

Binaires semi-détachées : taxonomie

Jean-Marie Hameury

Observatoire de Strasbourg

Abstract.

We discuss here compact binaries in which the orbital separation is small enough that mass is transferred from one star to the other. These systems are classified according to the nature of the primary : algols for ordinary stars, cataclysmic variables for white dwarfs, and X-ray binaries for black holes and neutron stars. These classes are often studied separately, even though the same physical processes occur in all objects ; a global approach is most useful for understanding these objects and the physical processes.

On discutera ici des binaires serrées dans lesquelles la séparation est suffisamment faible pour qu'il y ait échange de matière entre les deux étoiles. La classification de ces systèmes est liée à la nature de l'étoile accrétante : algols pour la séquence principale, variables cataclysmiques pour les naines blanches, et binaires X pour les étoiles à neutrons ou les trous noirs. Ces classes sont souvent étudiées de façon séparée, mais elles révèlent des processus physiques communs ; la compréhension des objets et de la physique sous-jacente bénéficie d'une approche globale.

1. Introduction

L'accrétion, processus dans lequel de la matière tombe dans le champ gravitationnel d'un objet et libère le plus souvent une quantité d'énergie considérable, est un phénomène très général que l'on rencontre dans de nombreuses classes d'objets, depuis les noyaux actifs de galaxies jusqu'aux étoiles jeunes. Les binaires semi-détachées sont un laboratoire pour étudier ce phénomène, car ce sont des objets souvent proches et donc facilement détectables, variant sur des échelles de temps suffisamment rapides pour pouvoir être étudiés aisément. Par ailleurs, le grand nombre d'objets détectés, la diversité des conditions physiques et des paramètres permet de pouvoir tirer des conséquences générales. Ainsi, on peut espérer, en étudiant la variabilité de ces sources, contraindre les mécanismes générant la viscosité dans les disques d'accrétion dont

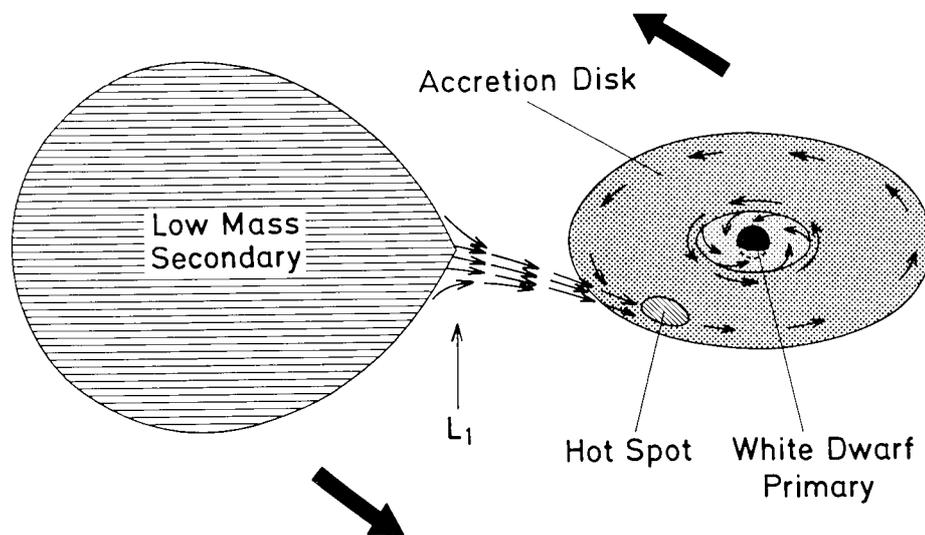


Figure 1.: *Vue schématique d'une variable cataclysmique ou d'une binaire X de faible masse. Dans le cas des CV, l'objet compact est une naine blanche ; il s'agit d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir dans les cas des binaires X. A noter que le disque est beaucoup plus brillant que l'étoile secondaire (d'après Ritter, 1985).*

on ne sait rien d'autre (ou presque) qu'il ne s'agit pas de viscosité "moléculaire", c'est à dire due aux collisions entre atomes ou ions composant le gaz du disque. Elle pourrait être d'origine turbulente ou magnétique, voire non locale (par exemple dans le cas d'ondes spirales se propageant dans les disques).

2. Les variables cataclysmiques (CV)

Pour une revue très complète et récente de ces objets, on consultera Warner (1995). Les variables cataclysmiques (voir Fig. 1) sont des systèmes binaires comportant une étoile ordinaire, souvent sur la séquence principale ou peu évoluée, qui est fortement déformée par la présence d'un compagnon naine blanche ; elle remplit son lobe de Roche (voir plus loin une description détaillée de la géométrie de Roche), et transfère de la masse sur la naine blanche. La matière qui quitte la secondaire possède trop de moment cinétique pour que sa trajectoire balistique rencontre la surface de la naine blanche ; elle forme un disque d'accrétion dans lequel la matière spirale lentement vers la naine blanche sous l'effet

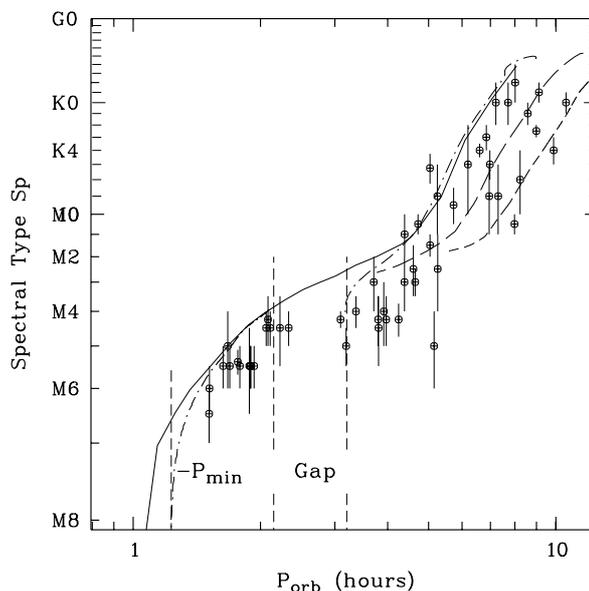


Figure 2.: *Type spectral en fonction de la période orbitale. Le trait plein indique la position de la séquence principale, tandis que la courbe en tirets-points-tirets indique la déviation de la séquence principale sous l'effet du seul transfert de masse ; les courbes en tirets illustrent les effets de l'évolution nucléaire avant le début de la phase semi-détachée : étoile modérément évoluée (courbe du haut) ou à la fin de la séquence principale (courbe du bas). Figure extraite de Beuermann et al. 1998.*

de la viscosité. La matière quitte la secondaire par le point de Lagrange L_1 , et forme un écoulement très collimaté, qui interagit avec le disque en formant une “tache chaude”. On verra plus loin que chacune des composantes du système, étoile secondaire, naine blanche, disque d'accrétion et tache chaude, est parfaitement observée ; le schéma de la figure 1 n'est donc pas une pure vue de l'esprit !

L'émission dans l'infrarouge et le rouge provient surtout du compagnon. Les observations indiquent que celui-ci est de type spectral tardif (voir la figure 2). A courte période (en dessous de 3 heures), la secondaire est proche de la séquence principale, tandis qu'à plus longue période, celle-ci s'en écarte un peu, à cause d'une évolution nucléaire, et/ou du transfert de masse (Beuermann et al. 1998). L'effet de la déformation de la secondaire sur sa luminosité, bien que détectable (voir le chapitre sur la géométrie de Roche), est modeste. Par contre, cette déformation est largement suffisante pour assurer le synchronisme de la rotation de la

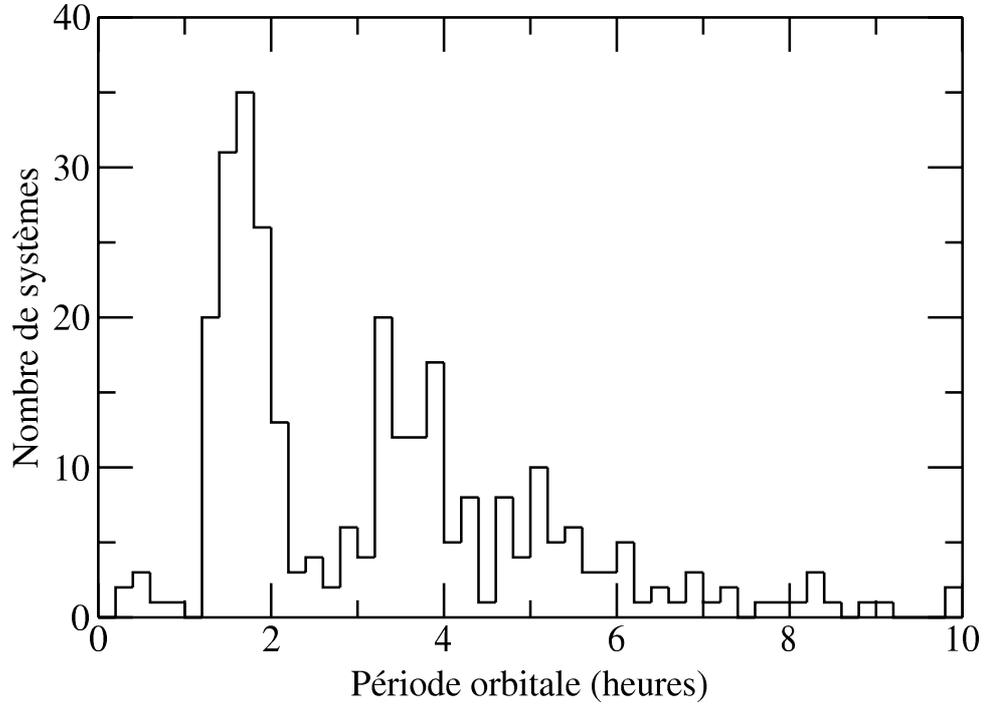


Figure 3.: *Distribution en période orbitale des variables cataclysmiques.*

secondaire avec celle du système binaire. Le disque rayonne dans le visible et l'ultraviolet, tandis que la naine blanche peut être détectée dans l'extrême ultraviolet et éventuellement le domaine X. Le plus souvent, l'essentiel de la luminosité provient de l'accrétion :

$$L_{\text{acc}} = \frac{GM_1\dot{M}}{R_1} \simeq 10^{33-34} \text{ erg s}^{-1} \quad (1)$$

où M_1 et R_1 sont la masse et le rayon de la naine blanche, et \dot{M} le taux d'accrétion. Cette luminosité est souvent supérieure d'un ordre de grandeur à la luminosité du compagnon.

Les variables cataclysmiques sont nombreuses : on en connaît quelques centaines, situées à une distance typique de 100 pc ; on estime à 200 000 le nombre total de tels systèmes dans la galaxie.

La figure 3 donne la distribution en période des CV. On voit clairement plusieurs caractéristiques marquées : d'une part, l'absence de systèmes en dessous d'une période de 80 minutes, appelée *période minimum*, d'autre part, une déficience entre 2 et 3 heures (*period gap*), et

enfin une période maximum de l'ordre de 10 heures, au-delà de laquelle les systèmes sont très rares. Cette distribution reflète l'évolution séculaire de ces systèmes, car le temps caractéristique de transfert de masse,

$$t_{\dot{M}} = \frac{M_2}{\dot{M}} \simeq 10^9 \text{ ans} \quad (2)$$

est largement inférieur au temps de Hubble, au moins tant que le taux de transfert de masse n'est pas trop petit.

Les CV sont donc des objets proches, brillants, (relativement) faciles à observer, et qui peuvent donc servir de référence pour des objets plus complexes ou plus distants. Elles ont par contre l'inconvénient d'émettre l'essentiel de leur luminosité dans le domaine ultraviolet, ce qui rend très malaisé la détermination de leur luminosité bolométrique et donc du taux de transfert de masse.

2.1 Zoologie des CV

AM Her ou Polars Le nom de cette classe vient de AM Herculis, qui en est l'archétype. Il s'agit de CV dans laquelle la naine blanche est très fortement magnétisée, avec des champs magnétiques dépassant 10^7 G. Le moment magnétique μ , atteint ou dépasse 10^{34} Gcm³, 1000 fois plus que celui des pulsars. Le champ de la naine blanche est alors suffisamment important pour contrôler l'ensemble du système. La rotation de la primaire est synchrone avec celle de la secondaire et du système binaire ; il n'y a pas de disque d'accrétion, l'écoulement de matière suivant les lignes de champ magnétique depuis le point de Lagrange L_1 jusqu'à la surface de la naine blanche. L'écoulement forme près de la surface ce qu'on appelle une "colonne d'accrétion", de faible section (un dix-millième de la surface totale de la naine blanche), dans laquelle se produit un choc. La température du plasma choqué atteint la température du viriel :

$$kT = \frac{GM_1 m_p}{R_1} \quad (3)$$

soit quelque 10 keV ; ce plasma chaud rayonne dans le domaine X dur par rayonnement libre-libre ; il émet aussi du rayonnement cyclotron polarisé dans le domaine optique (d'où le nom de "polar"). A noter enfin que l'essentiel du rayonnement est émis dans le domaine X mou, une fraction importante de l'énergie d'accrétion étant thermalisée sous la photosphère de la naine blanche.

DQ Her ou Polars intermédiaires Dans ces objets, la naine blanche est magnétisée, moins que dans les polars, ce qui fait que la période de rotation de la naine blanche ne coïncide pas avec la période orbitale. Les

champs sont de l'ordre de 10^6 G ou légèrement supérieurs. Il se forme la plupart du temps un disque d'accrétion, mais celui-ci est tronqué au point où le champ magnétique de la naine blanche est assez intense pour contrôler l'écoulement. Au voisinage de la naine blanche, il se forme encore une colonne d'accrétion, plus large que dans le cas des polars, qui émet un rayonnement X dur. Le champ étant plus faible, l'émission cyclotron est décalée dans l'infrarouge, et on observe dans quelques cas un faible taux de polarisation dans l'infrarouge.

Novae Les novae sont connues depuis l'antiquité, tant l'amplitude des variations de ces sources est importante, typiquement 9 magnitudes. On observe en moyenne une fois tous les 10 ans une nova plus brillante que $m_V = 3$. L'éruption est due à l'instabilité de la combustion de l'hydrogène dans la couche de matière qui s'accumule lentement à la surface de la naine blanche. Il y a mélange avec la matière de la naine blanche, qui enrichit les couches superficielles en CNO ; lorsque la pression à la base du mélange hydrogène - CNO est telle que le gaz est dégénéré, et ne réagit plus aux perturbations de température, les réactions nucléaires s'emballent, et deviennent explosives. L'enveloppe, de 10^{-5} à $10^{-3} M_\odot$, riche en métaux (métallicité de l'ordre de 0.4) est éjectée. Le phénomène est récurrent, avec un temps qui dépend du taux de transfert de masse et de la masse de la naine blanche, et est en général de plusieurs milliers d'années, les novae dites récurrentes étant le cas extrême où le temps de récurrence est de quelques années.

Novae naines Ces objets présentent des éruptions plus ou moins régulières de typiquement 5 magnitudes, qui durent quelques jours et se répètent tous les mois, ces paramètres étant très variables d'une source à l'autre. Ces éruptions sont dues à une instabilité du disque d'accrétion, ce qui les rend particulièrement intéressantes, puisqu'on peut espérer, en les modélisant, contraindre la viscosité. On peut montrer que cette instabilité, qui se déclenche lorsqu'une des régions du disque est partiellement ionisée, se produit lorsque le taux de transfert de masse est compris entre une valeur minimum, généralement trop faible pour être d'intérêt, et une valeur maximum.

On distingue plusieurs sous-classes, en fonction de l'allure des éruptions. Les systèmes de type Z Cam ont un taux de transfert élevé, et sont proches de la stabilité. Ils présentent de longs états brillants d'éruption permanente, séparés par des phases montrant de fréquents sursauts. Les systèmes de type U Gem ou Z Cha sont les plus réguliers, tandis que les systèmes de type SU UMa présentent des "superéruptions" en plus des éruptions normales, plus brillantes et plus longues que ces dernières.

Sources X Supersoft (SSS) Ces sources ont été détectées par le satellite ROSAT. Ce sont des sources extrêmement lumineuses (luminosité de l'ordre de 10^{38} erg s⁻¹), émettant un rayonnement thermique avec une température caractéristique de quelques dizaines d'eV. Il n'est pas sûr que ces sources forment une classe unique ; l'explication qui prévaut aujourd'hui est qu'il s'agit de naines blanches accrétant de la matière d'un compagnon à un taux très élevé (de l'ordre de 10^{-7} M_⊙ par an), de sorte que la combustion de l'hydrogène se fait dans un régime non dégénéré et donc stable. Ceci rend compte des luminosités importantes observées, ainsi que de la faible température effective.

Novae like Il s'agit d'une classe fourre-tout, qui regroupe les systèmes ne montrant aucune des caractéristiques décrites plus haut.

3. Binaires X de faible masse (LMXB)

Les binaires X se séparent en deux classes, très différentes, en fonction de leur luminosité optique : celles dont l'émission est dominée par l'optique, et celles où l'essentiel de l'énergie est émise dans le domaine X. Dans le premier cas, le compagnon est une étoile massive (étoile O ou B), et on parle de binaire X massive, alors que dans le second cas, le compagnon est moins massif qu'une ou deux masses solaires ; on parle alors de binaires X de faible masse (LMXB). On trouvera des revues détaillées sur ces systèmes dans Lewin et al. (1995)

Les LMXB sont très semblables aux variables cataclysmiques, à ceci près que la naine blanche est remplacée par une étoile à neutrons ou un trou noir. Le puits de potentiel étant 1000 fois plus profond, on s'attend bien sûr à ce que les luminosités soient plus importantes. La luminosité d'accrétion vaut

$$L_X = \frac{GM_1\dot{M}}{R_1} = \alpha\dot{M}c^2 \quad (4)$$

où $\alpha \sim 0.1$ aussi bien dans le cas d'une étoile à neutrons que d'un trou noir. Pour un rayonnement de corps noir, et pour une surface émissive égale à celle d'une étoile à neutrons, on obtient une température de l'ordre du keV ; en pratique, le rayonnement n'est pas tout à fait un rayonnement de corps noir, et la température de couleur est de quelques keV. Les LMXB sont des objets très lumineux, émettant dans une gamme d'énergie dans laquelle le milieu interstellaire est pratiquement transparent ; on voit donc les binaires X dans toute la galaxie. Et d'ailleurs, leur répartition spatiale montre clairement la structure galactique (Fig. 4). Elles sont concentrées dans le bulbe galactique et le disque épais ; on notera également que les amas globulaires, s'ils ne contiennent qu'une très petite fraction de la masse galactique, renferment une fraction notable

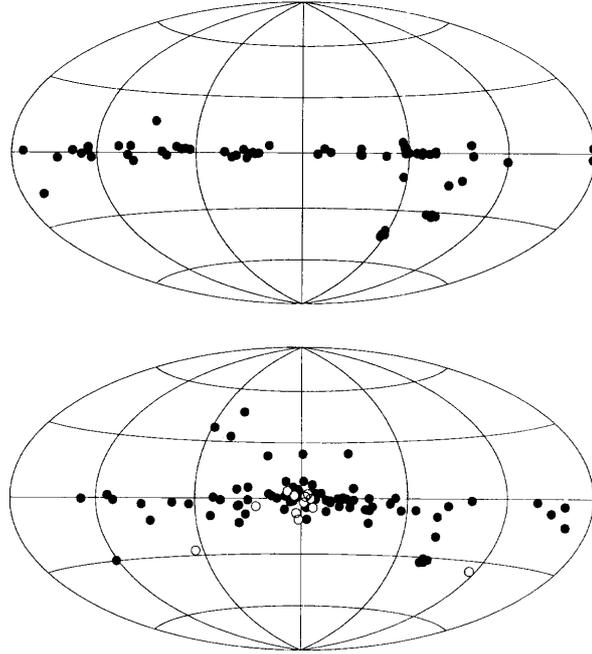


Figure 4.: *Position en coordonnées galactiques des binaires massives (haut) et de faible masse (bas). Les LMXB situées dans les amas globulaires sont indiquées par des cercles ouverts; ne figurent pas les 27 LMXB situées à moins de 2 degrés du centre galactique, par souci de clarté (tiré de van Paradijs, 1998).*

des LMXB, ce qui révèle un mode de formation particulier des LMXB dans les amas.

On connaît une centaine de LMXB dans la Galaxie, plus quelques autres dans les nuages de Magellan et les galaxies proches.

L'émission X provient du voisinage de l'objet compact : des régions internes du disque d'accrétion, mais également, dans le cas où la binaire contient une étoile à neutrons, de sa surface et de la couche limite entre l'étoile et le disque. L'émission optique est dominée par la contribution du disque ; on ne peut voir la secondaire que lorsque l'accrétion sur l'objet compact se fait à taux très bas dans les systèmes transitoires (voir plus loin). Dans la plupart des systèmes, le rapport entre les luminosités X et optique, L_X/L_{opt} , est compris entre 10^2 et 10^4 . Les effets d'illumination du disque et du compagnon par le rayonnement X sont très importants, et, dans nombre de systèmes, le compagnon reçoit un flux X supérieur de plusieurs ordres de grandeur à son flux intrinsèque résultant des réactions nucléaires.

Les variations temporelles du flux X sont extrêmement riches, les échelles de temps allant de la milliseconde à la dizaine d'années. Les périodes orbitales sont comprises entre 11 minutes pour le système le plus serré, composé d'une naine blanche et d'une étoile à neutrons, à plusieurs jours ; cette distribution diffère assez sensiblement de celle des variables cataclysmiques, et indique que les compagnons sont souvent évolués. Parmi les autres variabilités temporelles, il faut citer les oscillations quasi-périodiques, auxquelles un chapitre est consacré ; la classification de ces sources en fonction des caractéristiques de ces oscillations (sources "atoll", "banane", "Z") a donné lieu à de nombreux développements qui ne seront pas abordés ici.

Ce n'est que très récemment que des oscillations cohérentes à des fréquences de quelques centaines de Hz ont été détectées, révélant la période de rotation d'une étoile à neutrons faiblement magnétisée. A une exception près (Her X1 – mais cette source est intermédiaire entre les binaires X massives et de faible masse), les étoiles à neutrons des LMXB ont des champs magnétiques très inférieurs à ceux des pulsars normaux ; ils sont par contre du même ordre de grandeur que ceux des pulsars millisecondes, qui ont pour progéniteurs les LMXB.

3.1 Zoologie

Sursauts X de type I Les sursauts X de type I sont dus à l'instabilité des réactions nucléaires dans la couche de matière qui s'accumule à la surface de l'étoile à neutrons. La température est suffisamment élevée pour que la combustion de l'hydrogène se produise dans des régions où le gaz n'est pas dégénéré, et celle-ci est donc stable ; il n'en va pas de même des réactions de combustion de l'hélium qui se produisent à haute densité. Il s'agit donc d'un mécanisme similaire à celui des novae ; cependant, la très forte gravité à la surface d'une étoile à neutrons (10^6 fois celle à la surface d'une naine blanche), et la petite taille de l'étoile font que la masse de gaz non dégénéré capable de s'accumuler à la surface de l'étoile est très réduite (de l'ordre de $10^{-12} M_{\odot}$) ; le phénomène est donc beaucoup moins spectaculaire qu'une nova : une durée de quelques secondes, une énergie totale émise d'environ 10^{39} ergs, la luminosité pouvant atteindre la limite d'Eddington. Le spectre X est thermique, l'évolution spectrale indiquant une décroissance de la température dans le temps. Le temps de récurrence de ces sursauts est de quelques heures.

Un des intérêts des sursauts X est qu'ils attestent de façon irréfutable de la présence d'une étoile à neutrons, puisque la matière ne peut s'accumuler sur un trou noir, qui n'a pas de surface solide.

Sursauts X de type II Il existe également une autre catégorie de sursauts X, les sursauts X de type II, qui n'avaient jusqu'à peu été observés que

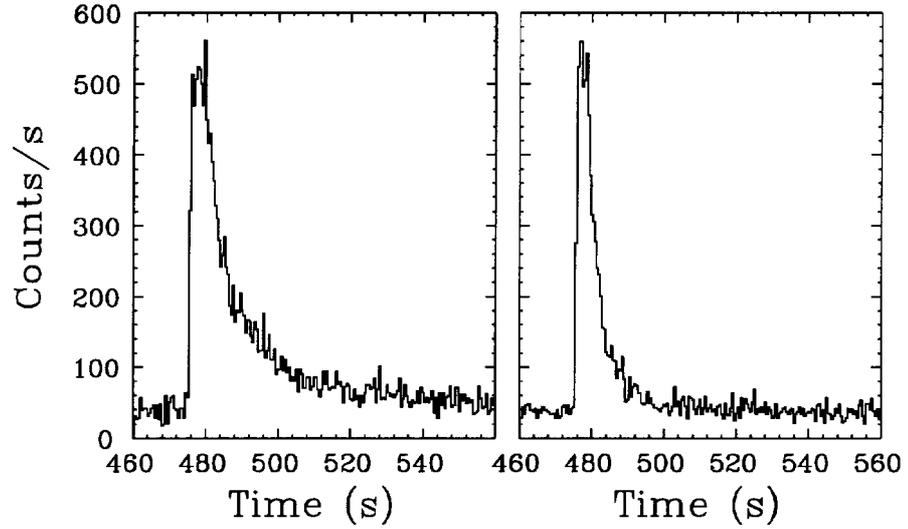


Figure 5.: *Sursaut X de type I émis par la source 3U 1702-42, observé par Exosat dans la gamme d'énergie 1.2 – 5.3 keV (gauche) et 5.3 – 19 keV (droite). La décroissance plus rapide du sursaut à haute énergie s'explique par le refroidissement de la surface de l'étoile chauffée par l'explosion du gaz accumulé (tiré de van Paradijs, 1998).*

dans une seule source, le “rapid burster”. Ces sursauts, qui ne montrent pas d'évolution spectrale dans le temps, sont dus à une instabilité de l'accrétion au voisinage de l'objet compact. Leur temps de récurrence est de quelques minutes. Certaines sources, telles GRS 1915+105 présentent une variabilité temporelle plus ou moins régulière, mais extrêmement complexe, sur des échelles de temps de quelques secondes à quelques minutes.

Sources transitoires X molles (SXT) ou novae X Ces sources, pratiquement indétectables pendant des périodes allant de 1 an à quelques dizaine d'années (luminosité inférieure ou de l'ordre de 10^{32-33} erg s⁻¹, approchent la limite d'Eddington pendant des phases actives durant quelques semaines. Pendant les phases de quiescence, on est parfois capable de détecter le compagnon, ce qui permet de déterminer la masse de l'objet compact ; dans plusieurs cas, il s'est avéré que celle-ci était notablement supérieure à $3 M_{\odot}$, ce qui permet d'affirmer qu'il s'agit d'un trou noir (A0620-00, GRO J1655-40, etc.). Dans d'autres cas, la détection de sursauts X indique la présence d'une étoile à neutrons.

Il est généralement admis que le mécanisme responsable du caractère transitoire de ces sources est la même instabilité thermique et visqueuse du disque d'accrétion que celle qui explique les éruptions des

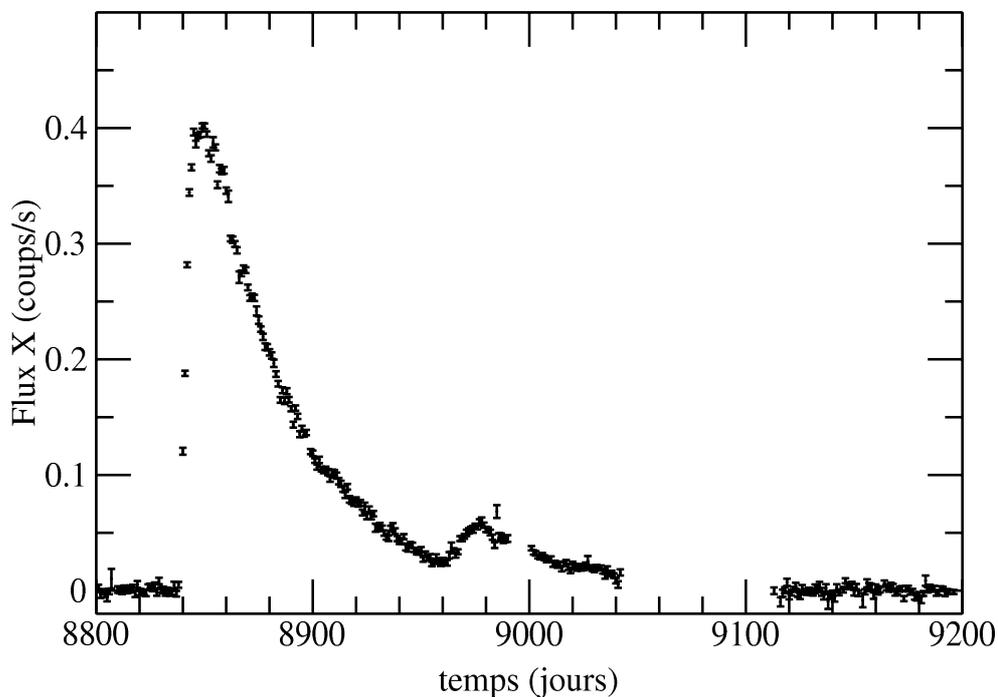


Figure 6.: *Courbe de lumière dans la gamme 40 – 150 keV de la source transitoire GRO J0422+32 observée par BATSE.*

novae naines. Cependant, de nombreux points restent encore à éclaircir ; le rôle exact de l'illumination du disque d'accrétion, sa forme (il est possible que le disque soit gauchi) sont encore mal compris.

Pour une revue détaillée des novae X, on pourra consulter Tanaka & Shibazaki (1996).

Dipper Si très peu de LMXB présentent des éclipses, certaines ont des modulations orbitales que l'on interprète comme dues à des structures du disque d'accrétion fixes dans le repère en corotation avec le système (voir la figure 7).

4. Binaires X massives (HMXB)

Ces systèmes sont composés d'une étoile massive, de type O ou B, et d'une étoile à neutrons ou un trou noir. Cette étoile massive possède un vent, avec des taux de perte de masse pouvant atteindre $10^{-6} M_{\odot}$ par an,

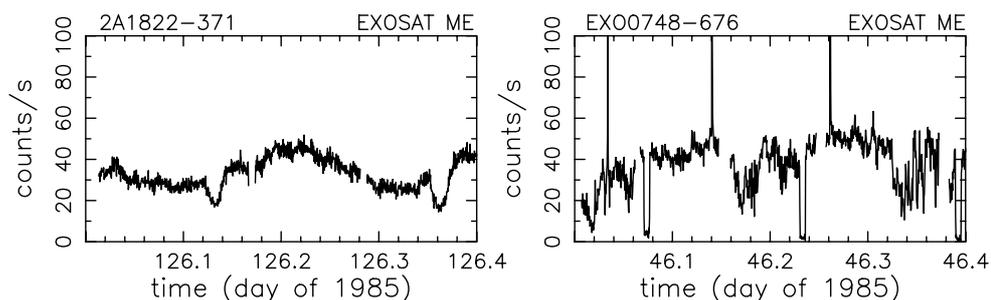


Figure 7.: Deux exemples de variations orbitales de LMXB observées par EXOSAT. Les variations lentes de 2A 1822-371 sont dues à l'occultation d'une source X étendue par les régions externes du disque; EXO 0748-676 est remarquable, car elle montre à la fois des éclipses par le compagnon, une modulation due aux variations de l'épaisseur du disque, et trois sursauts X. (Tiré de Verbunt 1999).

et ne remplit pas son lobe de Roche; seule une petite fraction de la masse perdue est capturée par le compagnon. Le rapport L_X/L_{opt} est souvent très petit (compris entre 10^{-3} et 1). Les périodes orbitales sont longues, puisque le compagnon est gros; elles sont comprises entre 1 et 200 jours, avec une exception pour Cyg X2 qui, ayant une étoile Wolf-Rayet pour compagnon, a une période de 0.2 jours.

L'objet optique étant une étoile massive, elle doit être jeune, et la distribution galactique des HMXB suit de près la distribution du gaz.

L'étoile à neutrons est souvent fortement magnétisée, ce qui se traduit d'une part par une périodicité de l'émission X (quelques secondes en général), ainsi que par la présence de raies cyclotron dans la gamme 10 keV – 100 keV, et une émission X très dure. La période de rotation de l'étoile à neutrons varie; en général, elle décroît puisque la matière qui est accrétée possède un moment cinétique important. Certains systèmes, tels que la source EXO 2030+375, ont un comportement très erratique, qui peut s'interpréter par l'accrétion d'un vent stellaire, avec formation transitoire d'un disque d'accrétion qui peut tourner dans un sens quelconque.

4.1 Transitoires X dures

Les deux tiers des systèmes HMXB sont transitoires, devenant pendant quelques semaines des sources X brillantes puis retournant en quiescence pendant plusieurs mois ou années. Les compagnons sont des étoiles Be, qui possèdent un disque, et les sursauts se produisent lorsque l'étoile à neutrons, qui a une orbite excentrique, traverse le disque. Ces systèmes

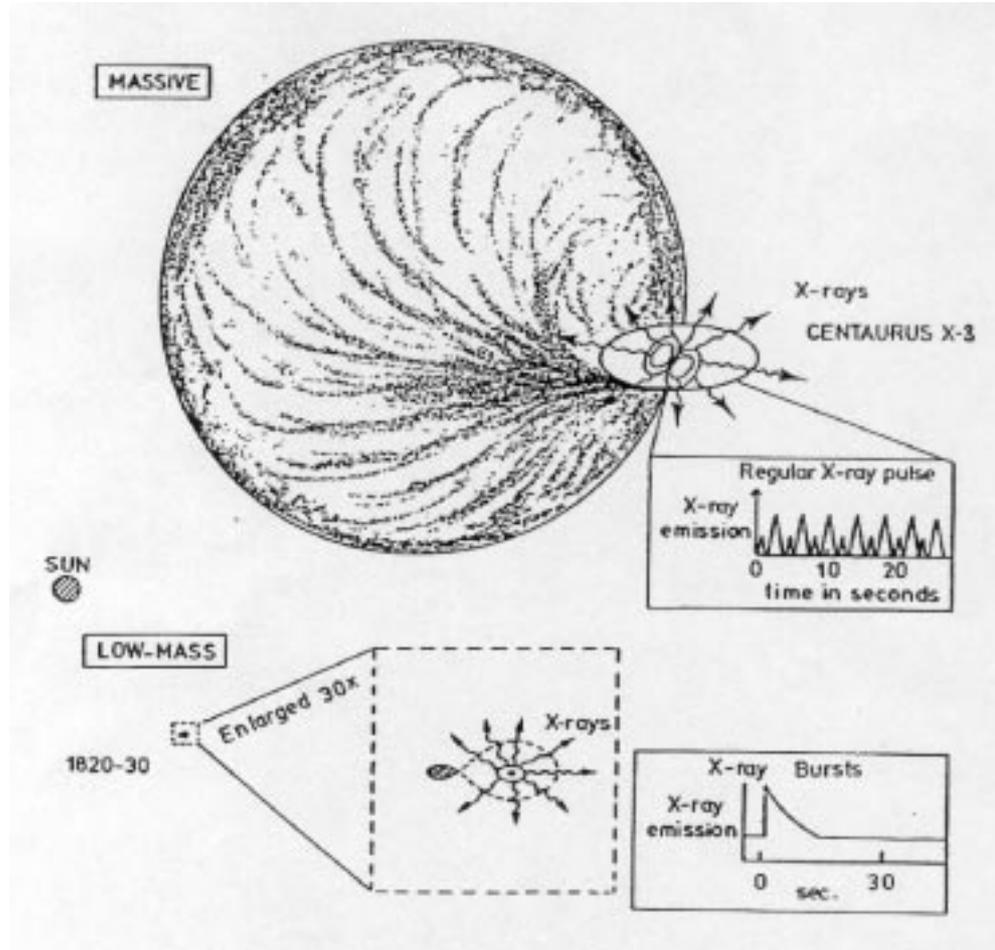


Figure 8.: Comparaison d'une binaire massive, comme Cen X-3, et d'une binaire de faible masse extrême comme 3U 1820-30, dont la période est de 11 minutes, et qui a pour compagnon une naine blanche.

sont, lors du maximum, plus brillants que les systèmes où l'accrétion se produit via le vent stellaire, ce qui en favorise la découverte.

On pourra consulter Coe (1999) ou Bildsten et al. (1997) pour une revue des étoiles Be dans les binaires X.

5. Conclusion

La table 1 fait correspondre des sous-classes d'objets qui font intervenir le même phénomène physique dans chacune des trois classes de binaires semi-détachées. On remarquera que les appellations sont très

trompeuses : outre le fait qu'on s'est parfois aperçu que les archétypes (par exemple DQ Her) peuvent bien mal représenter une classe, certaines appellations, telles que "nova X" reposent sur le fait qu'une SXT a une courbe de lumière très similaire *dans le domaine optique* à celle d'une nova (au point que l'éruption de 1916 de A0620-00 l'a fait classer comme nova – Nova Mon 1916), alors que le phénomène est fondamentalement différent. Ceci illustre, s'il en était besoin, l'utilité de l'approche multi-longueur d'onde !

Table 1.: *Equivalence des diverses classes de binaires. On a séparé les systèmes magnétiques et non magnétiques.*

CV	LMXB	HMXB
AM Her (polar)	—	—
DQ Her (polar intermédiaires)	Her X-1	Pulsars X
Nova	sursaut X de type I	—
—	sursaut X de type II	—
Nova naines	Nova X ou SXT	—
Nova like	bright sources	—
—	—	HXT(1)

(1) Les transitoires X dures contenant une étoile à neutrons magnétisée sont aussi des pulsars X.

Références

- [1] Beuermann K., Baraffe I., Kolb U., Weichold M., 1998, A&A 339, 518
- [2] Bildsten L., Cgakrabarty D., Chiu J., Finger M.H., Koh D., Nelson R.W., Prince T.A., Rubin B.C., Scott D.M., Stollberg M., Vaughan B.A., Wilson C.A., Wilson R.B., 1997, ApJS 113, 307
- [3] Coe M.J., 1999, in The Evolution of Galaxies on Cosmological timescales, J.E. Beckman & T.J. Mahoney eds., ASP Conf. Ser. 187
- [4] Lewin W.H.G., van Paradijs J., van den Heuvel E.P.J., 1995, éditeurs, *X-ray binaries*, Cambridge University Press
- [5] Ritter H., 1985, in High Energy Astrophysics and Cosmology, J. Yang & C. Zhu eds. Science Press, Beijing/Gordon & Breach Science Publishers Inc., New-York, p. 207
- [6] Tanaka Y., Shibazaki N., 1996, ARA&A 34, 607
- [7] van Paradijs J., 1998, in The Many Faces of Neutron Stars. R. Bucheri, J. van Paradijs & M. A. Alpar Eds., Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 279

- [8] Verbunt F., 1999, in *Astrophysical disks*, J.Sellwood & J.Goodman eds., ASP Conf. Ser. 160, p. 21
- [9] Warner B., 1995, *Cataclysmic Variable Stars*, Cambridge University Press