

Astronomie et Astrophysique des binaires X galactiques :

De la nature des sources X à la physique des phénomènes
liés à l'accrétion

Soutenance de HDR de Jérôme Rodriguez
Mercredi 13 Janvier 2010

Plan de la présentation

- Introduction
- Identification des sources par astrométrie et phénoménologie X
- Astrophysique des sources compactes accrétantes
 - a) Systèmes accrétant par vent
 - b) Microquasars
- Conclusions et perspectives

(I) Introduction

(II) Identification de source par astrométrie et
phénoménologie X

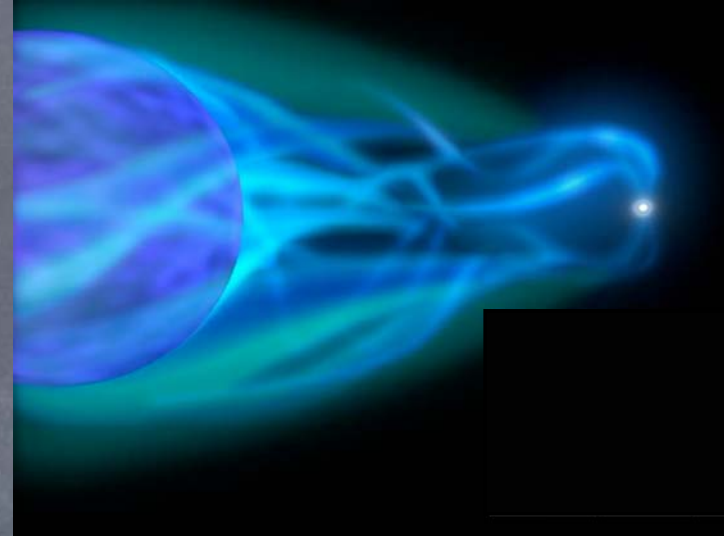
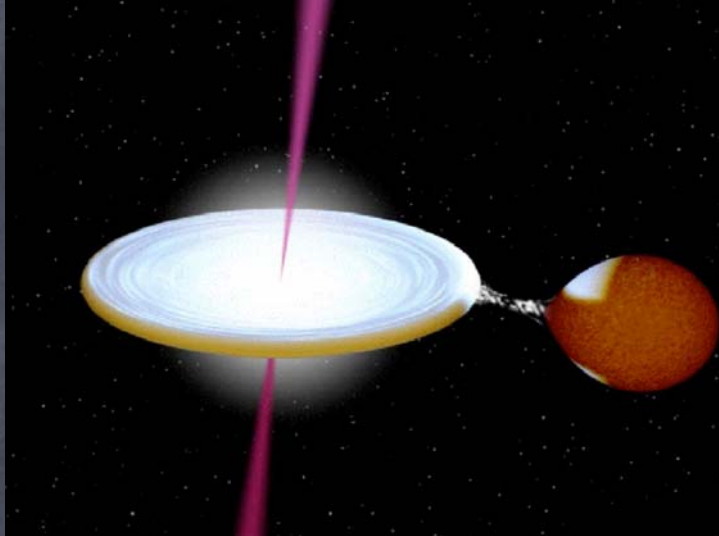
(III) Astrophysique des sources compactes
accrétantes

(I) Systèmes accrétant par vent

(II) Microquasars

(IV) Conclusions et perspectives

LMXB vs. HMXB



LMXB:

- ✓ * faible masse + OC
- ✓ Accrétion par disque+couronne
- ✓ Jets relativistes (microquasars)
- ✓ Etats spectraux
- ✓ QPO BF et HF

HMXB:

- ✓ * forte masse + pulsar
- ✓ Accrétion par vent et/ou disque
- ✓ 3 types:
 - Sg-HMXB : persistantes
 - Be-HMXB : transitoires
 - SFXT : Sg-HMXB, sursauts courts (hr)

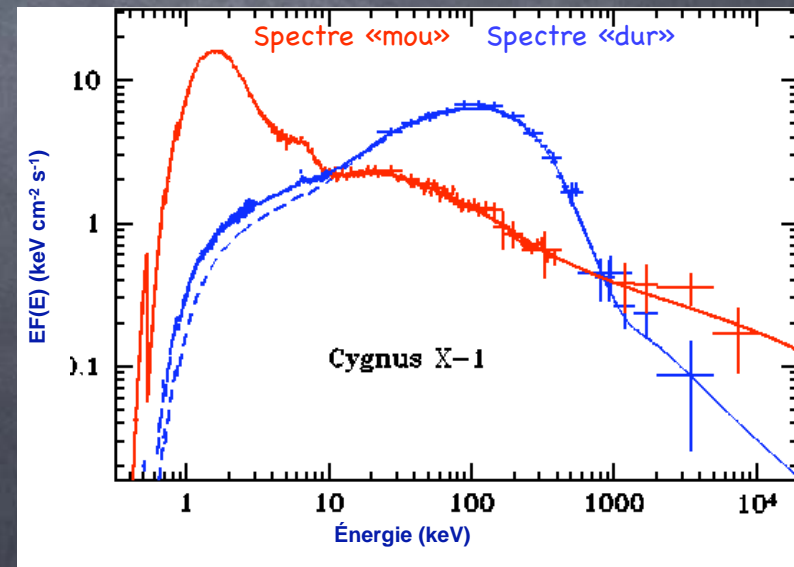
Binaires X : pourquoi/comment? (1)

- Gravitation
- Plasma : instabilités/processus de rayonnements
- Ejections relativistes
- Champs magnétiques intenses

$$L_{acc} = 2\eta G \frac{M_{OC} \times \dot{M}}{R_{OC}} \Rightarrow L_{acc} = 10^{35} \text{ erg/s}$$

$$T_b = \left(\frac{L_{acc}}{4\pi\sigma R_{OC}^2} \right)^{0.25} \simeq 0.2 \text{ keV}$$

→ Sources brillantes
Hautes-énergies



McConnell+ '02

Binaires X : pourquoi/comment? (2)

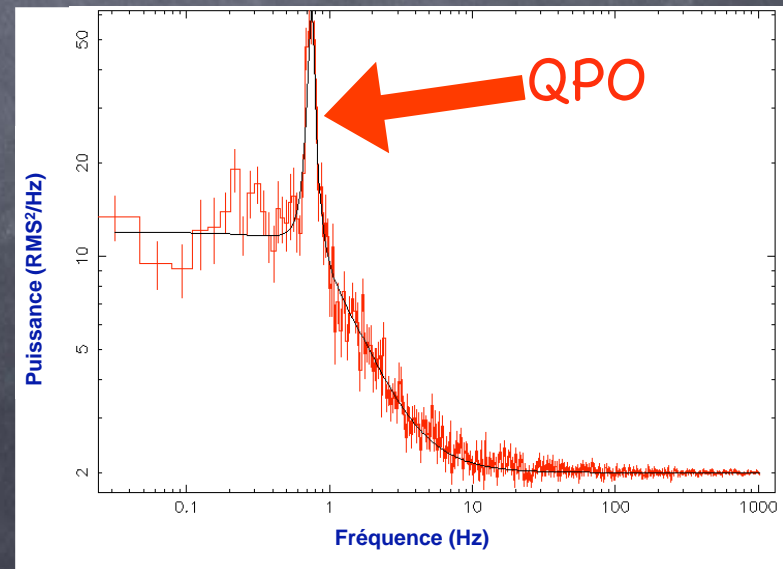
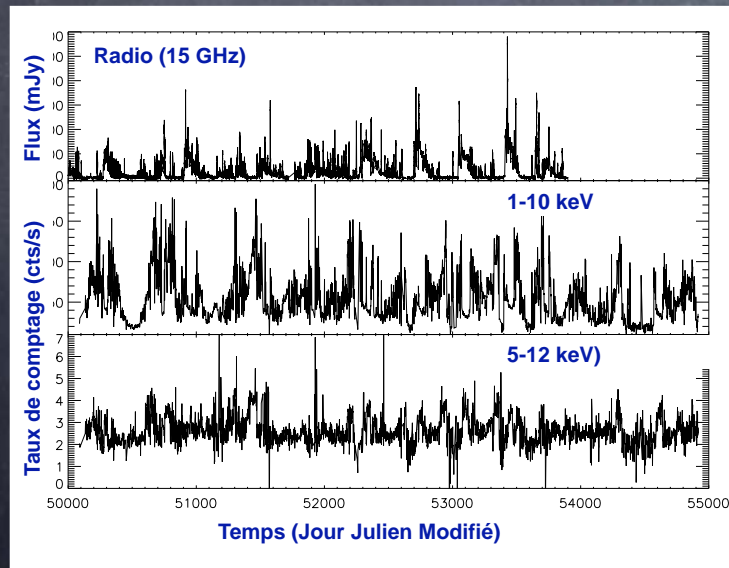
$$\tau_{\text{dyn,Kepler}} \sim \sqrt{\frac{r^3}{GM_{OC}}}$$

$$\tau_{\text{dyn,Kepler}} \sim 2 \text{ ms}(1 M_{\odot}, 100 \text{ km})$$

$$1 \text{ hr} \lesssim P_{\text{orb}} \lesssim 100 \text{ j}$$



Grande variabilité toute échelle
Suivis systématiques/photométrie



Quelques grandes questions

OC, types et populations

- Population de sources
- Evolution stellaire/galactique

Binaires X en général

- Emission Fe
- Géométrie milieux émetteurs
- Liens entre \neq milieux

Processus de rayonnement

- Origine absorption
- Variation d'absorption (HMXB)
- Excès X-mou (HMXB)

Accrétion / Ejection

- Origine matière éjectée
- Transitions spectrales
- QPO et accrétion/éjection

(I) Introduction

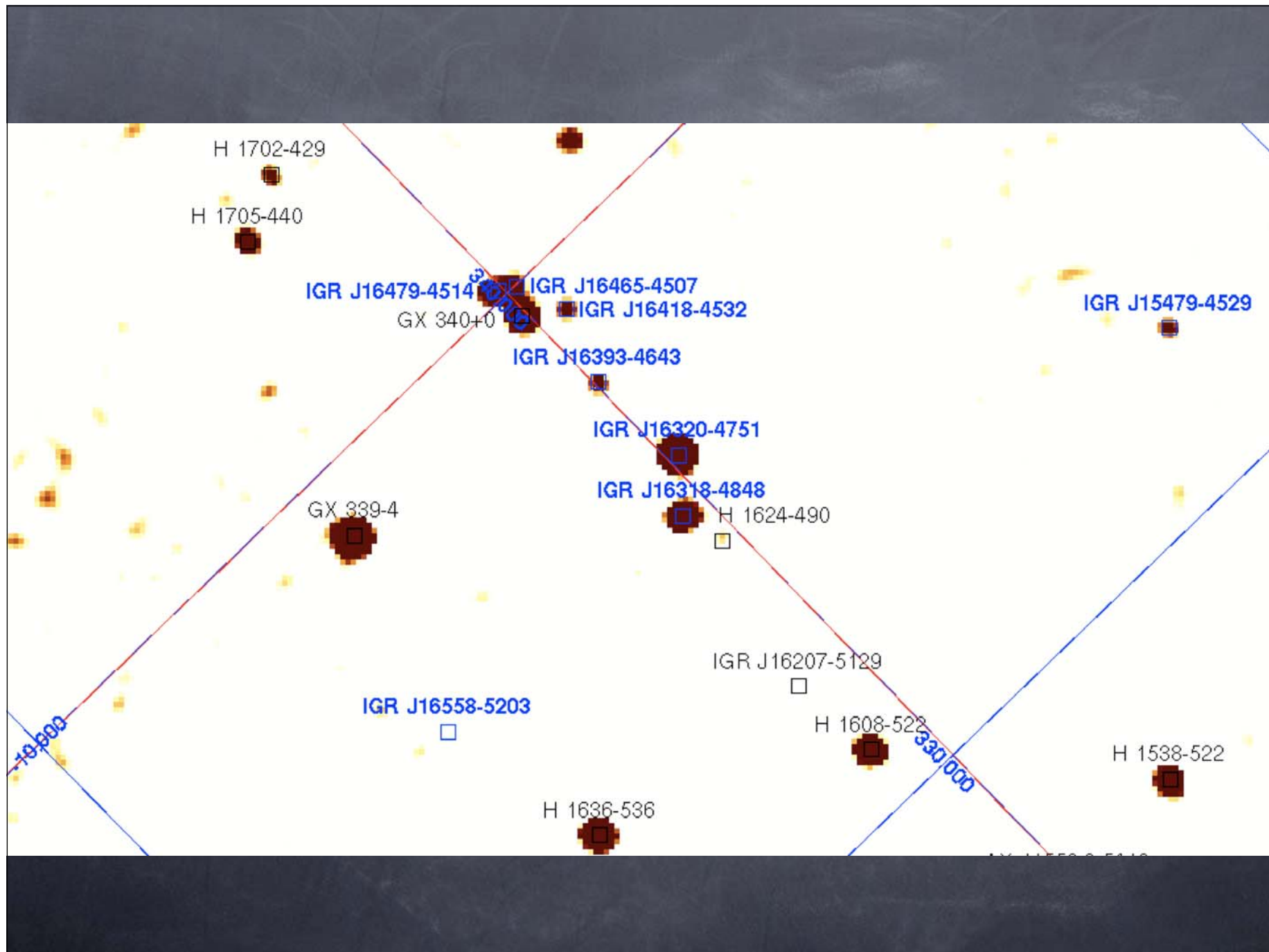
(II) Identification de source par astrométrie et
phénoménologie X

(III) Astrophysique des sources compactes
accrétantes

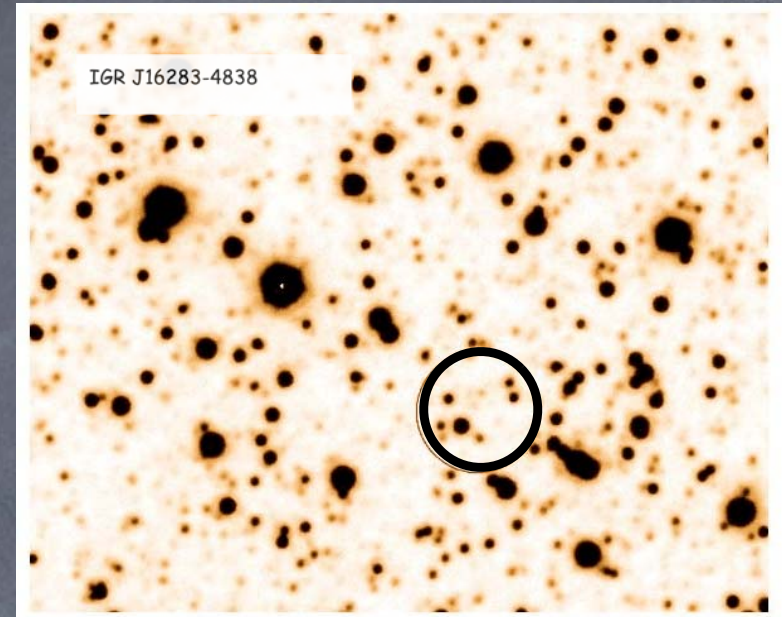
(I) Systèmes accrétant par vent

(II) Microquasars

(IV) Conclusions et perspectives



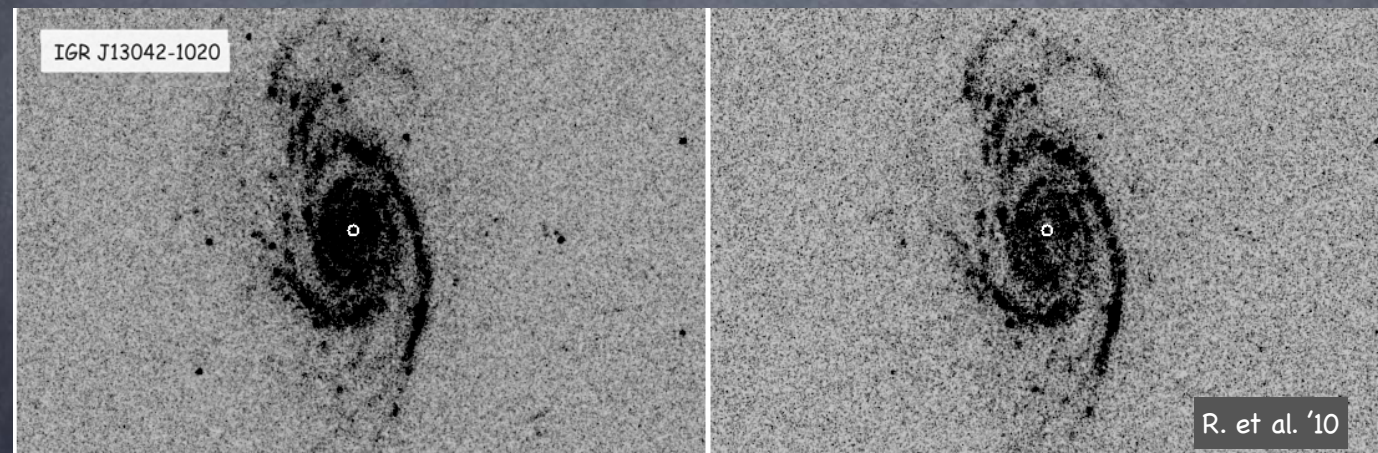
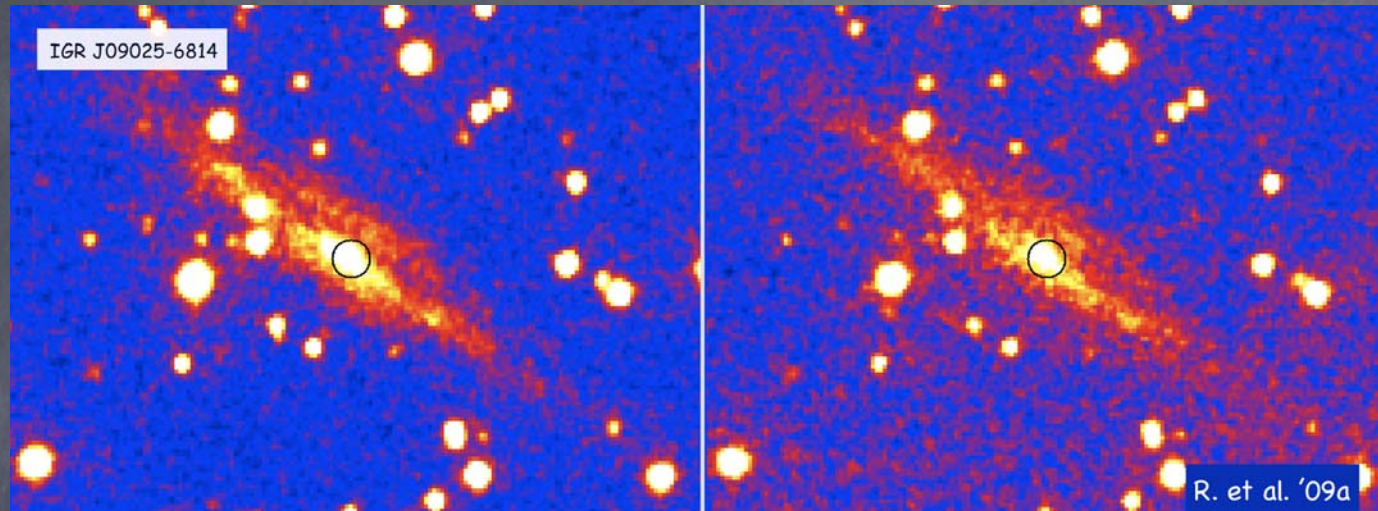
Recherche contreparties



Grande boîte d'erreur => multiples contreparties

⇒ Programmes dédiés d'observations Chandra (Tomsick+ '06, '08, '09a), XMM
(R.+ '03, '06, '10 en prep., Tomsick+ '09b), Swift (R.+ '08, '09a,b, '10 soumis)

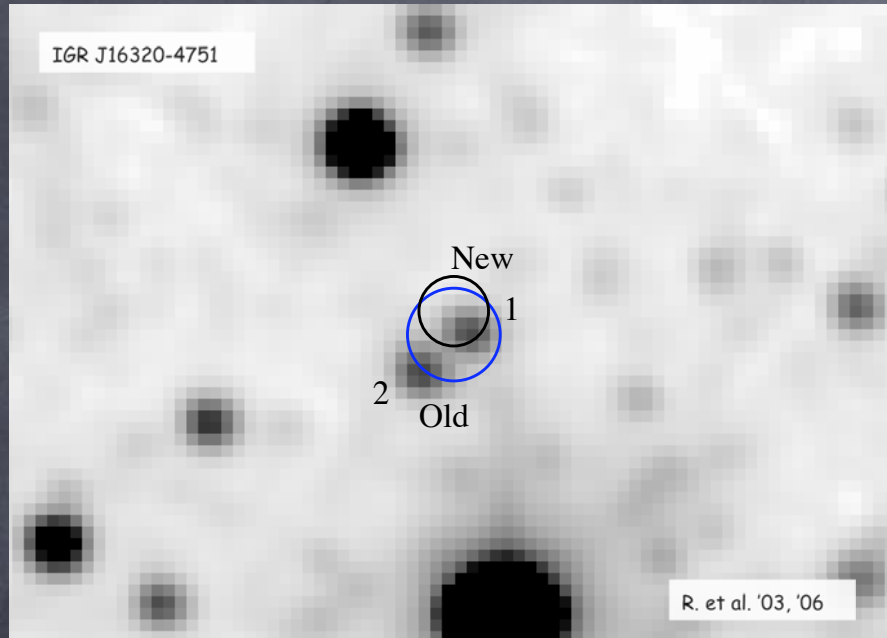
Identifications «faciles»



Galaxie hôte + distance (z)

=> luminosité => AGN

Life is not so easy



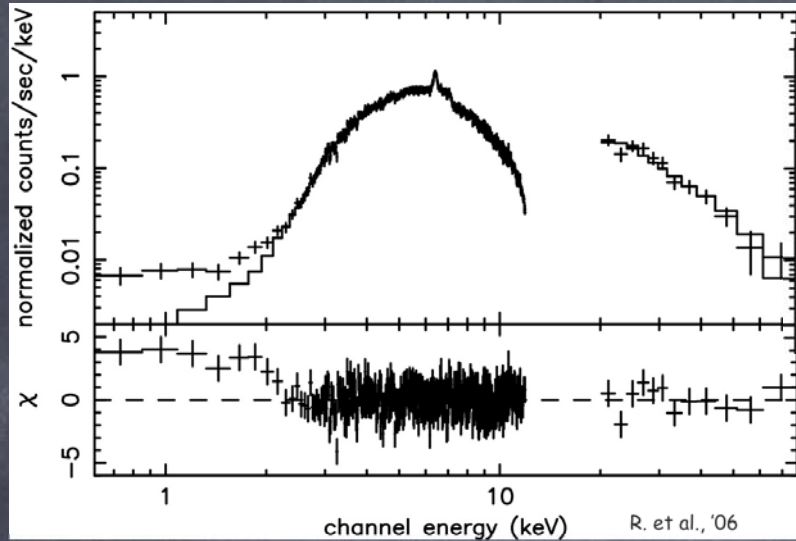
- Possibilité de multiples contreparties
- source ponctuelle: nature?

⇒ Dérougissement magnitudes IR/Visibles (R.+ '03; '09b)

⇒ Spectroscopie IR/Visible (Hannikainen+ '07; Rahoui+ '08; Chaty+ '08; Buttler+ '09)

⇒ Autres diagnostics X

Phénoménologie X



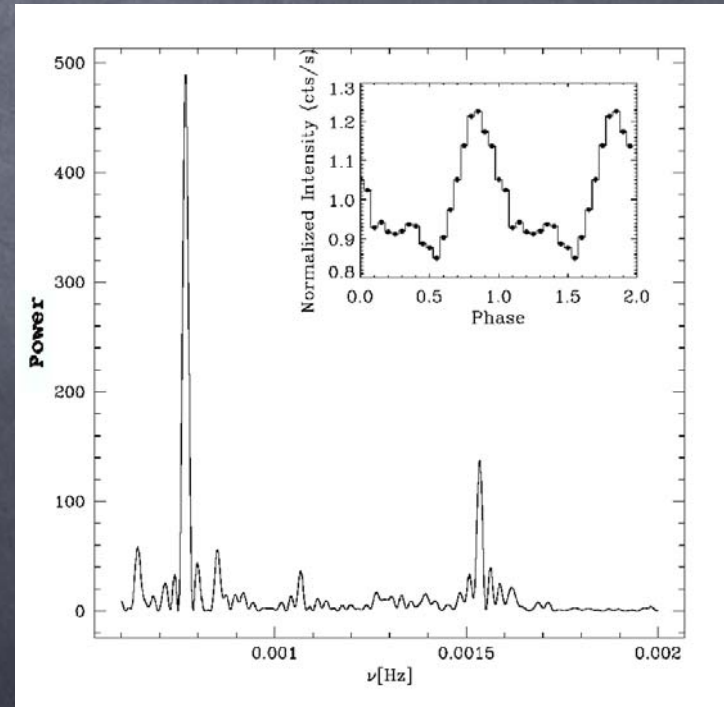
$0.2 \leq \Gamma \leq 2.5, N_H \geq 10^{23} \text{ cm}^{-2}, E_{cut} \sim 7 - 10 \text{ keV}$

- Pulsation $P=1302 \text{ s}$ (Lutovinov et al., '05)
- Longue (typique IGRs enfouies)



HMXB+pulsar

- Source dans Norma => probable Galactique
- Observations XMM+INTEGRAL (R.+ '03, '06)
 - Variations rapides => XRB plutôt que AGN
 - Spectres + paramètres => HMXB+pulsar



Résultats

Swift + contrepartie

Nom (IGR)	Type & Commentaires
J02343+3229	Sey 2
J03184-0014	sources <i>INTEGRAL</i> et <i>Swift</i> ne sont pas liées
J03532-6829	BL Lac
J05319-6601	probable XRB in LMC
J05346-5759	CV
J09025-6814	AGN, poss. Compton épaisse, Sey 2
J09523-6231	Sey 1.5
J10101-5654	HMXB
J10147-6354	possible Sey 2
J11187-5438	?
J13000+2529	AGN
J13020-6359	HMXB contenant un pulsar
J13149+4422	Sey 2
J14579-4308	Sey 2
J15161-3827 #1	Liner/Sey 2
#2	?
#3	YSO
#4	?
J15479-4529	CV/IP
J16287-5021	possible HMXB
J16385-2057	Sey 1
J17353-3539	possible HMXB
J17476-2253	possible XRB
J18214-1318	probable HMXB (supergéante?)
J18490-0000	possible XRB
J18559+1535	Sey 1
J19267+1325	Source Galactique
J19308+0530	XRB avec étoile à neutrons ou CV
J19378-0617	Sey 1.5
J20286+2544 #1	Sey 2
#2	possible Sey 2
J23206+6431	Sey 1
J23524+5842	?

Spectroscopie IR/Visible

Source	Nature du système	Type Spectral
IGR J16320-4751	HMXB	O8 I
IGR J16358-4726	HMXB	B[e] I
IGR J16393-4643	HMXB	BIV-V?
IGR J16418-4532	HMXB	OB I
IGR J16426+6536	Sey 1.5	
IGR J16479-4514	HMXB	O8.5 I
IGR J16558-5203	AGN	
IGR J17091-3624	LMXB	?
IGR J17252-3616	HMXB	O8.5 I
IGR J17391-3021	HMXB	OB I
IGR J17597-2201	LMXB	?
IGR J18027-2016	HMXB	OB I
IGR J18214-1318	HMXB	O9 I
IGR J18308-1232	CV	
IGR J18483-0311	HMXB	B0.5 Ia
IGR J19140+0951	HMXB	B0.5 I
IGR J19267+1325	CV/IP	
IGR J22292+6647	Sey 1	

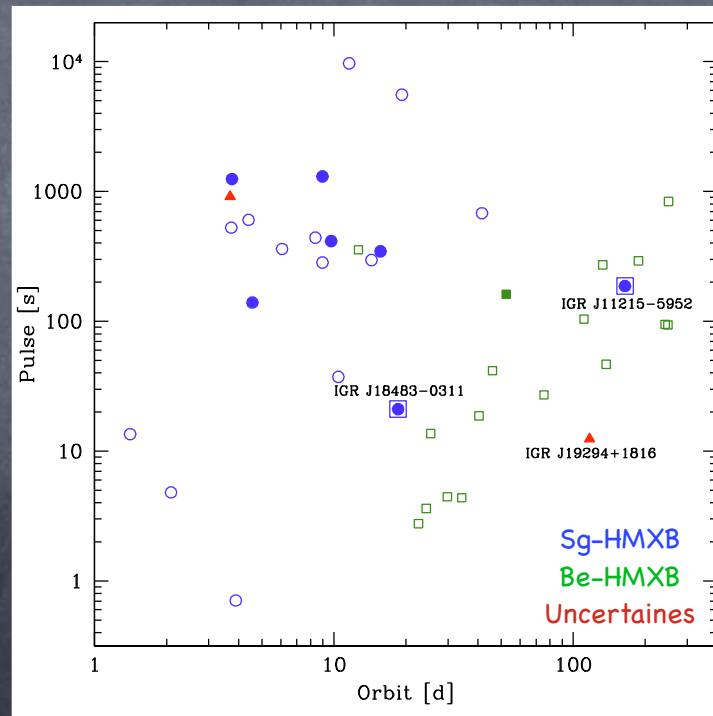
Hannikainen+'07; Rahoui+ '08; Chaty+ '08; Buttler+ '09

Astrométrie

- ~350 nouvelles sources : IGRs (Bird+ 2010)
- <http://irfu.cea.fr/Sap/IGR-Sources/>
- Programmes de suivis (astrométriques) X :
 - Identifications des contreparties ~60 sources (R. et al. '03, '08, '09a,b, '10, Tomsick et al. '06, '08, '09a,b)
- Contreparties infrarouge/optique/radio
 - Identifications du type de système dans une majorité de cas

Identifications et populations

- \sim HMXB enfouies+SFXT
- Espace des paramètres (Bodaghee+ '07)
- Lien d'évolution Be-HMXB \rightarrow SFXT (?) (R.+ '09b; Liu+ '10)



Corbet '86; R.+ '09b

(I) Introduction

(II) Identification de sources par astrométrie et
phénoménologie

(III) Astrophysique des sources compactes
accrétantes

(I) Systèmes accrétant par vent

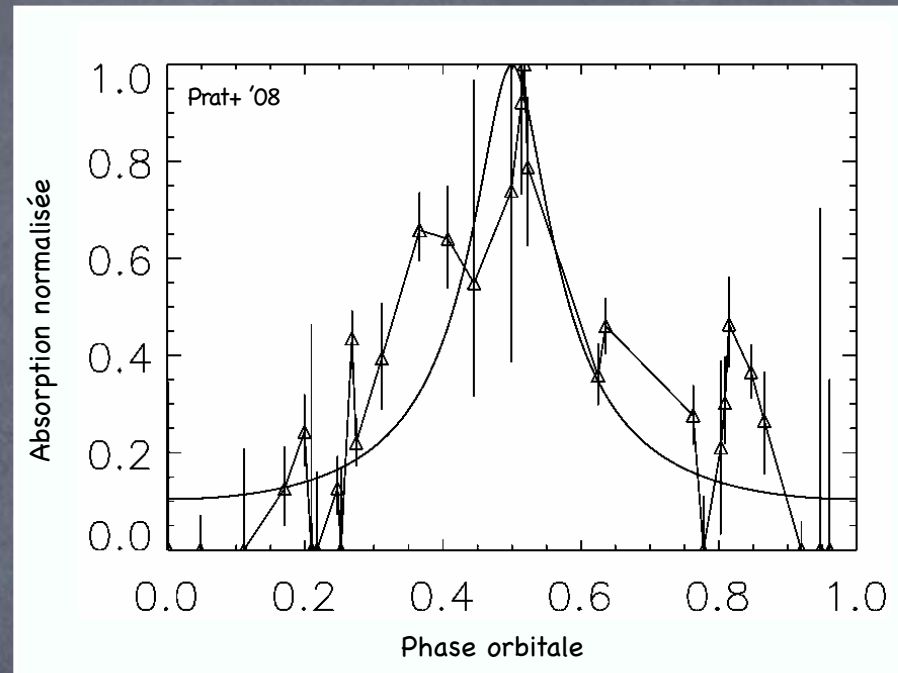
(II) Microquasars

(IV) Conclusions et perspectives

Absorption dans les Sg-HMXB

$$V(r) = V_0 + (V_\infty - V_0) \left(1 - \frac{R_\star}{r}\right)^\beta$$

$$N_H = N_{H,ISM} + \frac{\dot{M}_\star}{4\pi\mu m_H V_\infty} \int_0^\infty \frac{ds}{r^2 \left(1 - \frac{R_\star}{r}\right)^\beta}$$

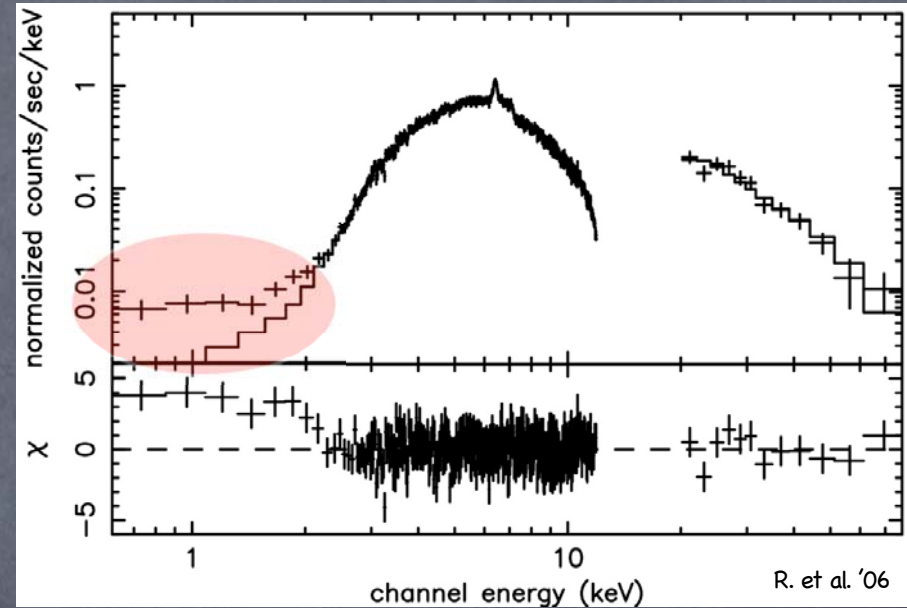


$$M = 20 M_\odot, \beta = 0.5, \implies R = 21 R_\odot, 38^\circ < i < 43^\circ$$

- Modèle simple => accord global (multiples sources)
- Paramètres orbitaux
- Structure du vent (?)

Excès mous dans les HMXB

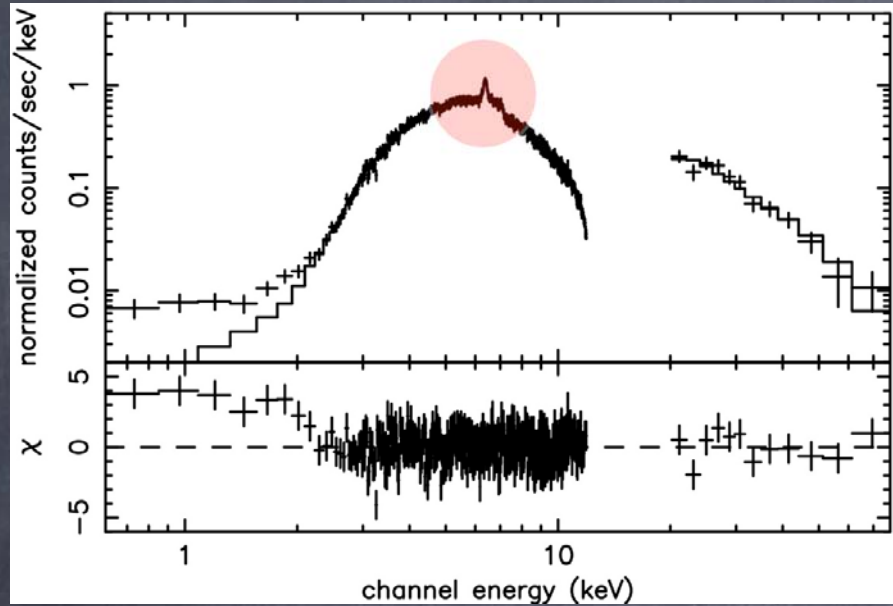
- Présents dans de nombreuses sources (Hickox+ '04, Bodaghee+ '06, Zurita Heras+ '06, R. + '06, Prat+ '07): SG-HMXB
- Origine?
- Similaires «Soft excess» AGN ?



- IGR J16320-4751 (R. et al. '06): $kT_{bb}=0.07$ keV
 - ✓ Sg ne remplit pas lobe de Roche => pas de disque
 - ✓ $F_{\text{compt,abs}} \ll F_{bb}$ => Pas Re-diffusion
 - ✓ $kT_{bb} < kT_{\text{inj,Compt}}(\geq 1 \text{ keV})$ => Pas surface NS
- ✓ Interaction (choc) matière ralentie (R-X) <-> vent

Raie du Fer dans les HMXB

- Raie du Fer ~6.4 keV, fine ≤ 0.1 keV



$$\xi = \frac{L}{\rho \times R^2} \quad \text{et} \quad \rho \times R = N_{\text{H}}$$

$$\Rightarrow R = \frac{L}{\xi \times N_{\text{H}}}$$

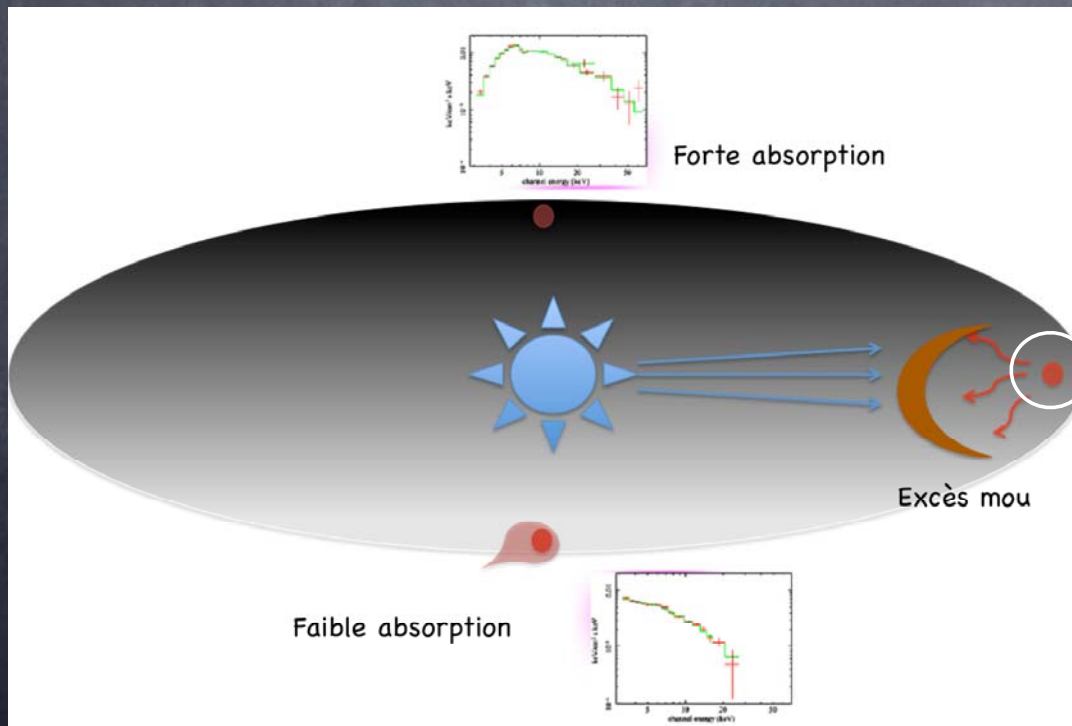
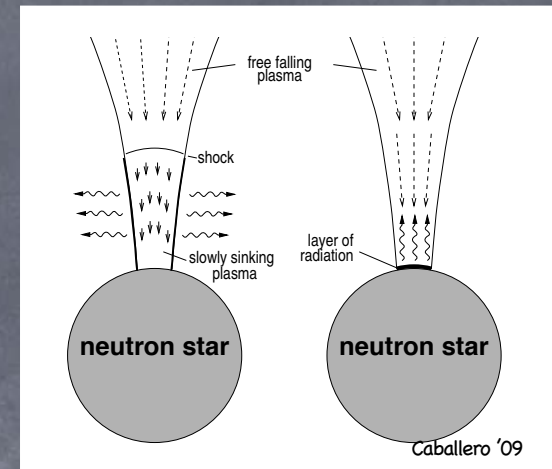
- IGR J16320-4751 (R. et al. '06): $\xi < 100$

$$\Rightarrow R > 10^{11} \text{ cm} \sim 0.07 \text{ u.a.}$$

- Matière loin OC
- Liée à l'excès mou (?)
- Résultats confirmés (Bodaghee+10, soumis)

Une vision «simple» des HMXB

- Analyses spectrales + variabilités
 - Continuum = comptonisation (+bb)
 - Présence d'excès mou
 - Emission de fluorescence du fer
 - Variations de N_H



- Accrétion polaire NS
- Interaction γ -pulsar
- Taille coquille Fe
- Paramètres orbitaux

(I) Introduction

(II) Identification de sources par astrométrie et
phénoménologie

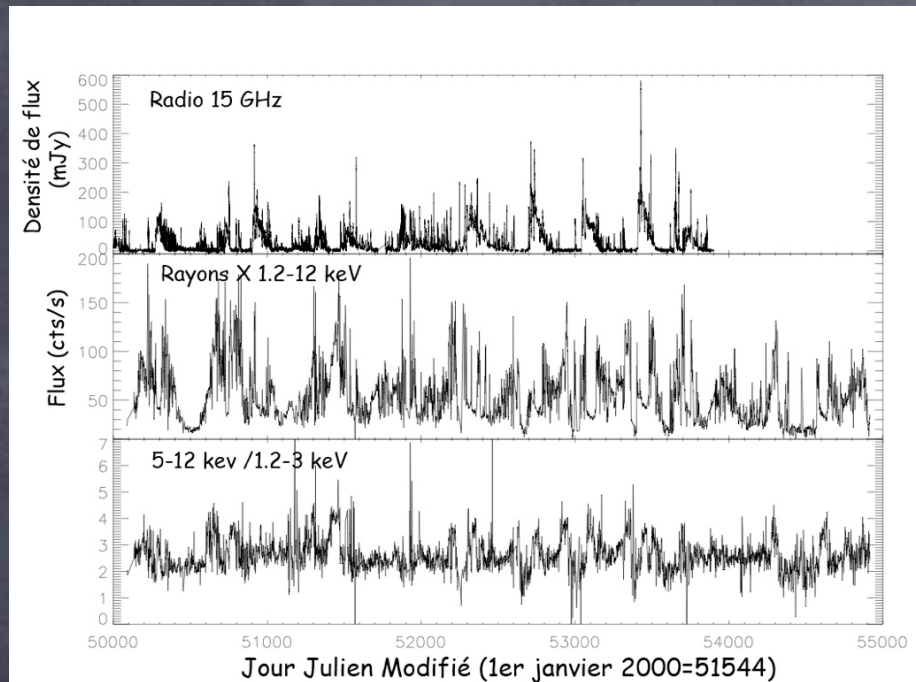
(III) Astrophysique des sources compactes
accrétantes

(I) Systèmes accrétant par vent

(II) Microquasars

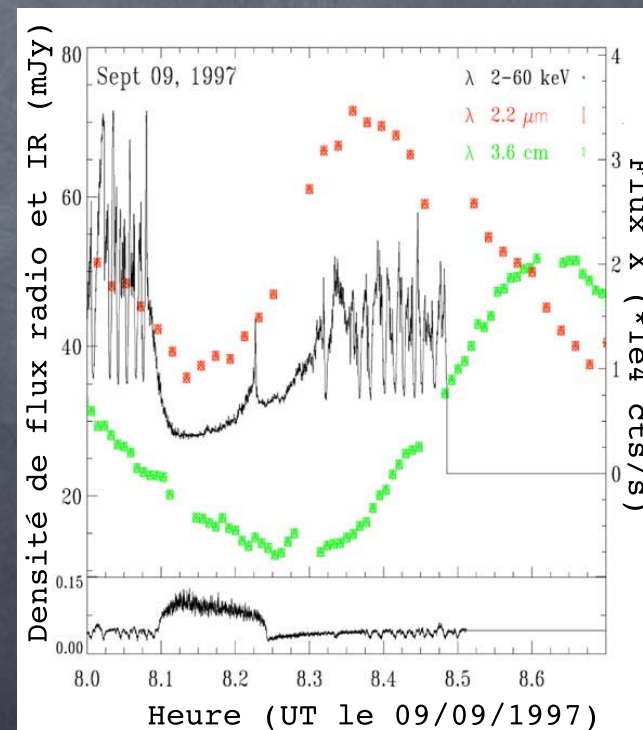
(IV) Conclusions et perspectives

GRS 1915+105

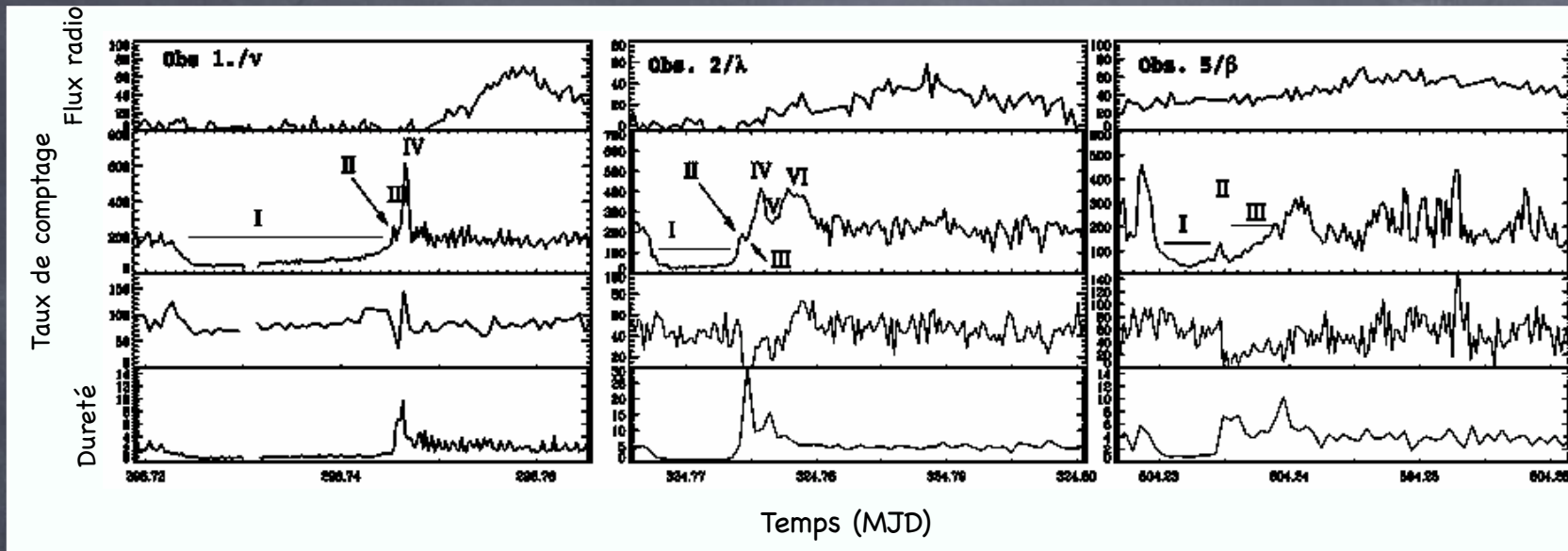


- Liens accrétion/éjection (Mirabel+ '98)
- Cycles X ~ 30 min \leftrightarrow Oscillations radio

- Microquasar/TN dans Aquila
- Extrêmement variable
 - toutes échelles
 - toutes longueurs d'onde
- Comportement complexe



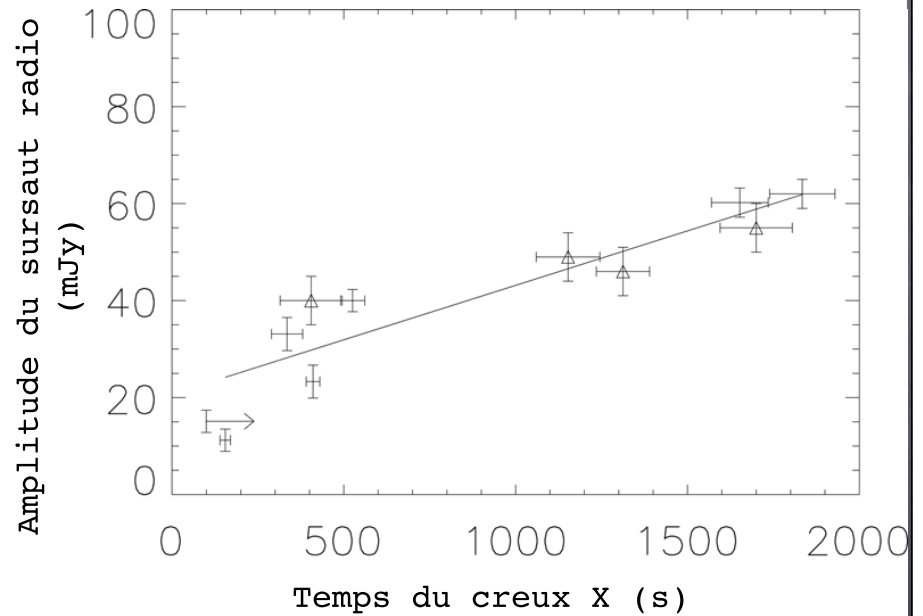
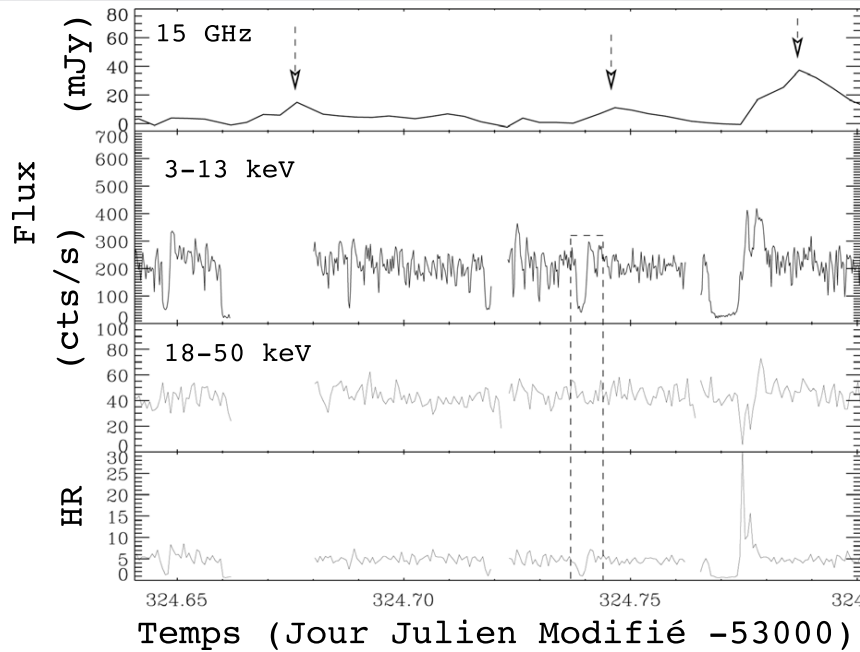
Campagne INTEGRAL/RXTE/Radio



- Corrélation X-radio confirmée
 - Corrélation X-radio étendue
 - Généralisation
 - Schéma type menant aux éjection
 - Identification déclencheur éjection
- =>

Période spectrale dure terminée par un pic mou => éjection

Liens temporels (?)



R. et al. '08a

R. et al. '08a, Prat+, en prep.

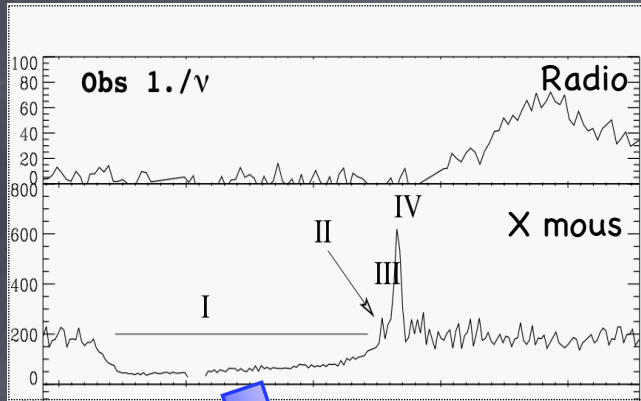
● Corrélation état dur \leftrightarrow amplitude radio (?)



Accumulation énergie et/ou matière ?

Analyse spectrale des cycles

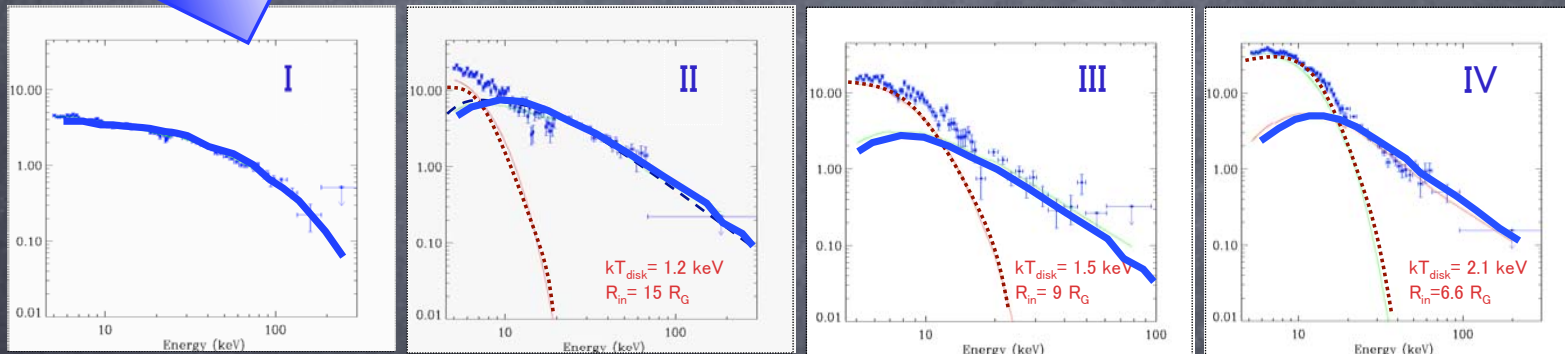
R. et al. '08b



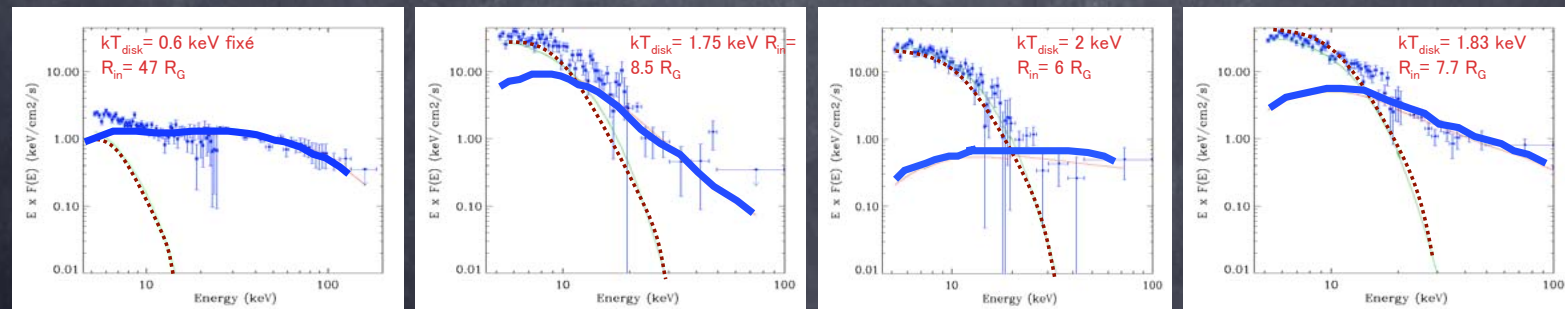
- Pas de disque I \leftrightarrow état «dur»
- Approche du disque II \rightarrow IV: $kT \nearrow$, $R_{in} \searrow$
- \searrow flux Compton

Ejection couronne ?

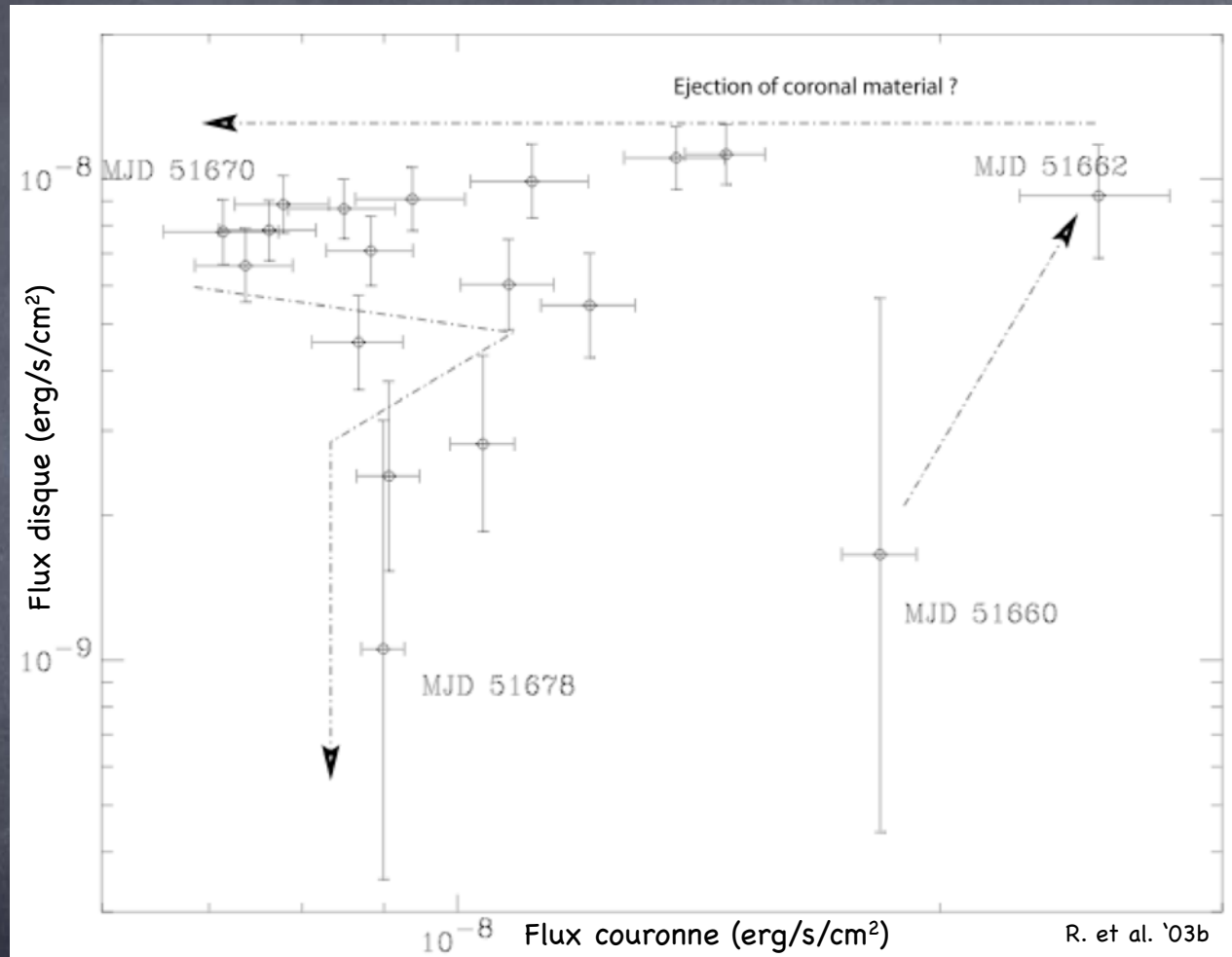
ν



λ



Comme XTE J1550-564 (?)

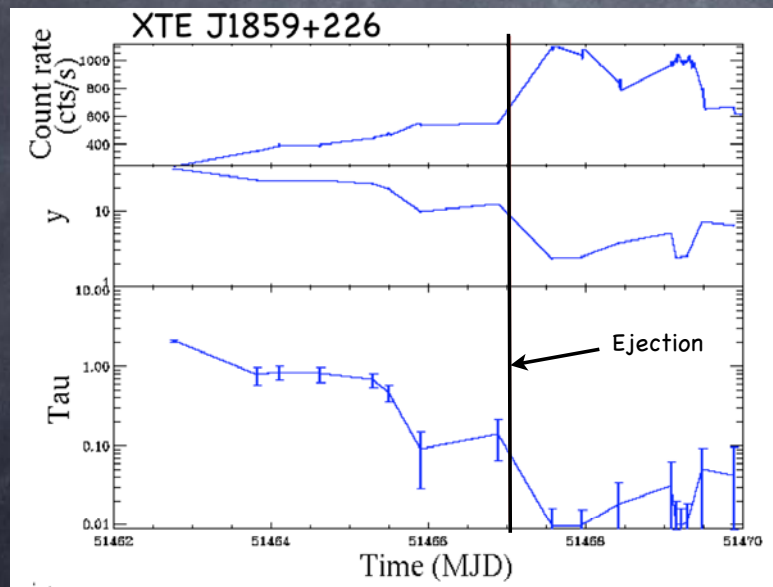


⑥ Peut-on généraliser?

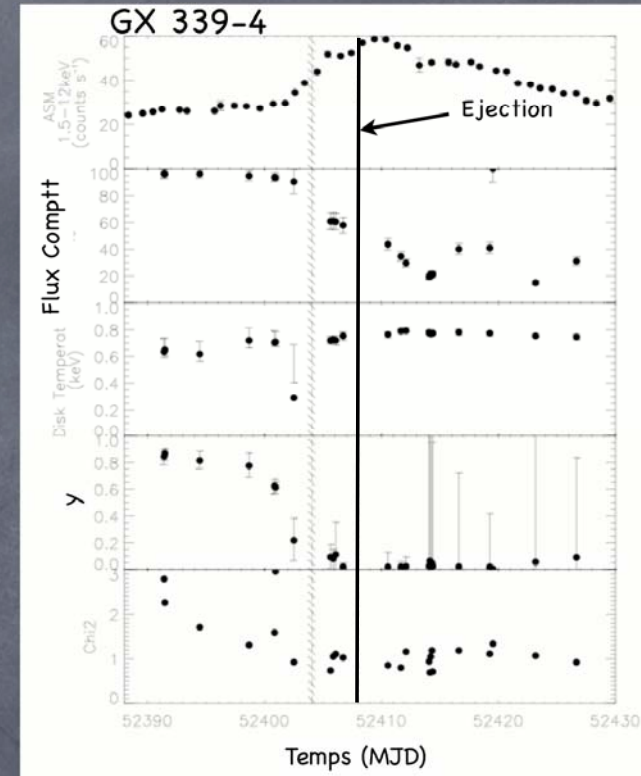
Comptonisation

Comptonisation

- ✓ Paramètre de Kompaneet $\Rightarrow \gamma \approx \text{efficacité}$
- ✓ $\gamma \propto kT_e \max(\tau, \tau^2)$
- ✓ $\max(\tau, \tau^2) \propto \rho R = N_{\text{moy}} \text{ diffusion}$



R. & Prat, en prep.



R. & Prat, en prep.

γ et/ou $\tau \searrow$ (aussi 1915+105)
 \Rightarrow Ejection de la couronne plausible

Pour aller plus loin : timing

- Fortes connexions spectro-temporelles:

- ✓ Etat dur \rightarrow variable ($>10\%$ RMS)

- ✓ Etat mou \rightarrow peu/pas variable (\sim qqes % RMS)

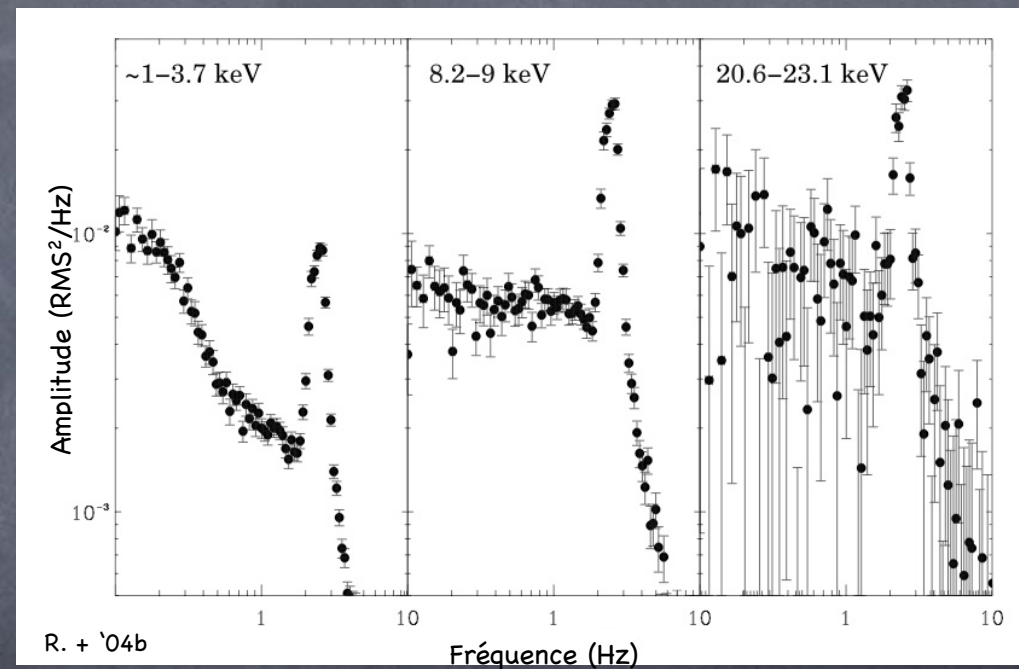
- Oscillations Quasi Périodiques :

- états durs (couronne)

- $\nu_{\text{QPO}} \leftrightarrow$ disque: kT (Muno+ '99),
 R_{in} (R.+ 02a), FLUX (R.+ 02b, 04a)

- $\nu_{\text{QPO}} \leftrightarrow \Gamma$ (Vignarca+ '02)

- Spectres en énergie durs
(Morgan+ '97, R.+ '02b)



Propriétés temporelles \Leftrightarrow Physique de l'accrétion

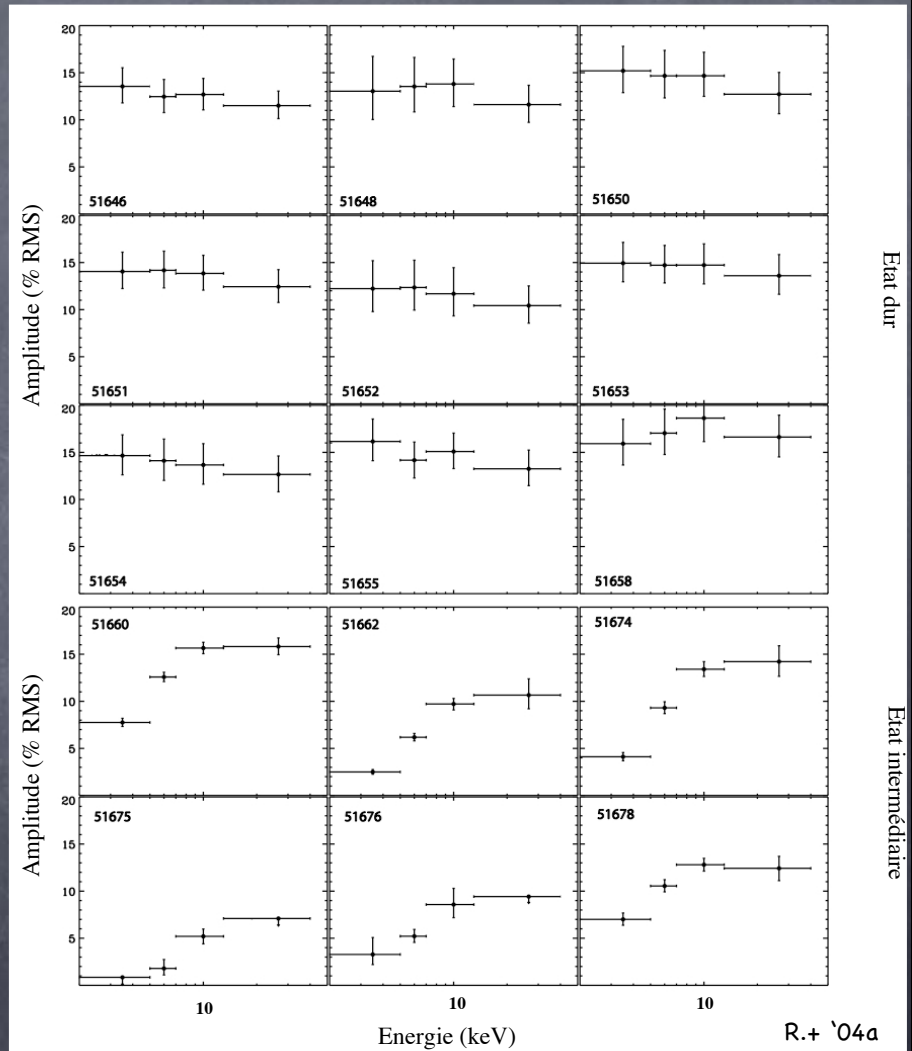
Spectres des QPOs: XTE J1550-564

⑥ XTE J1550-564 (R.+ '04a)

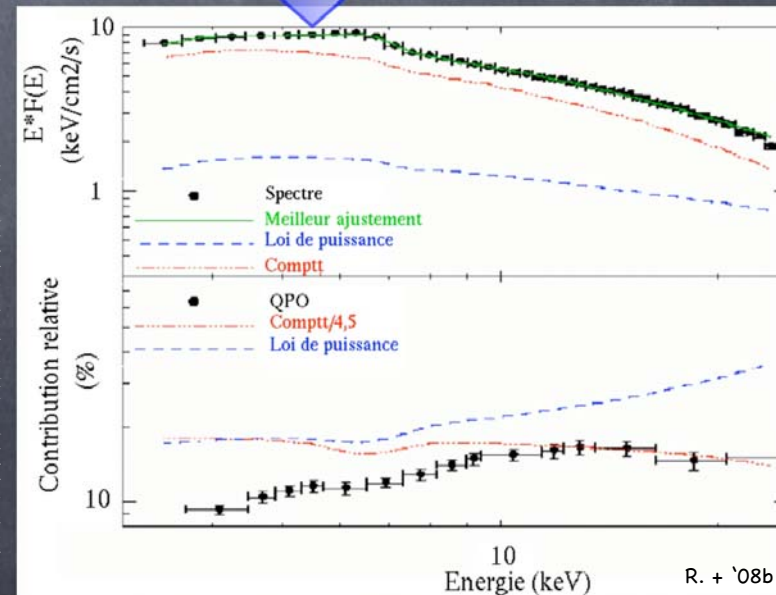
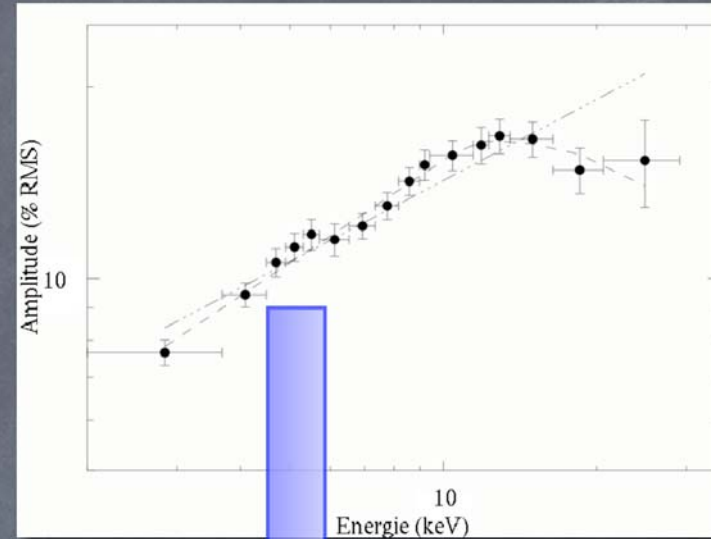
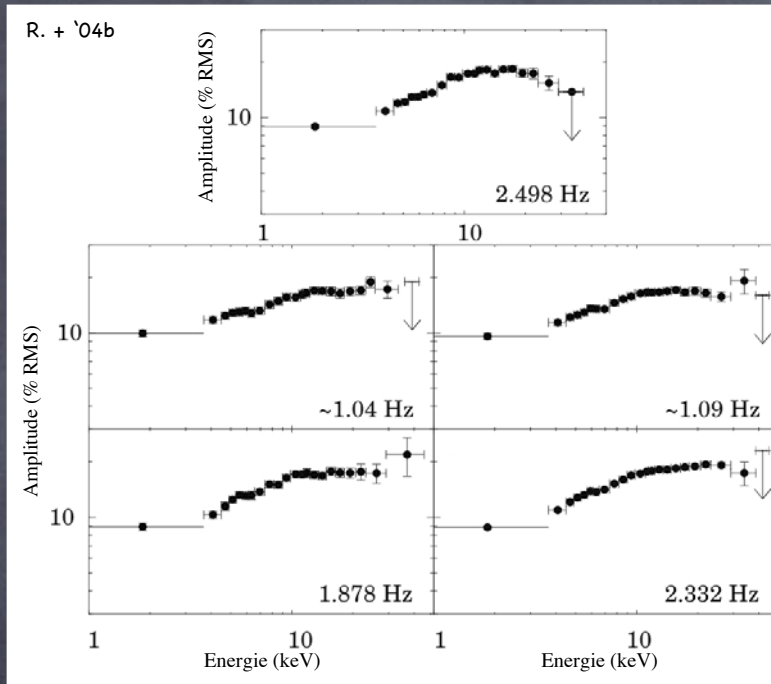
- ✓ Suivi spectro-temporel de l'éruption
- ✓ Transitions spectrales + suivis QPO
- ✓ Spectres des QPO BF



- ✓ QPO \neq disque
- ✓ Applatissement $>10\text{keV}$
- ✓ Lien couronne?

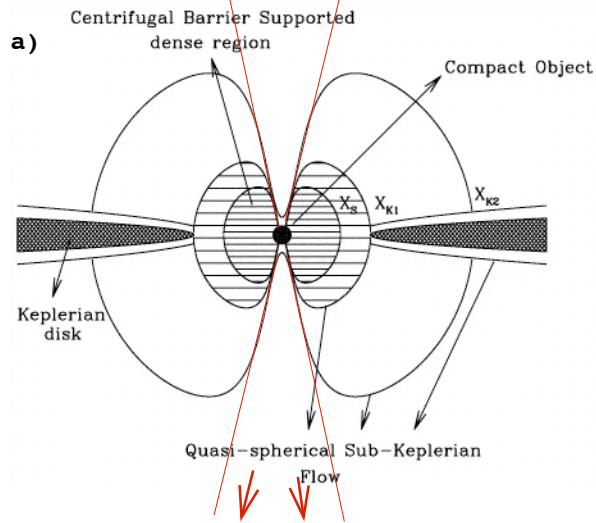


Spectres des QPOs: GRS 1915+105

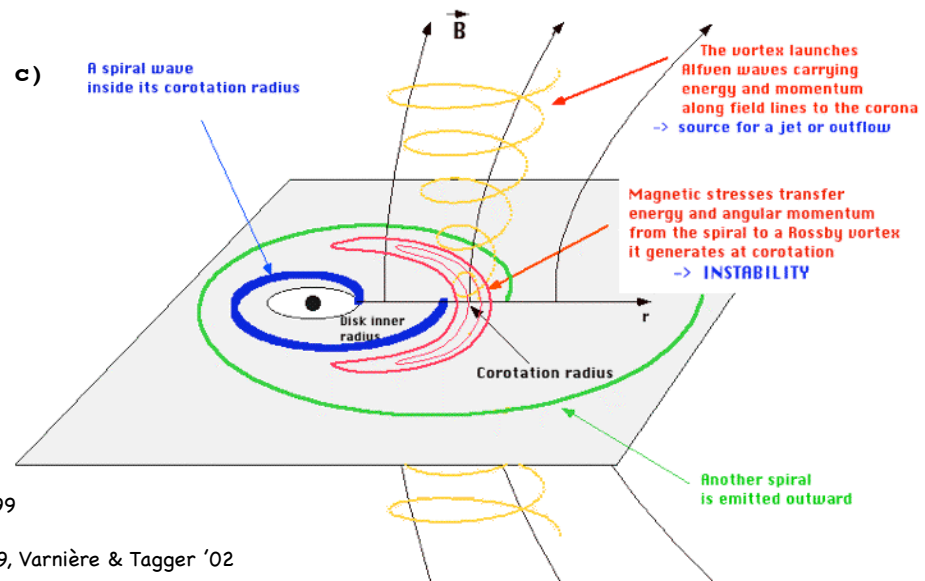
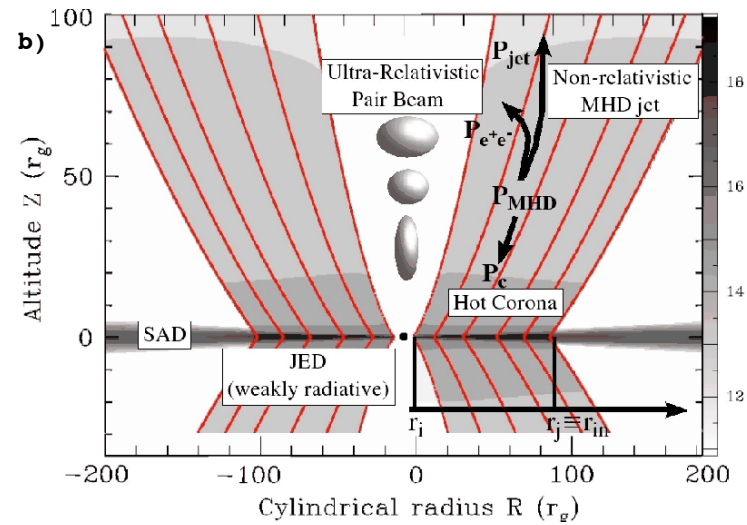


- ✓ QPO ≠ disque
- ✓ coupure >10keV, E variable
- ✓ Lien jet (R.+ '04b)?
- ✓ Spectre QPO ≠ Compt.
- ✓ Spectre QPO ≠ jet
- ✓ Composante additionnelle (R.+ '08b)?

Une vision globale ?



Jet du CENBOL comprimé par les chocs



- a) Chakrabarti '96, '99
- b) Ferreira+ '06
- c) Tagger & Pellat '99, Varnière & Tagger '02

AEI et al. Généralisation?

- Crues magnétiques (Tagger+ '04)

- ✓ transition \rightarrow creux $\beta \approx 1 \Rightarrow$ AEI \Leftrightarrow QPO

\Rightarrow Transitions états durs \rightarrow mous

- ✓ advection B vers bord interne

- ✓ Pic X \Leftrightarrow Reconnexion \leftrightarrow éjection \leftrightarrow $\beta \gg 1$

- Généralisation: autres instabilités & sources (GRO J1655-40, XTE J1550-564)

$\beta \approx 1$ dM/dt faible	$kT_{\text{disque}} < 0.5$ keV R_{in} grand	QPO BF	AEI Etat dur
$\beta > 1$ dM/dt fort	$kT_{\text{disque}} 1-2$ keV R_{in} faible	QPO HF	RWI Int. mou
$\beta > 1$ dM/dt faible	$kT_{\text{disque}} 1$ keV R_{in} faible	Pas QPO	MRI Etat mou
$\beta \approx 1$ dM/dt fort	$kT_{\text{disque}} 1-2$ keV R_{in} faible	QPO HF+BF	AEI+RWI Int. Dur

Varnière, Tagger, R. '10a,b

(I) Introduction

(II) Identification de sources par astrométrie et
phénoménologie

(III) Astrophysique des sources compactes
accrétantes

(I) Systèmes accrétant par vent

(II) Microquasars

(IV) Conclusions et perspectives

Résultats principaux

- ✓ Découverte sources IGR (Shift ISDC, survey 1915+105,...)
- ✓ Suivis, catalogue, site web (R.+ '03a,'05,'06,'07,'08c,'09a,b; Bodaghee+'07; Bird+ '10)
- ✓ Classification ≥ 60 sources
- ✓ Etude population HMXB (Bodaghee+'07)

- ✓ Etudes physiques HMXB (R.+ '06,'07, Prat+ '08; Bodaghee+ '10)
- ✓ Schéma simple système

- ✓ Etudes physiques microquasars
- ✓ Liens accrétions éjections \Rightarrow éjection couronne (R.+ '03a, R.+ '08a,b, R. & Prat '09)
- ✓ Etudes temporelles : origines QPO ?
- ✓ Approche théorique éruption

Futur/Questions

- Affiner population => Image profonde X-dur (plus sensible): IXO(?)
- Evolution HMXB
- Modèle de vent stellaire
- Comparaison AGN absorbés et Compton épais

- Accrétion-éjection microquasars (en cours; thèse L. Prat)
- Composantes temporelles spectres de puissance + spectres (Thèse T. Chen)
- Spectre HE (40 keV) QPO BF -> IXO (?)

- Centre de données scientifique SIMBOL-X/ Annulé 2009
- SVOM : Co-I aspect science hors sursauts. Mise en place centre de données
- IXO : working group HTRS