîne une augmentation de pression et de température.
- La naine blanche étant constituée essentiellement de carbone et d'oxygène, cela va rallumer la combustion de ces éléments .
- L'énergie dégagée telle qu'elle ne peut pas être contrebalancée par la force de gravité / Explosion qui disloque l'étoile.



Crédit photo : NASA/CXC/M.Weiss

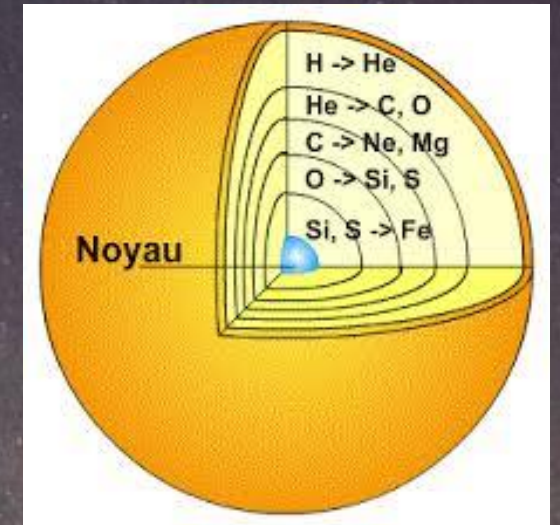


SN
2014 J
Ia
(M82)

2 – Les supernovae – L'explosion extrême

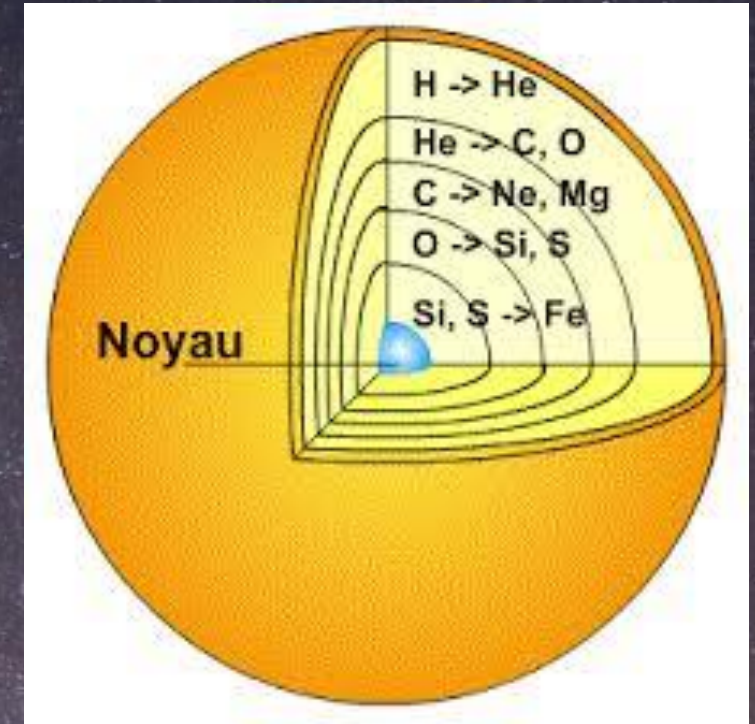
Les supernovæ par effondrement gravitationnel d'étoiles massives

- Période séquence principale de l'étoile : équilibre pression radiative (énergie libérée par la fusion nucléaire) / force de gravité
- En fin de vie : fusion de l'hydrogène ralenti / libère moins d'énergie / cœur se contracte et sa densité et sa température augmentent / le processus de fusion de l'hélium s'enclenche / puis, selon le même processus, celui des éléments suivants de plus en plus lourds
- Le processus de fusion va être de plus en plus rapide et petit à petit, l'étoile va avoir une structure en « pelure d'oignon ».



2 – Les supernovae – L'explosion extrême

- Lorsque les processus de fusion successifs permettent de dépasser le stade du néon (sinon l'étoile termine sa vie en naine blanche), le processus de fusion se poursuit pour produire du nickel et du fer (fer 56).
- Ces 2 noyaux = les éléments les plus stables, contrairement aux autres éléments leur fusion absorbe plus d'énergie qu'elle n'en produit. Le processus de fusion ne peut pas s'autoalimenter, il faut amener de l'énergie externe
- L'énergie produite au cœur de l'étoile n'est donc pas suffisante pour enclencher la fusion du nickel et du fer.



2 – Les supernovae – L'explosion extrême

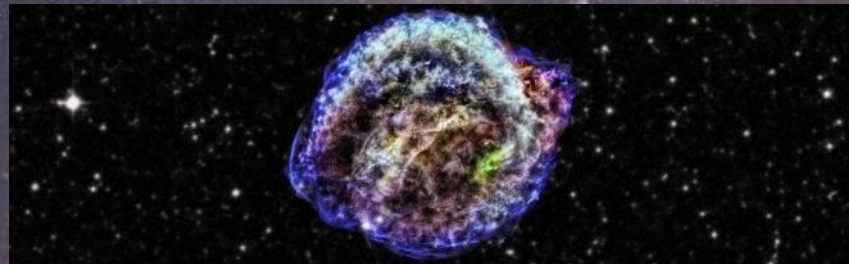
- Le cœur de l'étoile devient inerte mais les processus de fusion se poursuivent dans les couches supérieures continuant à produire du nickel et de fer 56 ce qui fait grossir le cœur.
- Lorsque la masse du cœur atteint 1,4 Ms, la force de gravité lui impose de se contracter.
- La densité et la pression sont si fortes que les électrons commencent à se combiner avec les protons des noyaux de fer pour former des neutrons.
- La baisse du nombre d'électrons entraîne une chute de pression au sein du cœur de l'étoile, qui accélère le phénomène de contraction. Le cœur s'effondre sur lui-même instantanément
- Les couches internes de l'étoile s'effondrent également et viennent heurter le cœur rigide. Cette collision produit une onde de choc qui va propulser la matière dans l'espace.
- Du cœur de l'étoile, il reste une étoile à neutrons ou un trou noir

2 – Les supernovae – L'explosion extrême

➤ Ces supernovæ par effondrement gravitationnel sont classées en différents types selon les analyses spectrales :

- **Type II** : présence d'hydrogène dans le spectre (explosion de géantes rouges) avec des sous-types II-P, II-L, II-n, II-b
- **Type I-b** : absence d'hydrogène mais présence d'hélium (étoiles massives évoluées où l'enveloppe d'hydrogène a disparu, soufflée par vent stellaire ou par des transferts de matière dans un système binaire)
- **Type I-c** : absence d'hydrogène et d'hélium (étoiles massives très évoluées ayant perdu leurs couches externes)

Cassiopee A
J. Webb

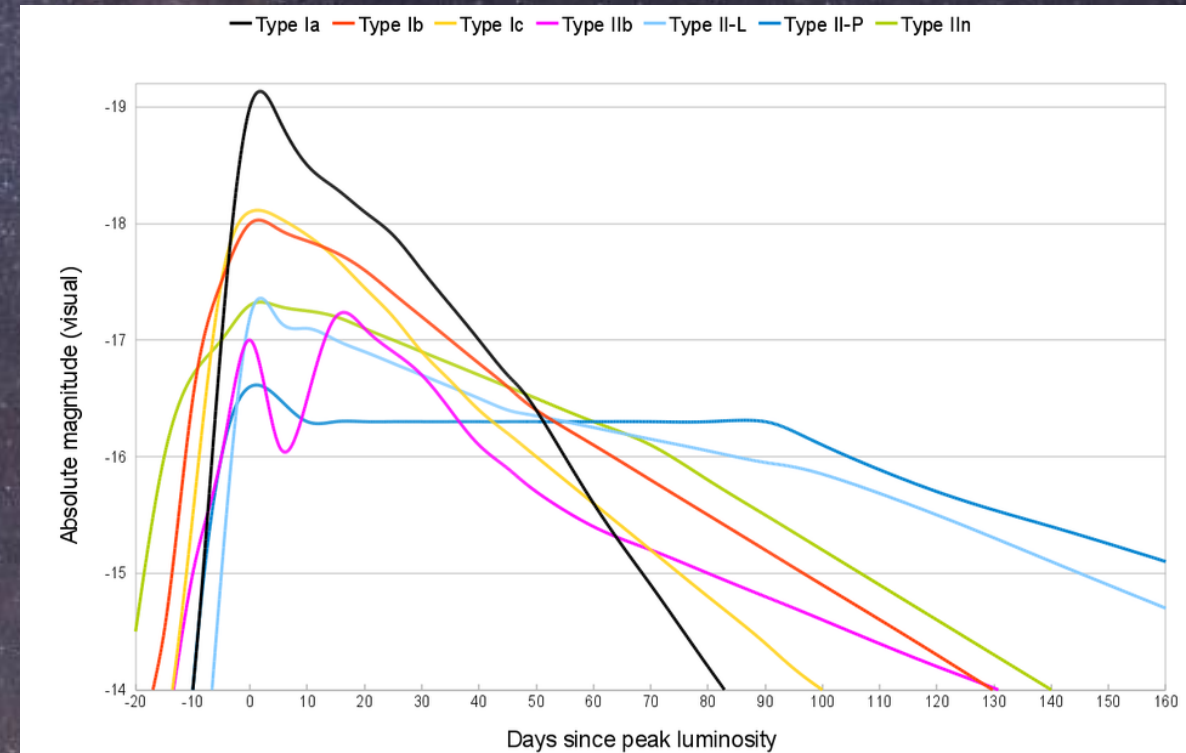
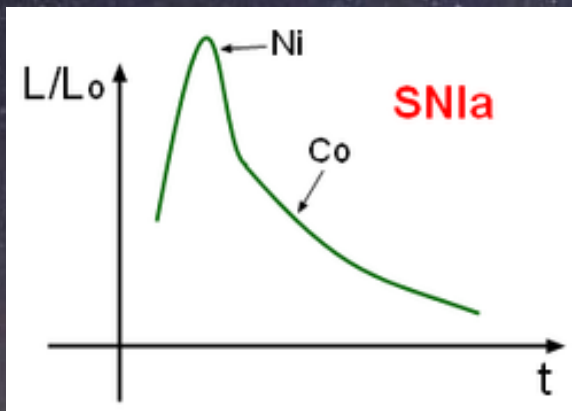


SN 1604 Supernova
de Kepler
Ophiuchus

2 – Les supernovae – Courbes de lumière

➤ Supernovæ de type I-a : forme typique régulière :

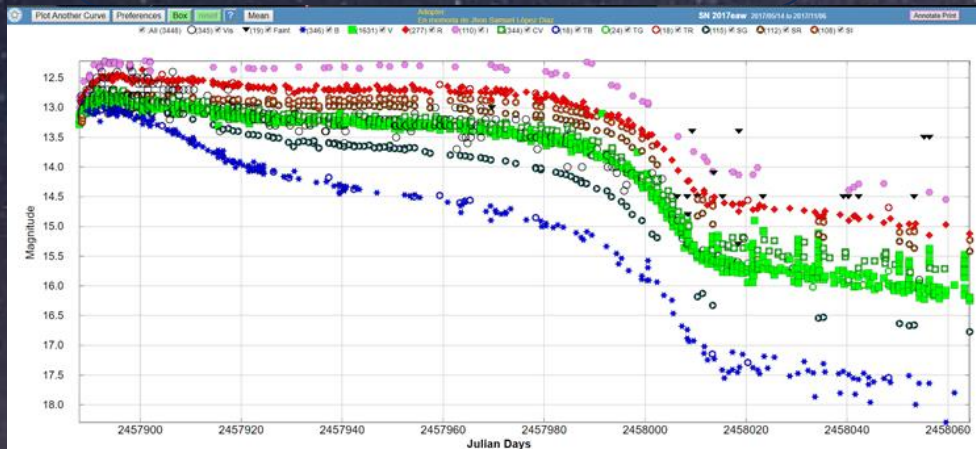
- montée rapide en quelques jours,
- Pic de luminosité intense ,
- 1^{ère} phase de décroissance rapide (désintégration radioactive du Nickel 56) suivie d'une phase plus lente (désintégration radioactive du cobalt 56)



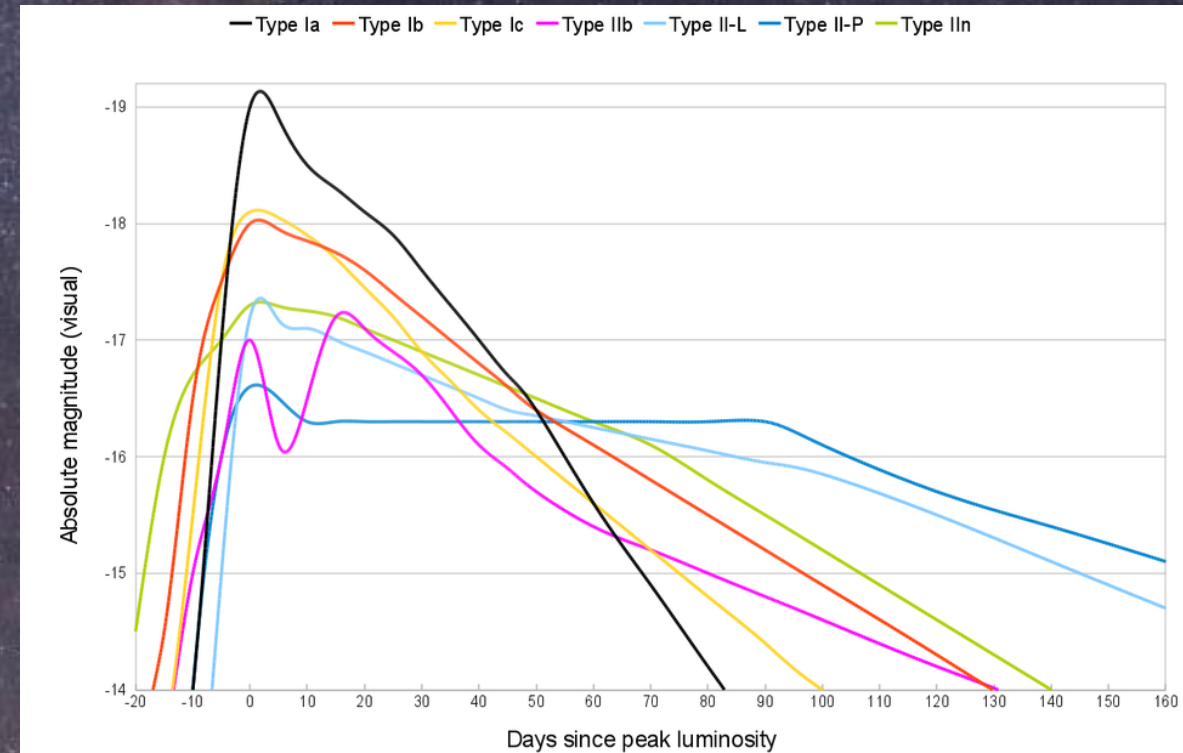
2 – Les supernovae – Courbes de lumière

➤ Supernovæ de type II-P :

- Plateau pendant env. 100 j après le pic
- Dû à la recombinaison de l'hydrogène dans l'enveloppe expulsée (des électrons libres se recombinent avec des protons en libérant de l'énergie)



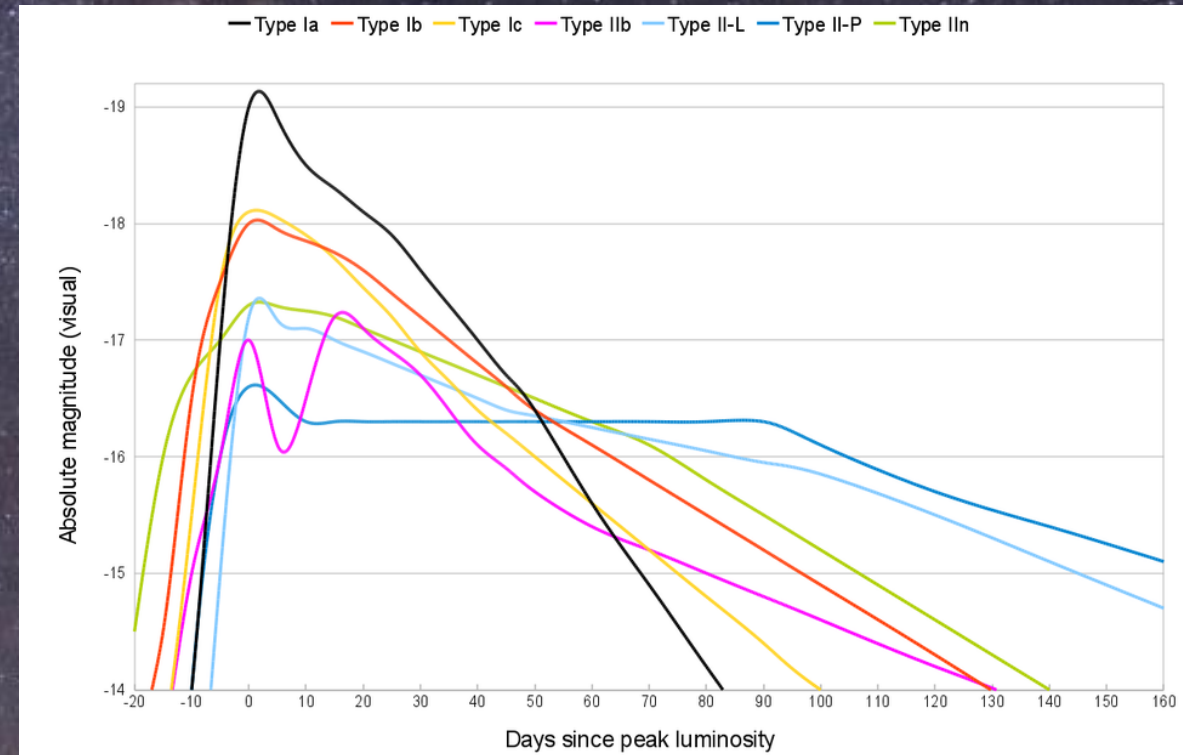
SN 2017eaw dans NGC 6946 galaxie du Feu d'Artifice (Cyg) - Crédit : aavso.org



2 – Les supernovae – Courbes de lumière

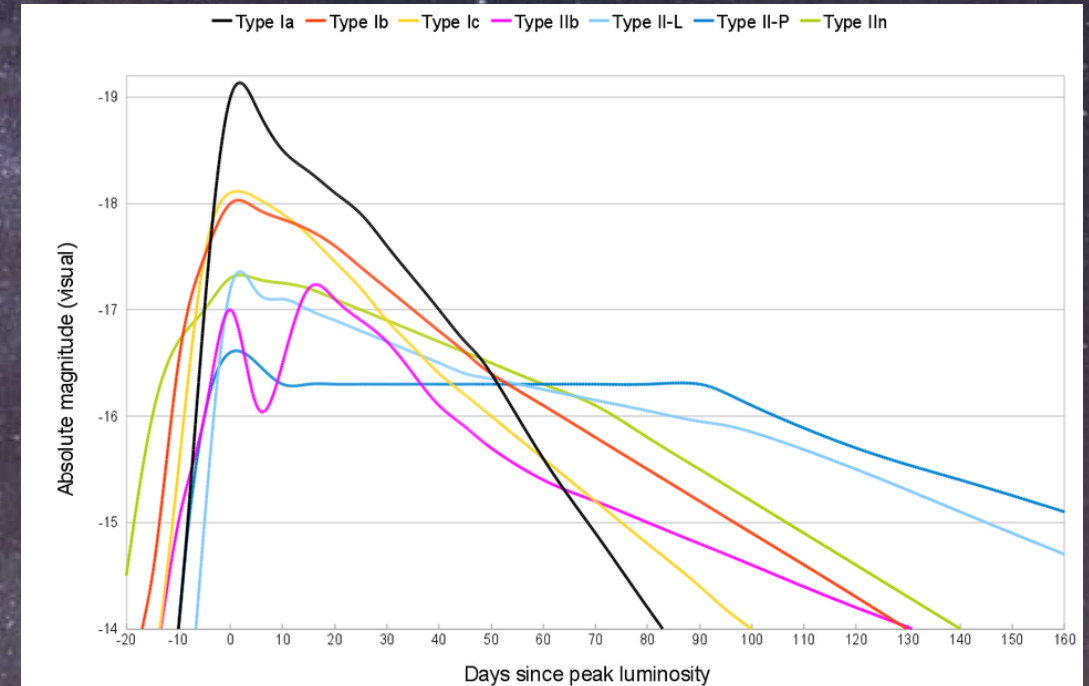
➤ Supernovæ de type II-n :

- Courbes irrégulières avec des pics secondaires
- Indique une interaction avec le milieu circumstellaire



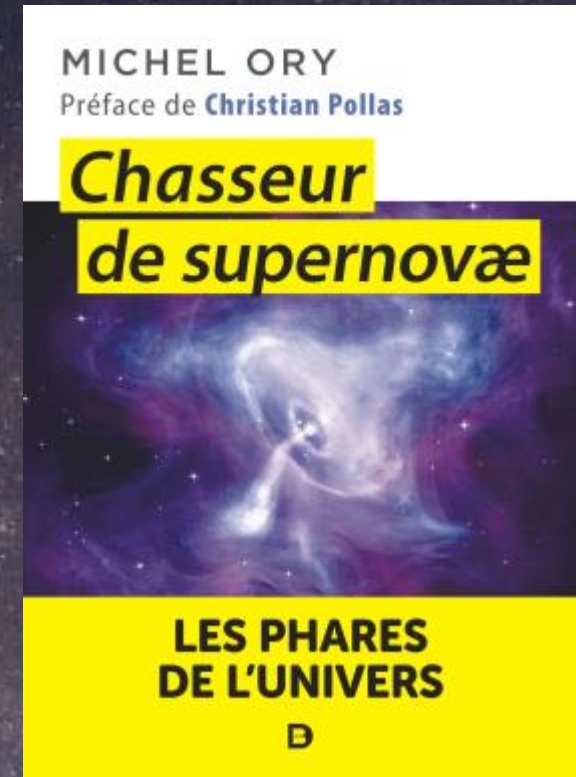
2 – Les supernovae – Courbes de lumière

- **Supernovæ de type II-b : forme typique régulière :**
- Montée rapide en quelques jours,
 - Pic de luminosité intense ,
 - 1^{ère} phase de décroissance rapide (éjection initiale de l'enveloppe externe) suivie d'une phase plus lente (désintégration radioactive nickel 56 / cobalt 56 / fer 56)



3 – Contribution des amateurs variabilistes

- Les novae et supernovae sont des phénomènes soudains et relativement imprévisibles
- Pendant longtemps, les observateurs amateurs d'étoiles variables, partout dans le monde, ont largement contribué à leur détection et leur suivi (ex. Michel Ory)
- Aujourd'hui la détection est largement assurée par les programmes automatisés de surveillance du ciel, laissant moins de place aux découvertes par les amateurs



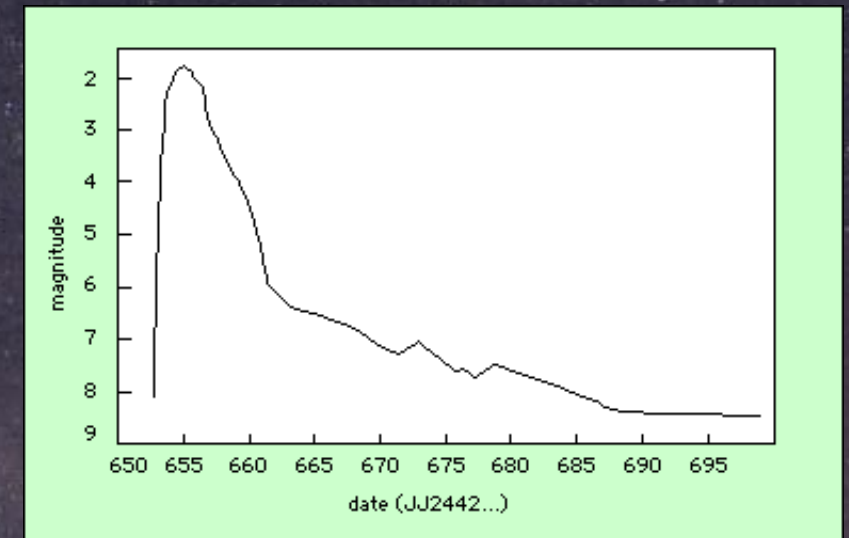
3 – Contribution des amateurs variabilistes

- Mais contribution des amateurs reste essentielle / suivi des phénomènes.
- Bases de données de l'AFOEV (France) et de l'AAVSO (USA) alimentées depuis 1921 (AFOEV) et 1911 AAVSO
- Ces données permettent :
 - d'établir des courbes de lumière sur toute la durée du phénomène et de manière récurrente pour les novæ récurrentes,
 - et surtout de donner l'alerte en cas de sursaut ou de phénomènes particuliers afin de déclencher les observations par les instruments professionnels qui ne peuvent pas rester mobilisés en continu
- Le développement de la spectroscopie chez les amateurs offre également des possibilités de travail dans le suivi des novæ et supernovæ.



3 - Contribution des amateurs variabilistes

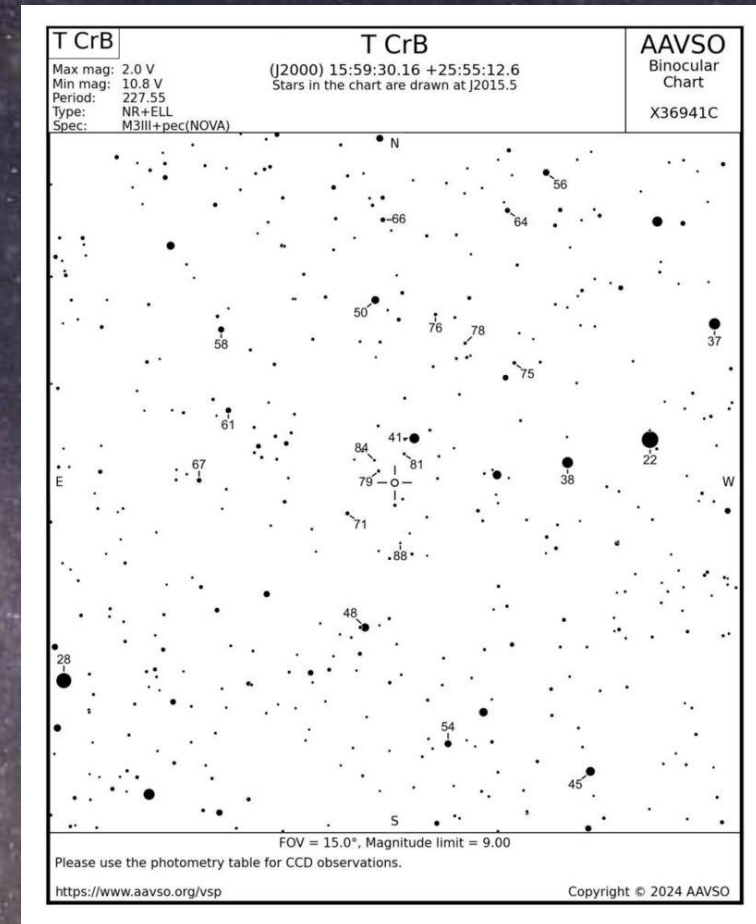
- Le grand nombre d'observateurs amateurs dans le monde permet :
 - Un suivi en continu sur de longues période en minimisant les contraintes de l'alternance jour/nuit et des facteurs météo ;
 - La collecte d'un grand nombre de données, atténuant ainsi l'incidence des mesures erronées, qui vont servir à établir des courbes de lumière fiables



Nova Cyg 1975

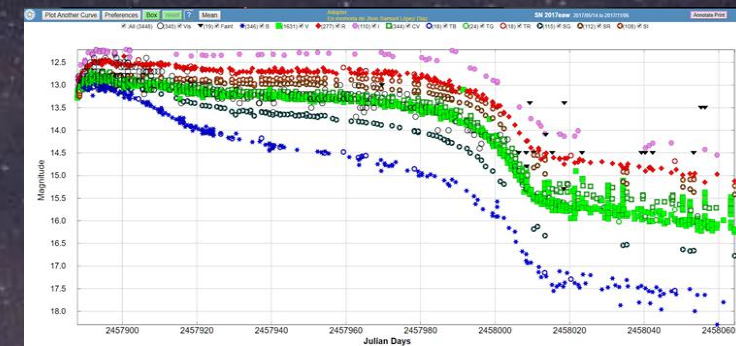
3 - Contribution des amateurs variabilistes

- Le suivi des novæ et des supernovæ par les amateurs peut être fait de différentes manières :
 - En visuel,
 - En photométrie avec des filtres U, B, V, R, I
 - En spectroscopie
- Le suivi visuel est tout à fait possible compte tenu de l'amplitude de la variation de luminosité et de la durée du phénomène et reste intéressant pour établir de courbes de lumière dans la longueur d'onde visible.



3 - Contribution des amateurs variabilistes

- Photométrie : courbes de lumière dans différentes longueurs d'onde / comparaison formes permet tirer des informations concernant les différentes couches et dynamiques de l'explosion
- Utilisation des filtres B, V R, I permet de calibrer la magnitude absolue des supernovæ de type Ia
- Montée en luminosité en bande I peut révéler formation de poussières dans les résidus de l'explosion
- Comparer courbes de lumières dans plusieurs bandes permet modéliser et corriger l'extinction interstellaire
- Spectroscopie permet d'analyser la composition chimique des éléments en jeu



SN 2017eaw dans NGC 6946 galaxie du Feu d'Artifice (Cyg)
- Crédit : aavso.org

3 - Contribution des amateurs variabilistes

➤ Les données accumulées dans les bases de données de l'AFOEV et de l'AAVSO sont régulièrement téléchargées par des astronomes professionnels et amateurs, par des chercheurs, des enseignants et des étudiants

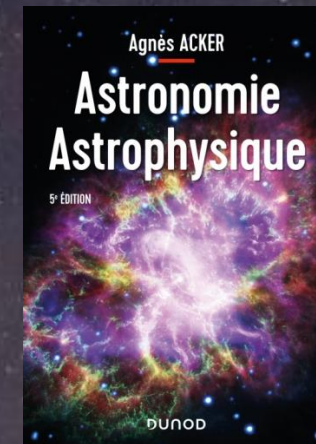
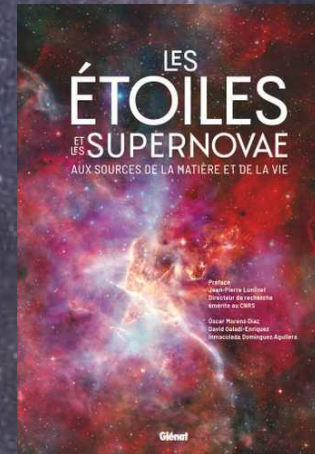
Extrait d'un rapport hebdomadaire de téléchargement d'observations déposées sur la base de données de l'AAVSO

Request date	Star name	# obs.	User	Purpose
2024-08-18	T CRB	3	Pro	Analysis
2024-08-19	T CRB	3	Am	Analysis
2024-08-19	T CRB	3	Pro	Analysis
2024-08-19	W AND	2	Other	Other
2024-08-19	R LEO	1	Other	Other
2024-08-19	S UMA	1	Other	Other
2024-08-20	T CRB	3	Am	Analysis
2024-08-20	Z UMA	10	Educator	Analysis
2024-08-20	T CRB	3	Pro	Analysis
2024-08-20	T CRB	3	Am	Analysis
2024-08-20	S CRB	2	Other	Other
2024-08-20	T CRB	3	Am	Analysis
2024-08-21	T CRB	3	Am	Analysis
2024-08-21	T CRB	3	Pro	Analysis
2024-08-21	T CRB	3	Stu	Analysis
2024-08-21	T CRB	3	Pro	Analysis
2024-08-22	T CRB	3	Am	Analysis
2024-08-22	T CRB	3	Pro	Analysis
2024-08-23	T CRB	3	Am	Analysis
2024-08-23	T CRB	3	Stu	Analysis
2024-08-23	T CRB	3	Pro	Analysis
2024-08-24	T CRB	3	Pro	Analysis
2024-08-24	T CRB	3	Am	Analysis
2024-08-24	HD 143454	1	Am	Analysis

Pro = Professional Astronomer Am = Amateur Astronomer Stu = Student

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !

BIBLIOGRAPHIE :



- Cours d'astronomie de l'Observatoire de Marseille (LAM)
- UFE –Observatoire de Paris (PSL)
- AFOEV : <https://cdsarc.u-strasbg.fr/afoev/>
- AAVSO : <https://www.aavso.org/>
- Documents ESO
- Wikipedia : Novæ et Supernovæ