

les cahiers clairaut

bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes



N° 72 - HIVER 1995-1996

ISSN 0758-234 X

Le CLEA – **Comité de Liaison Enseignants et Astronomes**

Le CLEA, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée (loi de 1901). Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire. En particulier, ils agissent dans le cadre de la formation initiale et continue des enseignants.

Le CLEA organise des stages nationaux (universités d'été) et régionaux dans le cadre des MAFPEN. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école primaire, du collège et du lycée. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc).

Aussi bien au cours de ces stages que dans ses diverses publications, le CLEA favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes hors de toute contrainte hiérarchique.

La liste des publications du CLEA **figure en pages 3 et 4 de la couverture**

Bureau du CLEA pour 1995

Présidents d'honneur

Jean-Claude PECKER

Evry SCHATZMAN

Présidente

Lucienne GOUGUENHEIM

Vice-Présidents

Agnès ACKER

Marie-France DUVAL

Hubert GIE

Jean RIPERT

Jacques VIALLE

Secrétaires-trésoriers

Catherine VIGNON

Gilbert WALUSINSKI

Comité de rédaction des Cahiers Clairaut : Daniel Bardin, Lucette Bottinelli, Jacques Dupré, Michèle Gerbaldi, Lucienne Gouguenheim, Jean-Paul Parisot, Georges Paturel, Jean Ripert, Daniel Toussaint, Victor Tryoën, Jacques Vialle, Gilbert Walusinski.

LES CAHIERS CLAIRAUT

Hiver 1995-1996

	page
Les nébuleuses planétaires	2
L'Assemblée Générale de EAAE	16
Mathématiques sans frontières	18
Lectures pour la Marquise	19
Chronique du CLEA	25
Mettez votre planétaire à l'heure	29
L'Europe en route vers les étoiles	30
Pourquoi l'Astronomie ?	31
A propos des stages MAFPEN	34
Diamètres solaires et instruments astrométriques	35
Les potins de la Voie lactée	36
Eclipses de Bouvines et autres lieux	37
Parmi nos lettres	38
Bruno Morando	40

EDITORIAL

Nous choisissons, en guise d'éditorial, de publier la lettre ci-dessous :

Chers Amis,

En lisant le dernier numéro des "Cahiers Clairaut", j'ai été bien surpris de découvrir l'article sur l'excentricité de l'orbite terrestre traduit de l'Anglais en Français par Lucienne Gouguenheim. Je dois avouer que j'en ai eu un grand plaisir, et c'était aussi une expérience très agréable de retrouver ce texte dans une langue très élégante, concise et précise. J'écris ces mots spontanément, pour exprimer ma gratitude à Lucienne.

Mais il y a une raison supplémentaire pour lancer ici cette remarque : vous savez que nous venons de fonder l'Association Européenne pour l'Education en Astronomie (AEEA en Français, EAAE en Anglais), qui veut promouvoir l'échange d'idées et de matériel didactique en astronomie dans les pays Européens. A mon avis, la traduction mentionnée est un bon exemple de la façon dont on peut réaliser cet échange international. Et pendant un petit moment je pensais vous encourager à mettre en route dans les Cahiers Clairaut un programme qui s'occupe de l'échange d'idées dans les pays Européens, afin de contribuer aux objectifs de l'EAAE.

Mais en regardant les numéros anciens des "Cahiers Clairaut", j'ai compris que vous êtes déjà en train de le réaliser de façon très efficace, depuis longtemps ! On trouve des contributions venant d'Espagne, d'Italie, de Pologne ... On trouve aussi tout au long des années des rapports sur des coopérations internationales. Donc je peux vous féliciter et vous encourager à continuer ce bon travail. Ces activités du CLEA qui pratiquent déjà ces bons contacts internationaux sont un trésor pour la jeune association EAAE. J'espère que, à l'avenir, ce type d'activité sera accepté et pratiqué sur ce modèle par les autres pays.

Roland Szostak

LES NEBULEUSES PLANETAIRES

Traceurs de l'évolution stellaire et de l'évolution galactique

Agnès Acker
Observatoire de Strasbourg
(Université Louis Pasteur)

Le milieu interstellaire (MIS), lieu de la formation et de la "mort" des étoiles, apparaît façonné par les violentes éjections de matière, soit sous forme de "vents" puissants (émis surtout par les étoiles massives), soit à l'occasion d'événements explosifs marquant la fin de la vie stellaire (nébuleuses planétaires et supernovae en particulier). Les nébuleuses planétaires (NP) jouent un rôle important dans l'écologie du MIS, qu'elles enrichissent de matière recyclée, sous forme de grains de poussières notamment.

1 Petite introduction semantico-historique

L'appellation "nébuleuse planétaire" est liée aux circonstances de la découverte de ces objets. Rappelons qu'en 1764, Messier catalogua une centaine de nébuleuses aux formes variées et de nature alors inconnue, dont les objets M27 (*Dumbell*, dans le Petit Renard), M57 (*Anneau de la Lyre*), M97 (*Owl* ou *Hibou* dans la Grande Ourse). C'est Darque qui, en 1779, baptisa ces objets "nébuleuses planétaires", car ils apparaissaient, dans un petit instrument d'observation, comme des disques planétaires diffus, verdâtres. Cette dénomination fut conservée, par tradition - quoique l'on sache pertinemment que ces nébuleuses n'ont absolument aucun lien avec des planètes ! - pour tous les objets de même type découverts plus tard, en particulier les 91 "nébuleuses planétaires" incluses par Dreyer en 1888 dans le *New General Catalogue* (auxquels s'ajoutèrent - vers 1900 - 32 objets "IC" de l'index complémentaires), et les 1036 objets "PK" listés en 1967 par Perek et Kohoutek. Actuellement, environ 1 150 NP sont connues, présentées en détail, du visible aux ondes radio en passant par IRAS, dans le "Strasbourg-ESO catalogue of galactic planetary nebulae" (Acker et al, 1992).

"Un phénomène singulier !": c'est ainsi que William Herschel décrit la nébuleuse NGC 1514, qu'il observa en novembre 1790, objet apparaissant comme une brillante étoile entourée d'une large et faible nébulosité, une sorte de "fluide lumineux" fort mystérieux.

En 1864, quatre années après la publication des travaux de Bunsen et Kirchhoff, William Huggins observa le premier spectre d'un autre de ces énigmatiques objets, NGC 6543, et découvrit de brillantes raies d'émission vertes, la signature d'un milieu gazeux, mais de nature encore inconnue. C'est Margaret Huggins qui, en 1897, les attribua à un possible nouvel élément cosmique, le "nebulium" (Rappelons que c'était l'époque où Lockyer découvrit un nouvel élément dans le spectre solaire, l'hélium, qui ne fut observé sur Terre que quelques années plus tard par Ramsay, en 1895).

C'est en 1927 que Bowen put montrer que le "nebulium" ... n'existe pas, et que les raies vertes observées sont en fait émises par de l'oxygène ionisé deux fois (O^{++} , ou OIII), mais dans des conditions de vide très difficiles à réaliser dans les laboratoires terrestres, et donc appelées de ce fait "raies interdites", indiquées entre crochets (par exemple les raies vertes [OIII] à 495,9 et 500,7 nanomètres).

2 Les nébuleuses planétaires, étapes tardives de l'évolution stellaire

Le Soleil ($T \sim 6\,000\text{K}$) se trouve sur la "séquence principale", en situation d'équilibre pendant $\simeq 10$ milliards ans, avec l'hydrogène H qui se transforme en hélium He dans le coeur. L'avenir prévu pour le Soleil passe par l'étape *nébuleuse planétaire*, en un cheminement de 9 étapes que nous allons suivre sur le diagramme Température - Luminosité (cf. fig. 1)

On rappelle qu'il s'agit de la température photosphérique T à la "surface" de l'étoile, allant de $3\,000\text{K}$ pour les étoiles rouges à $30\,000\text{K}$ pour les étoiles bleues (sur la séquence principale). La luminosité, exprimée en luminosités solaires (avec $L_{\odot} = 3,84 \times 10^{26}$ Watts), dépend de la température T (loi de Stefan) et du rayon R de l'étoile: $L = (4\pi R^2)(\sigma T^4)$, avec σ = constante de Stefan.

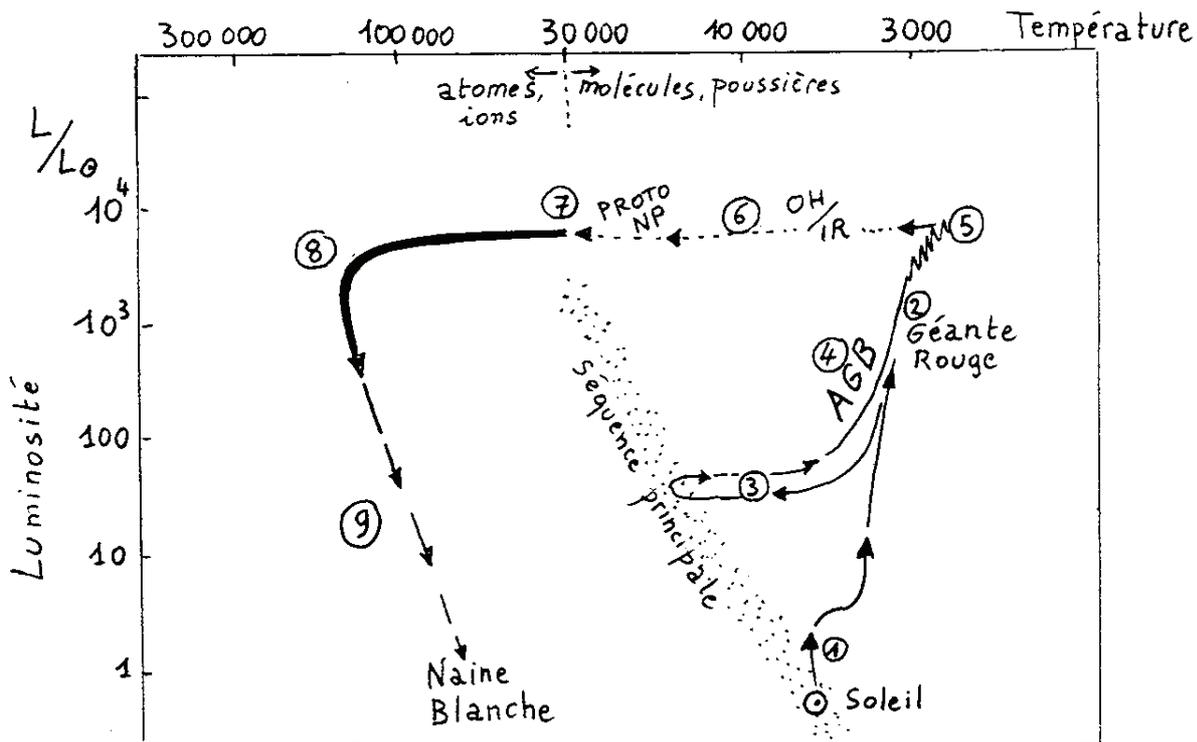


FIG. 1 - Evolution d'une étoile de type solaire dans le diagramme Luminosité-Température.

1 → Quand le coeur est en He inerte, l'étoile quitte la séquence principale, avec l'hydrogène qui "brûle" en couches autour du coeur dont la masse et la température augmentent jusqu'à une valeur critique; où brutalement l'hélium se transmute en carbone C dans le coeur.

2 → C'est le "Flash" de l'hélium. Pour évacuer l'énergie, l'étoile gonfle (d'un facteur 100 environ), la luminosité L augmente (d'un facteur 1 000) et la température T baisse ($\simeq 3\,500\text{K}$): l'étoile devient **GEANTE ROUGE**, en près de 300 millions d'années après avoir quitté la séquence principale.

3 → L'énergie du "flash" a été évacuée, l'étoile s'est "dégonflée", et He se transforme en C et O dans le coeur de façon calme. La luminosité est constante (env. $50 L_{\odot}$): l'étoile évolue sur la **BRANCHE HORIZONTALE**, avec une température allant de $4\,000$ à $9\,000\text{K}$.

4 → Quand le coeur est en (C, O) inertes l'étoile quitte la branche horizontale, avec He qui "brûle" en couches autour du coeur dont la masse et la température augmentent: l'étoile remonte

le long de la Branche Asymptotique des Géantes rouges (AGB), l'étoile se gonflant (comme en 2) pour libérer l'énergie. Ces phases AGB s'accompagnent d'éjections de particules (ou *vent*).

↖ ↗ Ce premier vent est caractérisé par une perte de masse inférieure ou égale à $10^{-6} M_{\odot}/\text{an}$ avec une vitesse $\simeq 5 \text{ km/s}$.

C'est le premier des 3 vents qui formeront la nébuleuse planétaire.

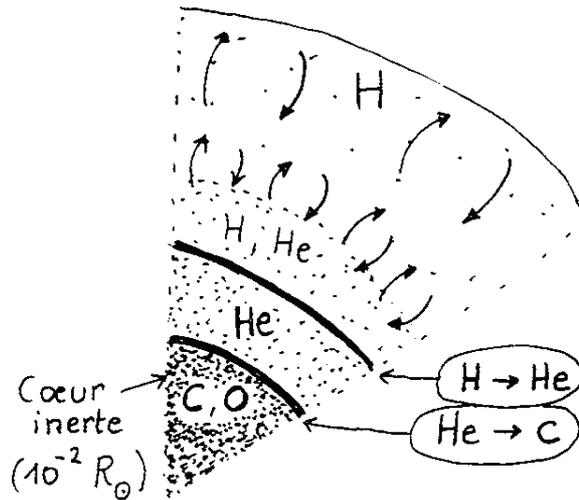


FIG. 2 - Structure interne d'une étoile AGB.

4 à 5 → L'étoile devient instable, caractérisée par une double "source d'enveloppes" où H et He "brûlent" en couches minces (voir fig. 2). Mais l'énergie produite par ces réactions nucléaires ne peut être évacuée (les coquilles très minces ne peuvent "soulever" les couches supérieures).

5 → Vers le sommet de la montée AGB ($L \geq 1\ 500 L_{\odot}$), l'excès thermique est libéré en "oscillations de relaxation": l'étoile "pulse" (Mira) augmentant son volume donc sa luminosité. Au cours de ces "pulses thermiques", placés tous les $10^3 - 10^4$ ans, la matière profonde est soulevée, et mélangée aux gaz riches en H de la surface, produisant un "zoo" d'abondances. La luminosité augmente, atteint $10^6 L_{\odot}$. Alors survient un emballement explosif, un "flash" dans la coquille d'hélium qui se transforme à son tour en C et O.

Les couches externes sont éjectées, formant une "proto-nébuleuse planétaire". Pour une étoile de masse initiale $\simeq 5 M_{\odot}$, il faut environ 40 "pulses" thermiques pour que l'enveloppe arrive à se détacher.

↖ ↗ Un deuxième vent, très épais (Superwind) marque la fin de la phase AGB, avec une perte de masse $\leq 10^{-5} M_{\odot}/\text{an}$ (10^9 tonnes par an) et une vitesse $\simeq 10 \text{ km/s}$.

6 → L'étoile est alors entourée d'une atmosphère épaisse; les particules sont éjectées au loin (pression de radiation). Elle se combinent en atomes et molécules et certaines se condensent. En 10^3 ans, l'étoile est entourée d'une épaisse couche de poussières (silicates, un peu de graphite et des hydrocarbures aromatiques polycycliques ou PAH). L'étoile devient "invisible" car seules les molécules (par ex. OH) rayonnent dans le domaine radio. Un rayonnement est également émis dans l'Infra-Rouge (IR), détecté par la sonde IRAS en 1983, car les poussières chauffées à 300K émettent à $\sim 100\mu\text{m}$ (loi de Wien: $\lambda_{\text{max}}T = \text{cst}$). La source ainsi manifestée en radio et en IR est nommée: OH/IR.

7 → L'étoile dépouillée de environ 1/5 de sa masse se contracte et poursuit les combustions en coquilles. Sa photosphère se réchauffe, jusqu'à $\sim 30\ 000\text{K}$: alors les photons UV sont assez énergétiques pour détruire les poussières, dissocier les molécules, exciter et ioniser les atomes et ce

progressivement du centre aux enveloppes externes.

C'est alors que le phénomène "nébuleuse planétaire" est déclenché!... la NP devient **visible**.

✱ Un **troisième vent** se produit, avec une perte de masse $\leq 10^{-9} M_{\odot}/\text{an}$ et une vitesse $\simeq 3\,000$ km/s (10 millions de km/h). Ce vent très rapide et ténu souffle les gaz proches des étoiles formant une **cavité** (et les "globules cométaires" observés au centre de Hélix (voir fig.3)).

La matière laissée par le "supervent" est fortement comprimée créant une interface dense, une **coquille** brillante, se dilatant à environ 20 km/s ($v_{\text{expansion}}$ observée) dans le vaste **HALO** laissé par les premiers vents.

7 à 8 → L'étoile continue à se contracter et à se réchauffer; elle évolue à $L \simeq \text{cst}$ et T croissante, suivant un trajet évolutif dépendant de la masse:

$L \simeq 20\,000 L_{\odot}$ pour un noyau de $0,9 M_{\odot}$ (reste d'une étoile de masse initiale de $\sim 5 M_{\odot}$), durée environ 1 000 ans.

$L \simeq 1\,500 L_{\odot}$ si la masse finale $\sim 0,55 M_{\odot}$ ($M_{\text{initiale}} \leq 1 M_{\odot}$), durée environ 50 000 ans.

8 → Quand la température atteint une valeur limite ($\simeq 250\,000 K$), la combustion en couches s'arrête: T et L diminuent, de façon irréversible.

9 → L'étoile refroidie, comprimée, deviendra **NAIN BLANCHE**, et l'enveloppe des gaz éjectés est devenue très grande, très ténue, les irrégularités de structure se sont estompées, les gaz se diluent peu à peu dans le milieu interstellaire ambiant, la NP cesse d'exister. Le phénomène NP dure en moyenne 30 000 ans.

Des maquettes animées 2D

Un modèle de *vents interactifs* a été proposé dès 1978 pour tenter d'expliquer la morphologie des NP. De fait, chaque NP apparaît comme unique ! Pourtant les NP sont "sculptées" par les mêmes phénomènes, conduisant à quelques points communs: étoile centrale bleue car très chaude; cavité centrale; vaste halo se dilatant lentement; lobes bi-polaires dressés au-dessus de disques sombres (structure bipolaire observée pour 80% des NP, voir Fig. 3).

Adam Frank (université du Minnesota) et ses collègues ont réalisé (1994) des simulations en 2 dimensions de l'évolution dynamique des gaz et des radiations de NP asphériques, en utilisant le scénario de vents stellaires interactifs. Le 3ème vent très rapide et ténu émis par l'étoile centrale s'épand dans le super-vent dense et lent, résidu de la géante, et dont la distribution de densité est ici supposée toroïdale, avec une concentration près de l'équateur de l'étoile. Le vent rapide souffle les gaz dans l'alignement de l'axe du toroïde, le long de l'axe de rotation de l'étoile; créant deux lobes polaires opposés, perpendiculaires au disque dense.

Ce scénario conduit à créer une grande variété de formes asymétriques, selon les vitesses des vents, modulées par le refroidissement des gaz par les radiations, d'éventuels champs magnétiques, la résistance du milieu interstellaire. Selon l'âge du système de vents interactifs, et selon l'angle de visée de l'observateur, on voit apparaître des tonnelets bipolaires séparés par un disque dense, ou des "ressorts" hélicoïdaux, ou des anneaux concentriques, permettant d'expliquer pratiquement toutes les formes observées. Ainsi M 57 (dans la Lyre) apparaît comme un anneau car vu "d'en haut", par l'extrémité du lobe, le long de l'axe du toroïde, tandis que NGC 6543 est vu "de côté" (voir Fig. 4).

Les NP apparaissent comme de parfaits laboratoires naturels pour tester des processus et des modélisations hydrodynamiques.

FIG. 3 - Exemples de nébuleuses planétaires

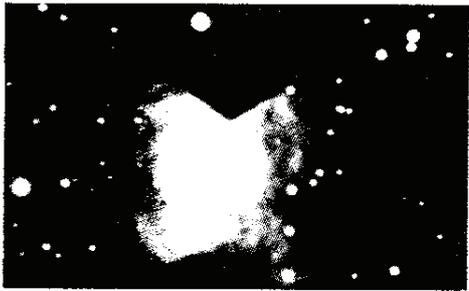
M2-9
(Papillon)



NGC
6302



NGC
2346



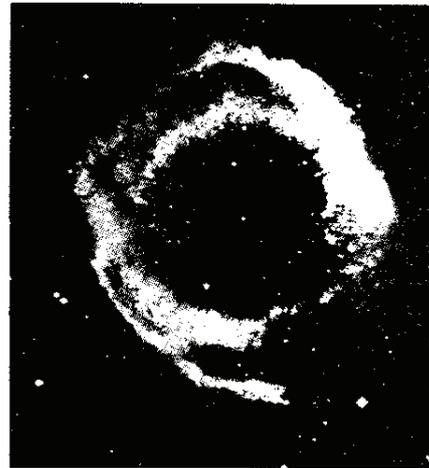
NGC 2392 (Esquimô ou Clown)



H α + [N II]
657 nm

[O III]
500 nm

He II
469 nm



NGC 7293 (Helix), coordonnées galactiques = 36,1-57,1
diamètre = 15 minutes d'arc environ ; distance = 650 AL env



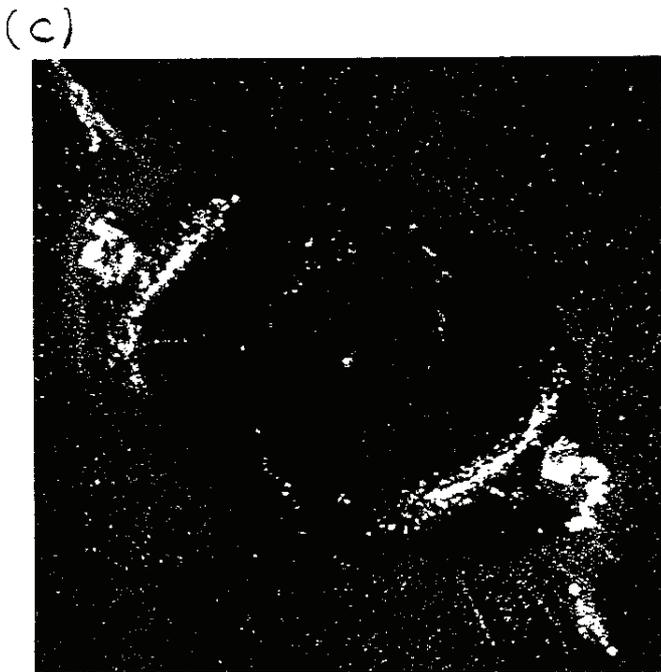
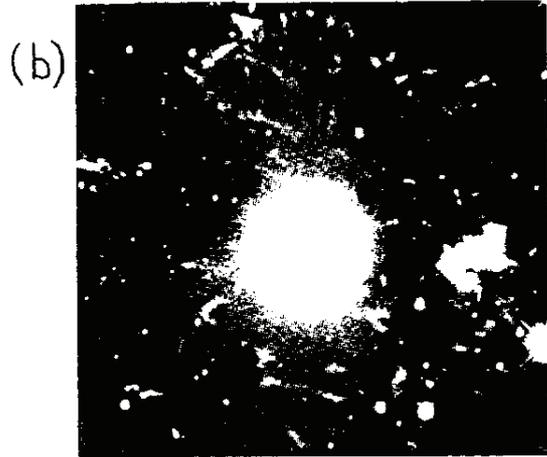
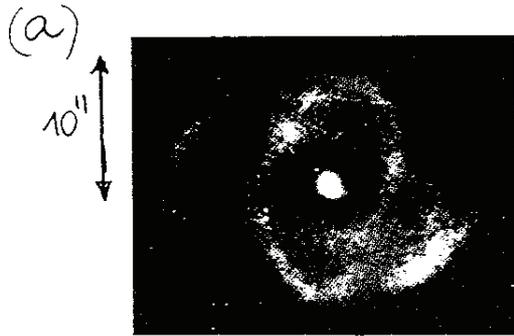
He 2-104 ("Crabe du Sud")



A 43

FIG. 4 - NGC 6543, la nébuleuse "oeil de chat"

Avec un petit instrument, cette NP montre une structure complexe (a), formant le centre brillant (15" x 30" environ). Avec des temps de pose très longs, on découvre un immense halo autour du centre surexposé (b). En 1995, le télescope spatial a précisé l'image (c).



Le télescope Spatial Hubble vient de révéler une image extraordinaire de NGC 6543, l'objet qui intrigua tant Huggins il y a 130 ans. Une enveloppe intérieure, allongée sur environ 0,1 AL de part et d'autre de l'étoile centrale, a été soufflée par le vent stellaire rapide. Une large enveloppe bi-polaire externe s'étend tout autour, fossile d'une éjection antérieure, à travers un anneau épais qui encercle ces structures. Des gaz sont projetés à grandes vitesses le long d'un axe perpendiculaire à l'anneau; ces jets violents ont comprimé les gaz, créant des petits arcs brillants projetés aux extrémités des deux lobes, et qui ne sont plus situés dans l'axe du jet, suggérant un mouvement tournant ou de précession pour le jet. Ces structures complexes résulteraient peut-être du fait que l'étoile centrale serait binaire, formée de deux étoiles très proches avec transfert de masse, et dont le plan orbital serait celui de l'anneau perpendiculaire aux jets.

3 Les Nébuleuses Planétaires, sources de rayonnements révélateurs

Les gaz nébulaires sont principalement constitués d'hydrogène, l'élément prédominant de l'univers, puis d'hélium, et enfin d'éléments plus lourds (C, N, O,...) en proportion bien plus faible et variable. Dans le domaine visible, le spectre nébulaire observé présente des "forêts" de raies en émission, les plus importantes étant les raies de la série de Balmer de l'hydrogène (dont la plus brillante est la raie rouge H α donnant un aspect rosâtre à toutes les nébuleuses), à côté de raies interdites de l'oxygène, de l'azote, du soufre, de l'argon, du néon,...

Un laboratoire cosmique, où des gaz chauffés brillent !

En 1927, Zanstra décrivit les processus physiques permettant de comprendre le rayonnement observé, en particulier pour les raies de l'hydrogène : l'étoile centrale, très chaude (entre 30 000 et 250 000 degrés), émet des photons UV énergétiques, qui arrachent des électrons aux atomes d'hydrogène des gaz de la nébuleuse (c'est la photo-ionisation); ces électrons sont re-captés par des ions d'hydrogène, avec chaque fois émission d'énergie sous forme de continuum mais surtout de raies (formées par recombinaison, en quelques 10 milliardièmes de seconde, transitions quasi-instantanées typiques des raies "permises"). C'est ainsi que se forment les séries de raies de l'hydrogène, de Balmer (dans le visible), de Lyman (dans l'UV), de Paschen (IR), etc, et les séries de raies de l'hélium. De plus, Zanstra montre que la température de l'étoile centrale peut être estimée à partir de l'intensité des raies de l'hydrogène (de H β en particulier) qui est reliée au nombre de photons UV émis par l'étoile (d'autant plus nombreux que l'étoile est plus chaude), à condition que tous ces photons soient absorbés, donc que la nébuleuse soit "optiquement épaisse".

Collisions et raies interdites

Pour les raies interdites, le processus est un peu différent, décrit par Bowen en 1928 : certains photo-électrons (produits par photo-ionisation) transportent assez d'énergie pour provoquer des collisions avec des électrons liés, les transporter sur des niveaux dits "métastables" (car à partir de ces niveaux, une transition spontanée ne se fait qu'au bout d'une durée relativement très longue, de quelques secondes à quelques heures ; or quand le milieu est trop dense, un choc avec une autre particule intervient toujours avant qu'aït lieu l'émission spontanée, ce qui rend alors ces transitions "interdites"). L'intensité des raies interdites formées par ce mécanisme est très sensible à l'agitation des atomes, donc à la "température électronique" (elle vaut environ 10 000 K) qui peut être déterminée en particulier grâce aux raies interdites de O III. Les émissions par collisions dépendent également de la densité électronique, estimée grâce à des raies interdites de l'oxygène OII (dans le violet) ou du soufre SII (dans le rouge) : le milieu gazeux des NP apparaît extrêmement ténu, comprenant environ 10 000 atomes par cm 3 (contre 10 19 pour l'atmosphère terrestre !).

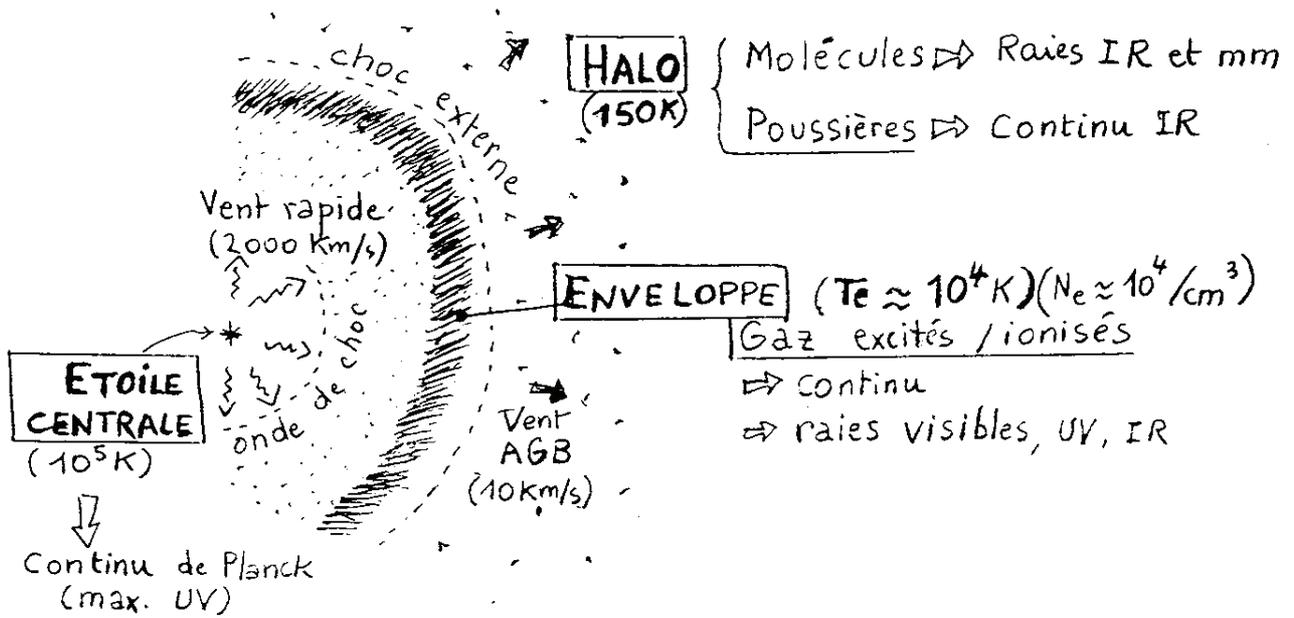


FIG. 5 - Rayonnement produits dans une nébuleuse planétaire.

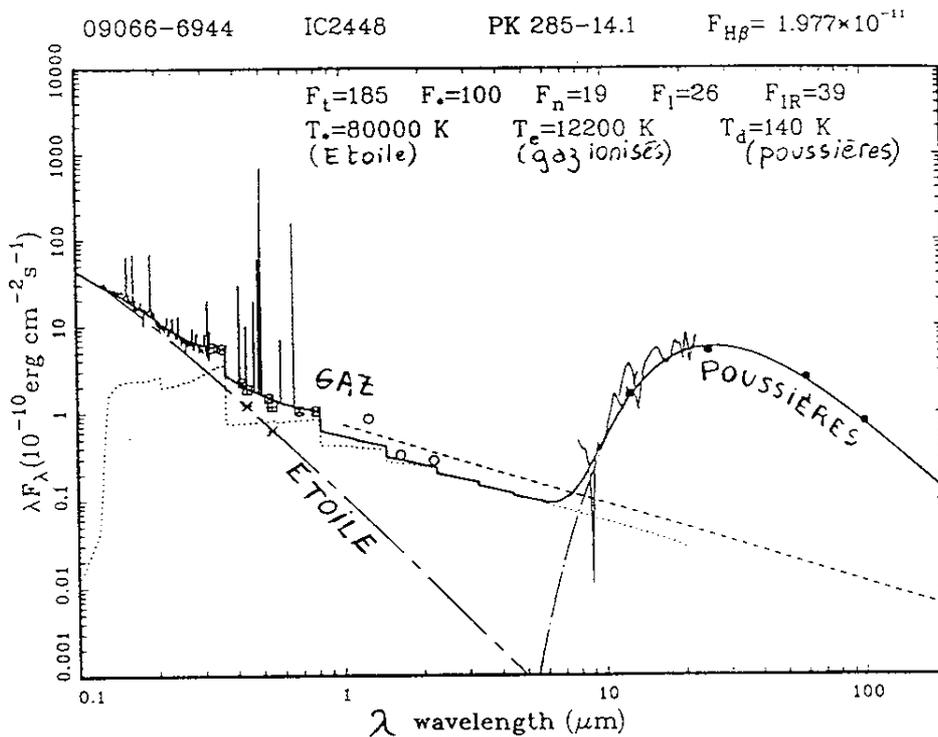


FIG. 6 - Distribution de l'énergie de l'UV à l'IR.
 Le spectre observé résulte de 3 composantes:
 - étoile (continu thermique, type corps noir);
 - gaz ionisés (continu free - free, raies d'émission);
 - poussières (continu thermique).
 (d'après Zhang et Kwok, 1991)

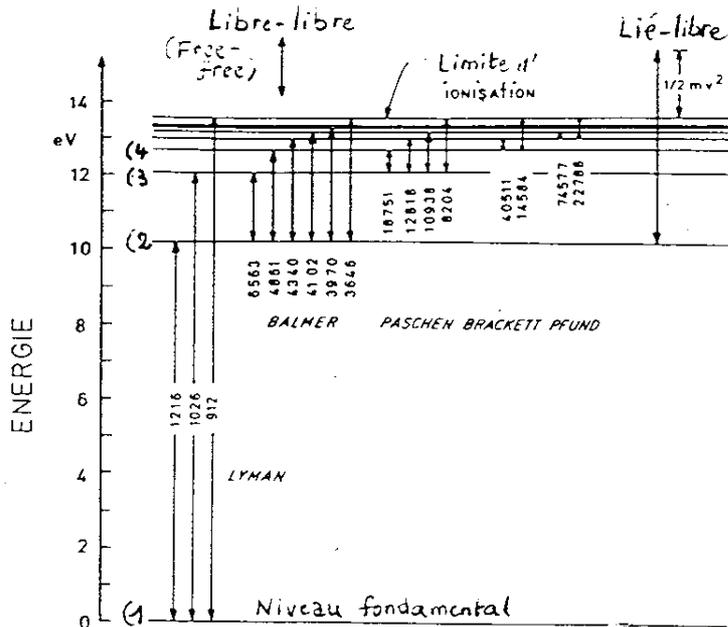


FIG.7 - Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.

Durée de vie = 10^{-8} s
(Raies de recombinaison)

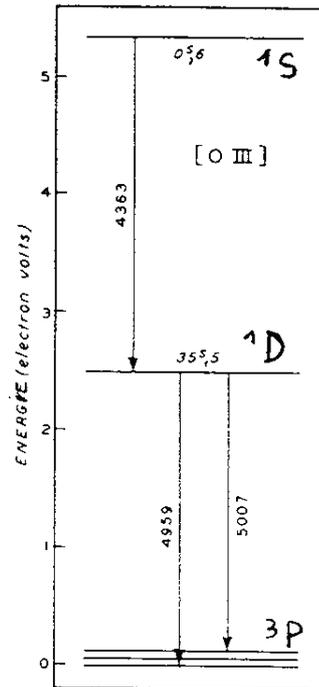


FIG.8 - Niveaux métastables de l'ion OIII.

Durées de vie = 0,6 s. et 35,5 s.
(Raies interdites)

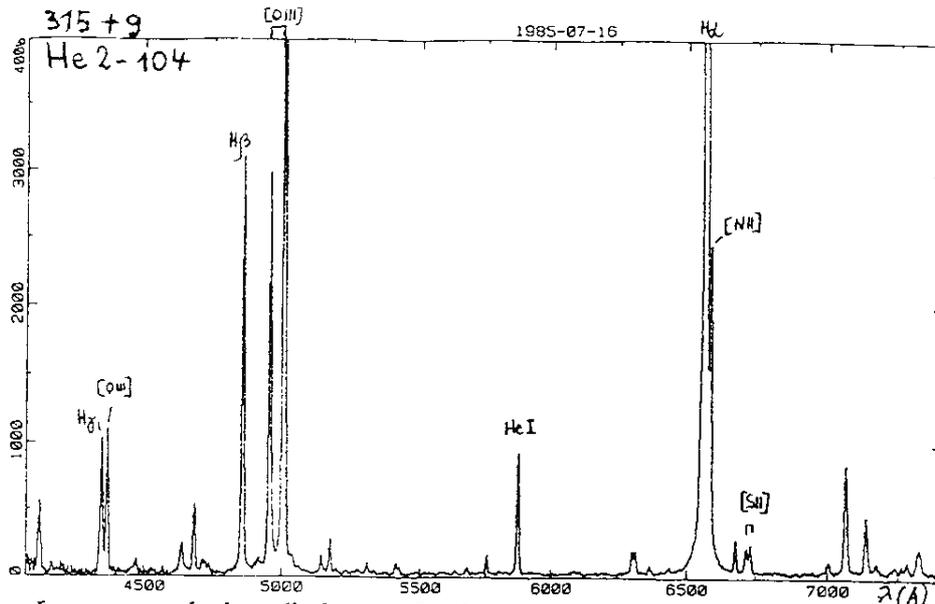


FIG. 9 - Le spectre de la nébuleuse planétaire, appelée "southern crab nebula", à cause de sa morphologie filamenteuse et bipolaire (voir fig.3), montre les typiques raies nébulaires permettant un diagnostic du plasma, en particulier: [OIII] pour la température électronique, [SII] pour la densité électronique. Le spectre de l'étoile centrale est particulier, montrant des caractéristiques d'étoile symbiotique de type "D" peu courant dans les nébuleuses planétaires (spectre pris au Télescope de 152cm de l'ESO au Chili avec spectrographe Boller & Chievens et détecteur CCD). Survey Acker-Stenholm

Des raies vertes pour refroidir les gaz !

Le doublet vert des raies [OIII] nébulaire joue le rôle de thermostat:

- La probabilité de transition spontanée depuis le niveau 1D métastable au niveau 3P , $\mathcal{P}_1 = 0,03/s$.

- La probabilité pour que l'électron quitte le niveau métastable à cause d'un choc vaut

$$\mathcal{P}_2 = 3 \times 10^{-4} \frac{\text{densité}}{\sqrt{\text{Température}}}/s.$$

Les raies [OIII] sont émises jusqu'à $\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_2$, soit: $\frac{\text{densité}}{\sqrt{\text{Temp.}}} = 100$. (valeur généralement atteinte pour des NP, où la densité $\simeq T_e = 10^4$).

Donc le rayonnement UV des étoiles chauffe les NP et la température électronique T_e augmente:

-si $(\frac{\text{dens.}}{\sqrt{T_e}}) \leq 100 \rightarrow$ [OIII] émis et donc T_e diminue.

-si $(\frac{\text{dens.}}{\sqrt{T_e}}) > 100 \rightarrow$ [OIII] n'est plus émis et donc T_e augmente.

Les raies vertes de [OIII] permettent donc de refroidir efficacement le milieu gazeux.

Le chauffage, source de l'ionisation et de l'excitation des gaz, est dû aux photons UV ($\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$) énergétiques émis par l'étoile centrale très chaude.

Ce processus est extrêmement puissant; le nombre Q_H total de photons ionisants ($\Delta E > 13,6 \text{ eV}$) est émis d'abord par les étoiles très massives (pendant 10 à 100 millions d'années, voir Fig. 10); puis, sur une échelle de temps plus longue, les photons UV sont émis par les noyaux de nébuleuses planétaires.

Il apparaît donc que c'est essentiellement grâce aux étoiles centrales des NP (étoiles les plus chaudes de la Galaxie) que les gaz du milieu interstellaire brillent.

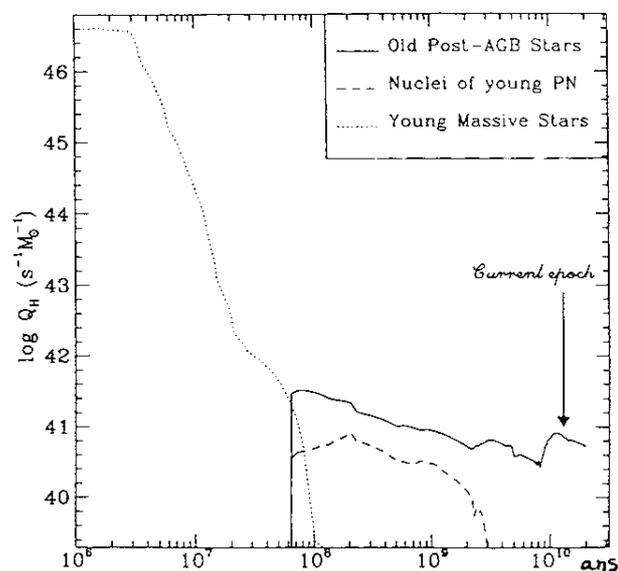


FIG. 10 - Evolution temporelle du nombre Q_H de photons ionisants pour une galaxie elliptique. (d'après Binette, Magris, Stasinska, Bruzual, 1994)

4 Les nébuleuses planétaires, agents efficaces dans l'écologie de la matière interstellaire

Les nébuleuses planétaires rejettent une fraction importante de matière vers le gaz interstellaire.

•Quantité

Toutes les étoiles de masse $< 8M_{\odot}$ (masse initiale) passent par le stade NP (3/4 étoiles dans la Galaxie).

Le noyau de NP a une masse de 0,5 à $1,4M_{\odot}$, donc la perte de masse (vents, éjections finales) par les NP est de 0,2 à $6M_{\odot}$ par étoile, soit de 0,3 à $1M_{\odot}$ par an.

•Composition

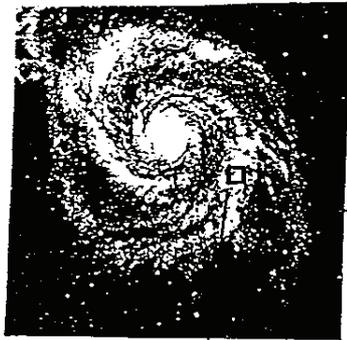
La matière éjectée est **recyclée** (plus riche en éléments lourds que la matière initiale du MIS, avec une contribution essentielle des étoiles les plus massives ($M_{\text{initiale}} \sim 5 \text{ à } 8M_{\odot}$)).

De plus les NP jouent le rôle important d' "usines à poussières", ces poussières qui vont se mélanger aux nuages moléculaires où se formeront les nouvelles étoiles.

En comparant l'apport de divers agents stellaires, on note la contribution essentielle des NP dans l'enrichissement du MIS (tableau ci-dessous et figure 11).

Processus	Taux (M_{\odot}/an)	
Formations d'étoiles (effondrement gravitationnel et morcellement des nuages moléculaires)	3 à 10	"perte" de gaz
Vents stellaires (* massives)	0,008 à 0,5	"enrichissement"
Supernovae (~ 1/300 ans)	0,03	en
Nébuleuses planétaires (éjections, après vents * AGB)	0,3 à 1	gaz du
Novae (~ 40/an)	0,003	MIS
Retombées gazeuses (du halo, du milieu intergalactique)	< 1,4	

Etudier la composition chimique des NP permet donc de connaître la composition chimique du MIS au moment de la formation de l'étoile progénitrice. Cette composition est légèrement modifiée par les nucléosynthèses internes de l'étoile, d'autant plus efficaces que l'étoile est plus massive. Les éléments chimiques les plus enrichis sont He, C et N, les rapports He/H et N/O étant de bons indicateurs de la masse (et de la température) de l'étoile (voir figure 12 b).



Composition chimique

- primordiale : H, He
 - actuelle : H, He, C, N, O, ..., Fe, ...
- "Métaux"

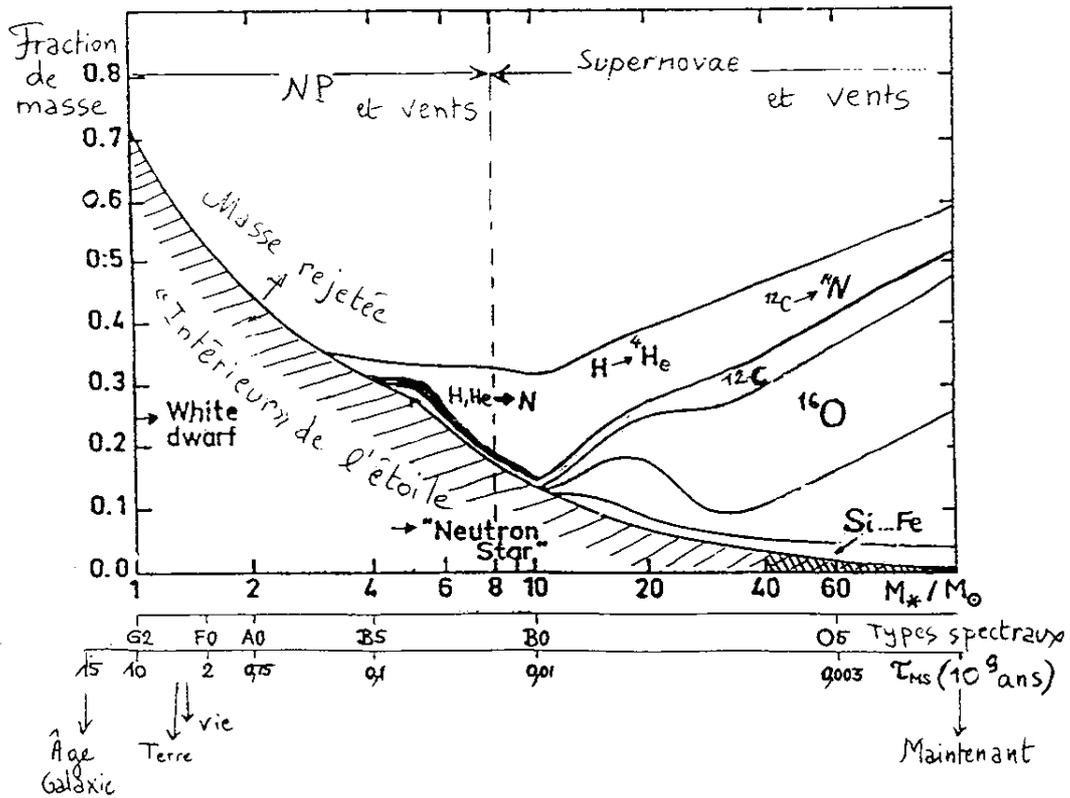
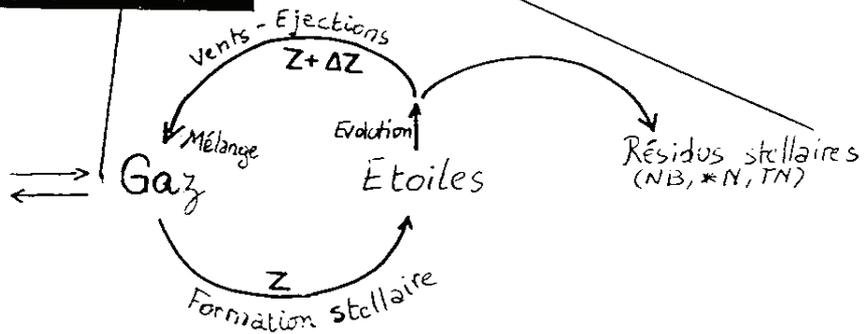


FIG. 11 - Evolution chimique de la Galaxie, par recyclage de la matière. (d'après Köppen, 1994)

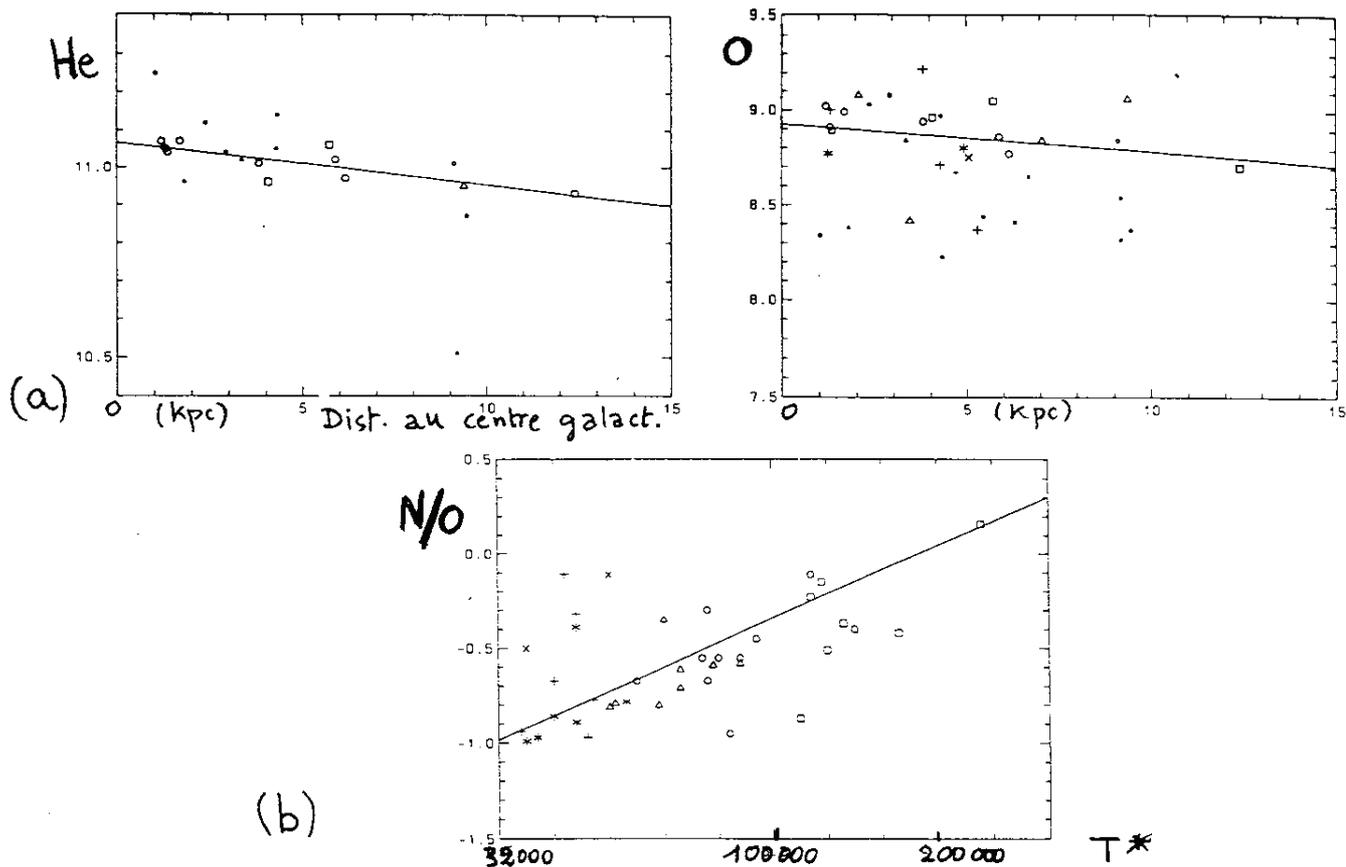


FIG. 12 - Gradients chimiques radiaux dans notre Galaxie (a) et enrichissement N/O en fonction de la température de l'étoile centrale, qui augmente avec sa masse (b) (d'après Köppen, Acker, Stenholm, 1991).

Pequignot et Baluteau (1994) ont détecté des éléments lourds dans le spectre de la jeune NP, très brillante, NGC 7027 (fig. 13), montrant ainsi que le processus nucléaire de capture de neutrons peut être effectif dans les étoiles progénitrices de NP riches en carbone (les plus massives).

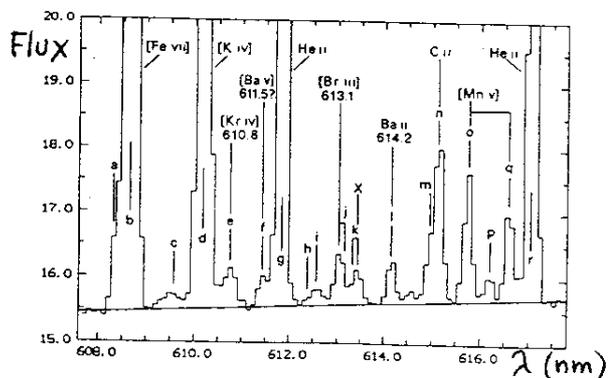


FIG. 13 - Détection de Fer, Potassium, Krypton, Barium, Manganèse dans le spectre de NGC 7027.

Conclusion

Laboratoires pour tester des modèles de photoionisation et de mécanismes hydrodynamiques, jalons dans la théorie de l'évolution stellaire, les NP jouent de plus un rôle important dans l'évolution chimique de la Galaxie. Les éléments chimiques, synthétisés par fusions nucléaires au centre des étoiles, sont rejetés par les NP dans le milieu interstellaire, qui sera enrichi peu à peu de ces cendres d'étoiles éteintes. Or, toutes les étoiles de masse initiale inférieure à 8 masses solaires subissent probablement la phase NP, ce qui représente au total une quantité énorme (de l'ordre de 15 milliards de masses solaires) de gaz reconditionnés, augmentant progressivement la métallicité du milieu interstellaire, d'où vont naître de nouvelles générations d'étoiles.

Parce que leur luminosité est concentrée dans quelques raies, les NP observées dans ces longueurs d'onde sont visibles à de très grandes distances (jusqu'aux confins de la Voie Lactée - voir Fig. 14 - et aux galaxies voisines) - quoique ces distances soient très mal connues, vu la complexité de leur histoire et les formes multiples qui en découlent.

Population couvrant une gamme étendue d'âges (typiquement 1 à 10 milliards d'années), les NP sont des traceurs précieux pour l'étude chimique de la Galaxie, et en particulier pour le bulbe et ses possibles générations récentes d'étoiles.

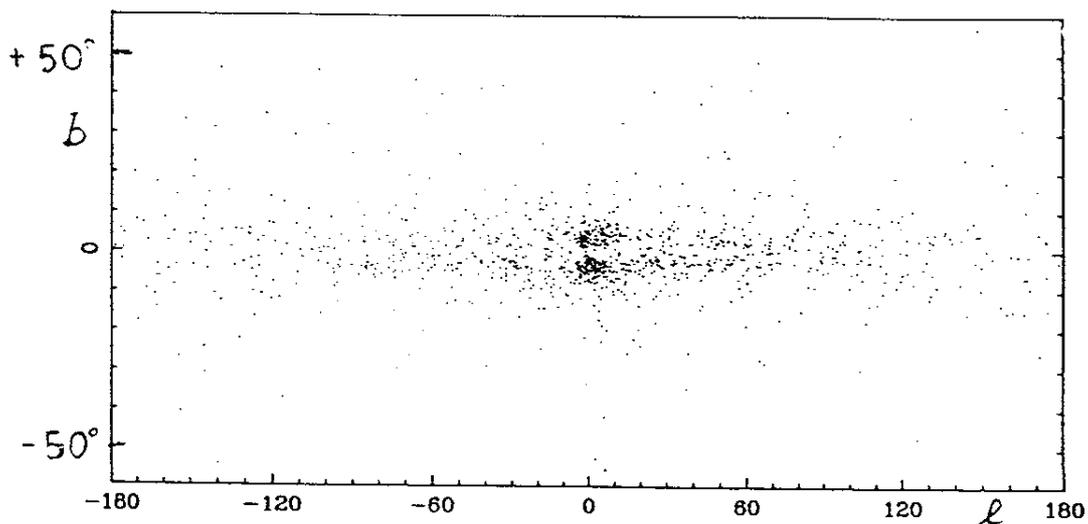


FIG. 14 - Distribution des NP dans notre galaxie, en longitude l et latitude b . On voit bien l'effet de l'extinction interstellaire dans le plan galactique ($b = 0^\circ$)