



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Les destructions d'étoiles (TDE)



**Françoise Combes**



# Les grandes lignes

→ Histoire -- Equations

→ Les ~60 Candidats

→ Leurs propriétés

→ Tension entre Observations et Théorie

→ Perspectives

→ Conclusion



# Bref historique

Hills (1975) calcule le rayon de marée,

$$R_T \sim R_* (M_{BH}/M_*)^{1/3}$$

Forces de cohésion =  $GM_*/R_*^2$

Marée du trou noir  $\sim GM_{BH} R_* / R^3$

$$\rightarrow R^3/R_*^3 = M_{BH}/M_*$$

$R_T \sim 1$  AU pour la Galaxie ( $P \sim 6$ h toujours)

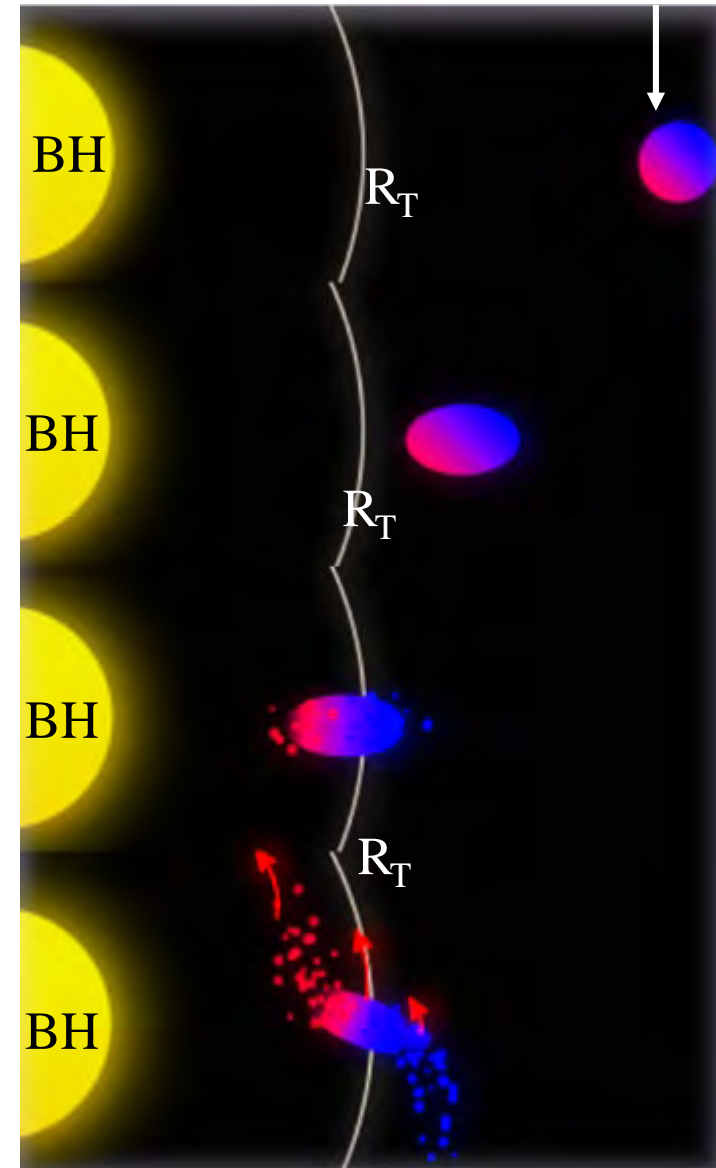
Rayon d'Eddington  $R_E \sim R_* (M_{BH}/M_*)^{1/2}$

Rayon où la pression de radiation du BH dépasse la limite d'Eddington de l'étoile

$\rightarrow$  Enveloppe soufflée, ou étoile enflée

$$M_{BH}/R_T^3 \sim \rho_*$$

$R_*, M_*$



# Rayons caractéristiques

Rayon de marée,  $R_T \sim R_* (M_{BH}/M_*)^{1/3}$

Rayon d'Eddington  $R_E \sim R_* (M_{BH}/M_*)^{1/2}$

Rayon de collision  $R_{coll}$ , quand

$V_{orb} = (GM_{BH}/R)^{1/2}$

devient égale à

$V_{esc} \sim (GM_*/R_*)^{1/2}$

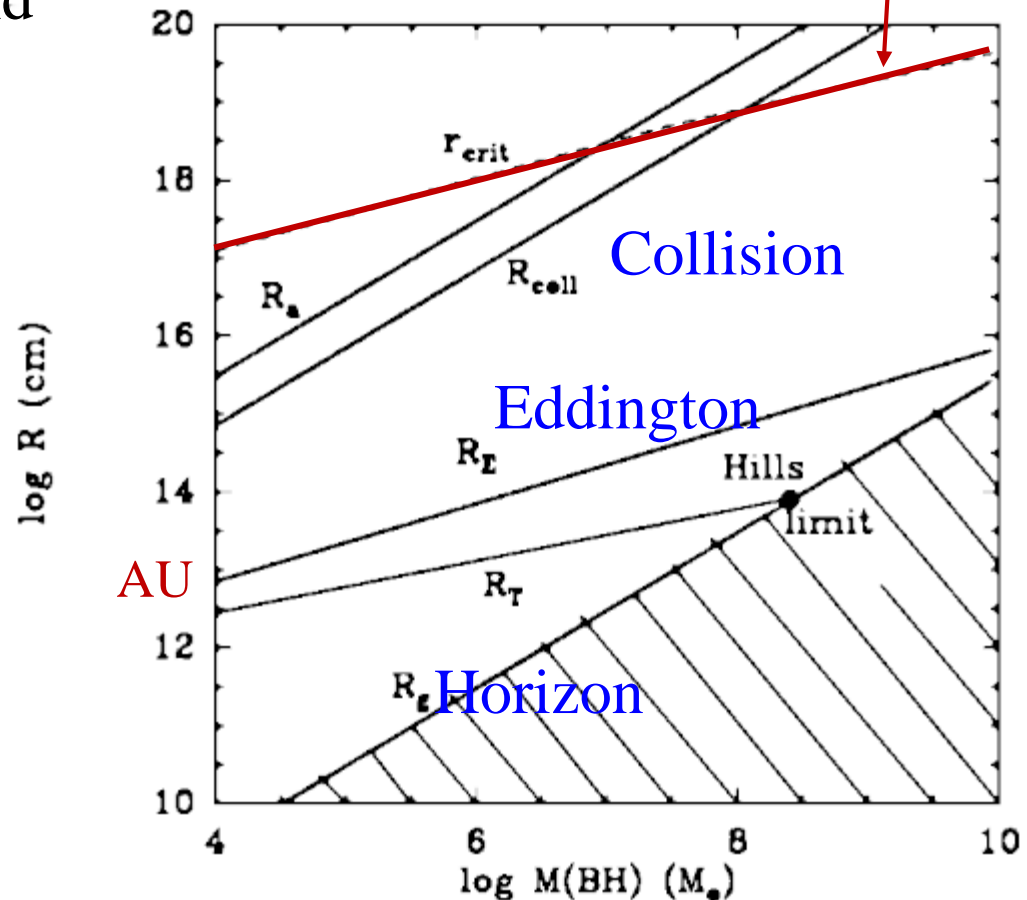
$R_{coll} = R_* (M_{BH}/M_*)$

Rayon d'accrétion

$R_a = GM_{BH} / V_\infty^2$

à partir duquel le BH domine  
la dynamique

Cône de perte



# Orbite du gaz

L'énergie pour détruire l'étoile  $m$  est prise sur l'énergie orbitale

$$E_b = 3/4 G m^2/R$$

Le gaz sortant aura une orbite de demi-grand axe

$$a = (2M_{\text{BH}}/3m)R/(1 - 2V^2R/3GM)$$

$$a = 1.5 \text{pc } M_8 / [1 - (\langle V^2 \rangle^{1/2} / 535 \text{km/s})^2] \text{ soit } 0.03 \text{pc dans notre Galaxie}$$

Vorb=600km/s, P=300ans



**Problème du moment angulaire  $L$  des étoiles,**

Il existe très vite une déficience d'étoiles: "loss cone effect" de faible  $L$

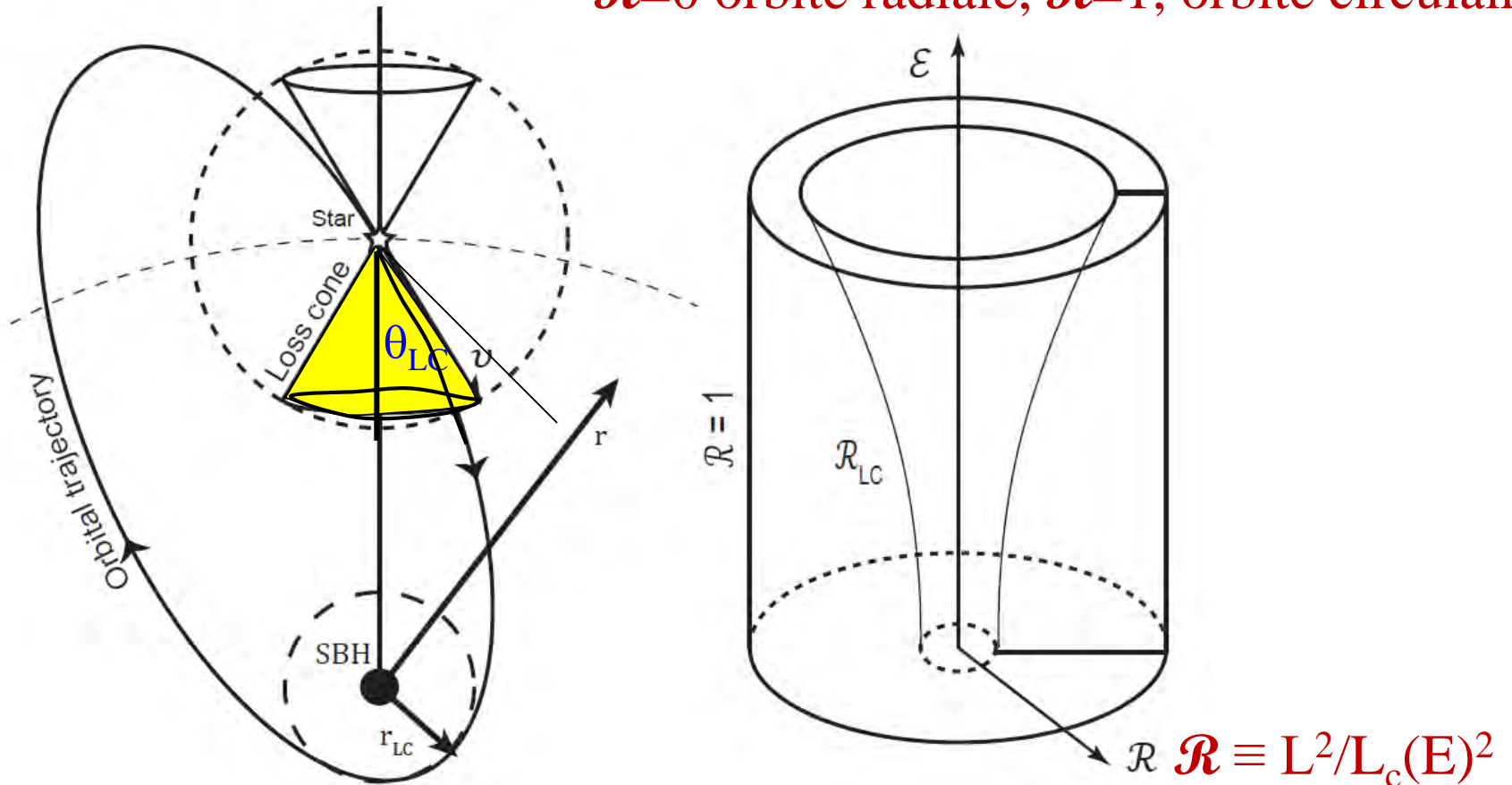
Limite de la diffusion  $\rightarrow r_{\text{crit}}$

Cône de perte

# Cône de perte

Seront capturées les étoiles avec orbites  $\theta < \theta_{LC}$

Energie  $E$ , Moment angulaire  $\mathcal{R}$   
 $\mathcal{R}=0$  orbite radiale,  $\mathcal{R}=1$ , orbite circulaire



Dans l'espace  $(E, \mathcal{R})$ , le cône de perte devient un cylindre

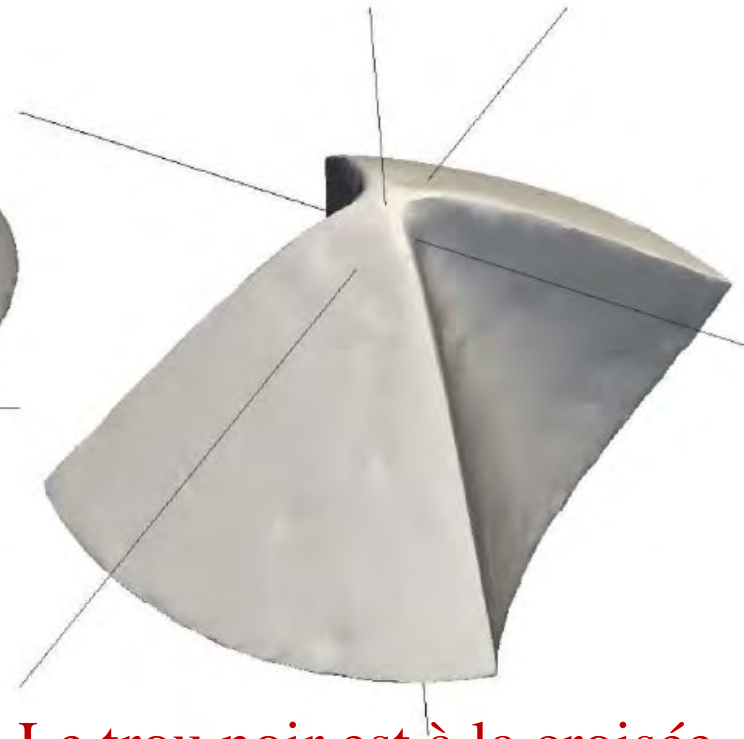
# Volume occupé par une orbite stellaire

Galaxie non-sphérique  $\rightarrow$  couples =  $dL/dt$

Soucoupe  
Galaxie à disque

Pyramide  
Galaxie triaxiale

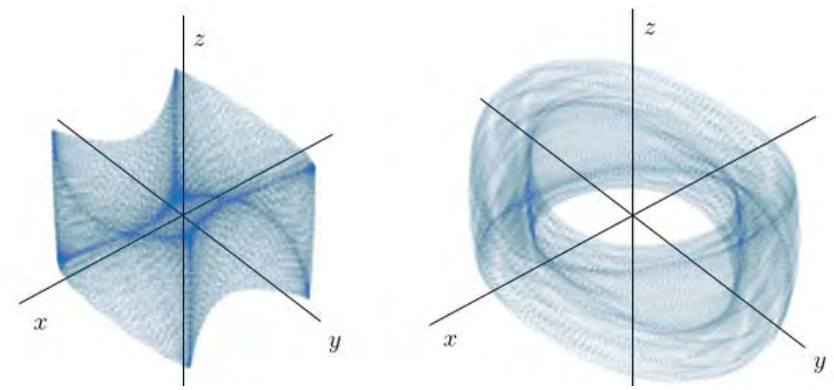
$L > L_{\min}$



Le trou noir est à la croisée  
des 3 axes

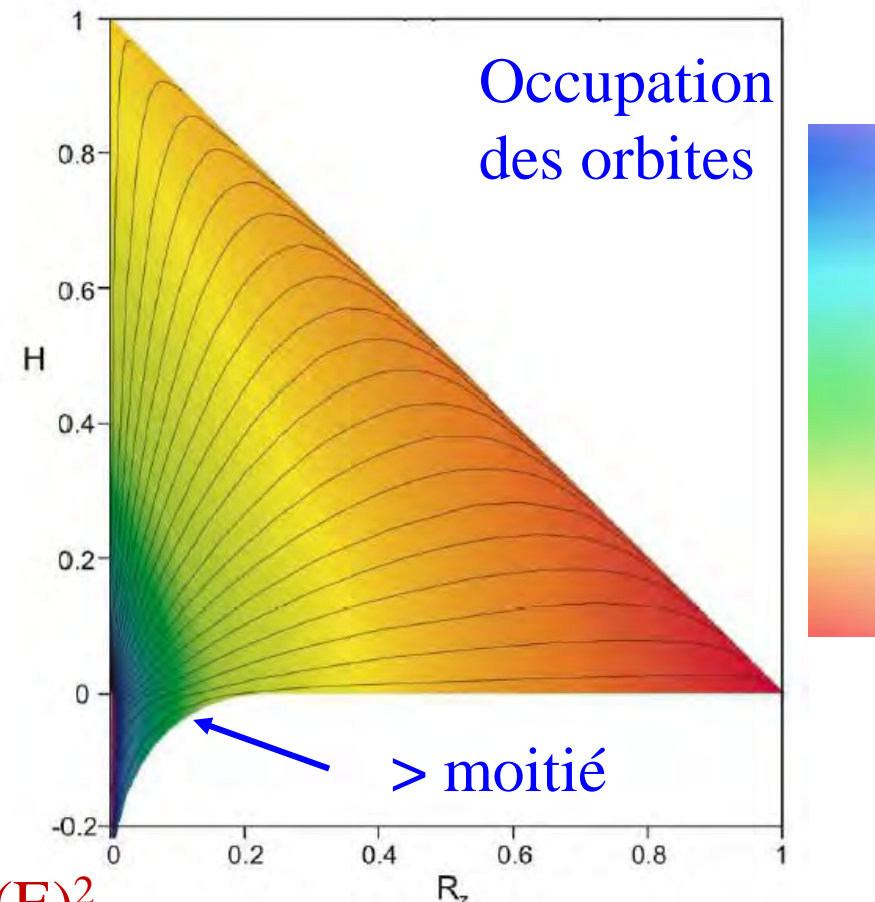
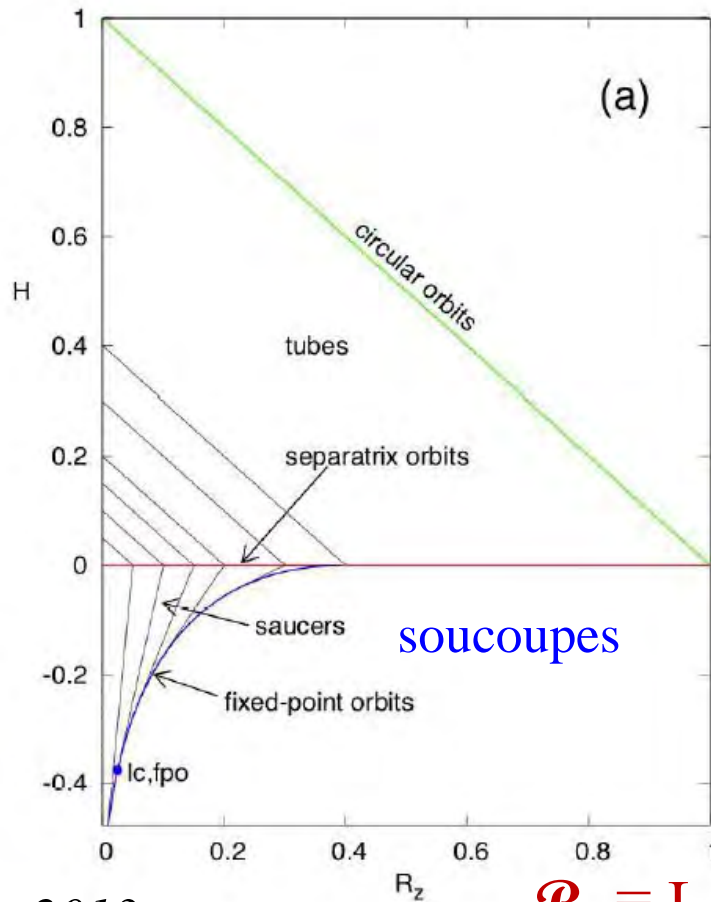
# Diffusion des orbites

H 3<sup>ème</sup> intégrale du mouvement,  
 dans un potentiel axisymétrique  
 $H \sim L^2$  pour des orbites tubes



Orbite boîte

Orbite tube

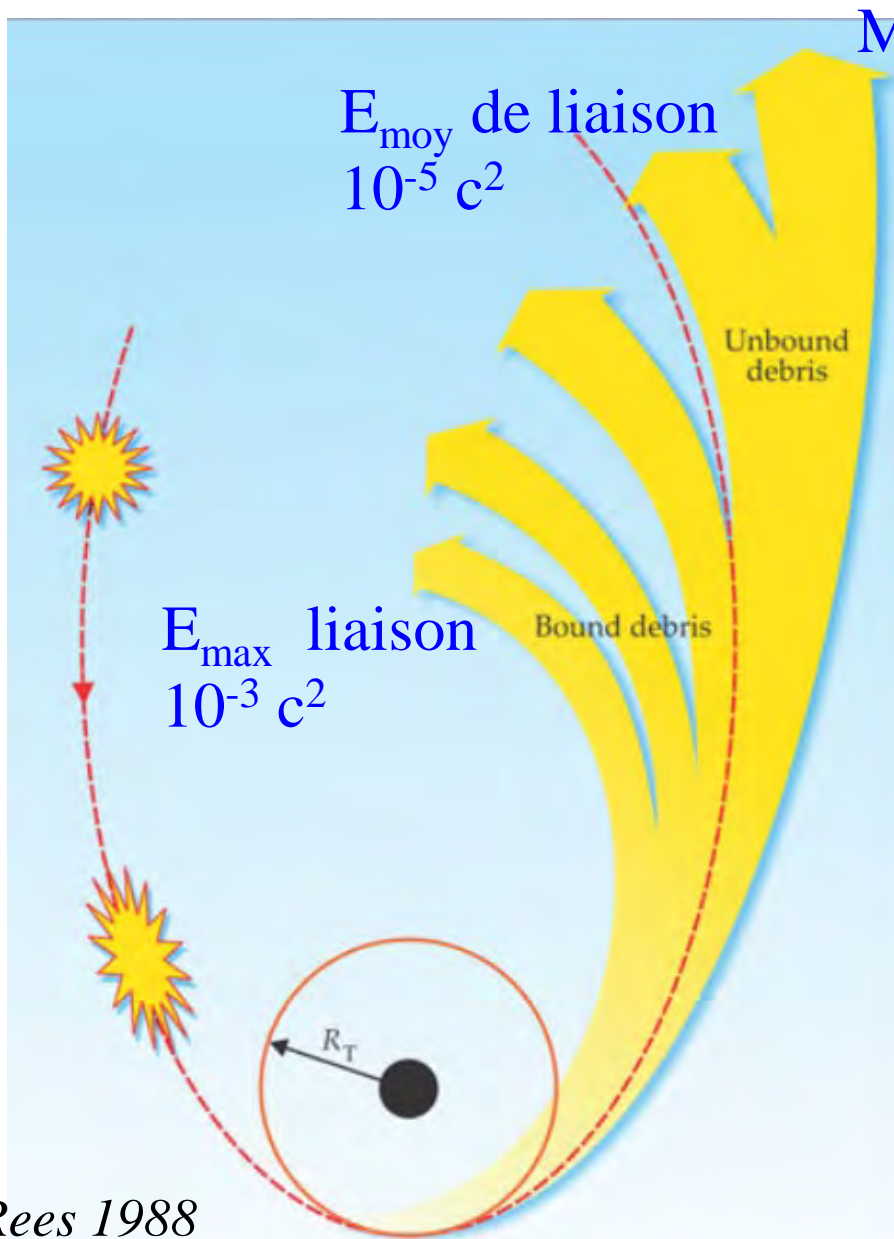


$$\mathcal{R}_z \equiv L_z^2 / L_c(E)^2$$



# Destruction d'une étoile (TDE)

Précession → chocs



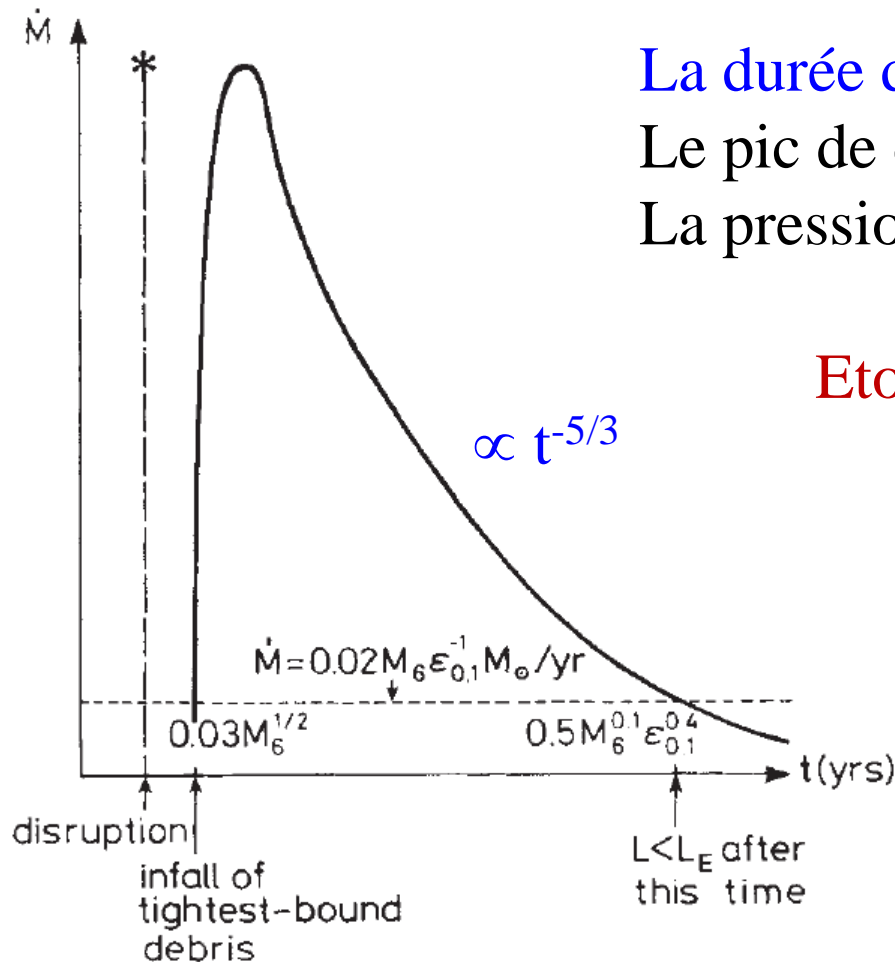
Durée : quelques années  
Si  $1 M_{\odot}$  en 300ans  
à  $R_T = 0.03 \text{ pc}$   
→  $L \sim 0.2 L_{\text{edd}}$

Probabilité de chute  
d'une étoile  $\sim 10^{-4}/\text{an}$   
Supposant isotrope,  
+Cône facile à re-remplir

Mais couple accélérant la  
rotation du gaz, qui va être  
éjecté → 50% du gaz perdu

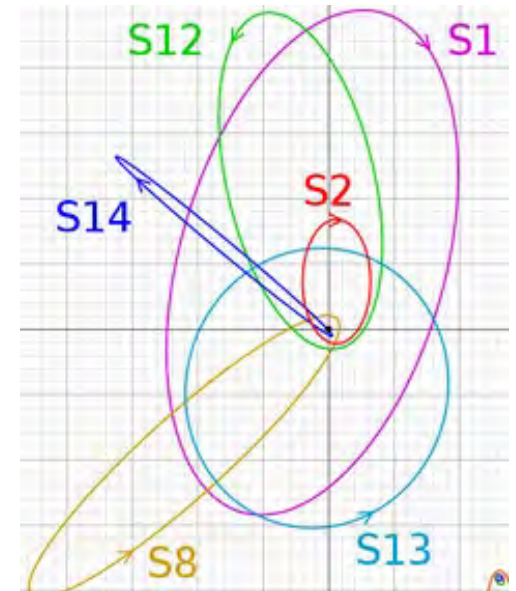
# Prédiction courbe de lumière d'un TDE

Les premiers débris sont avalés après  $0.03 (M/10^6 M_\odot)^{1/2}$  an  $\sim 10j$



La durée du TDE est de  $0.5 (M/10^6 M_\odot)^{0.1}$  an  
 Le pic de  $dM/dt$  est largement Eddington  
 La pression de radiation va limiter l'accrétion

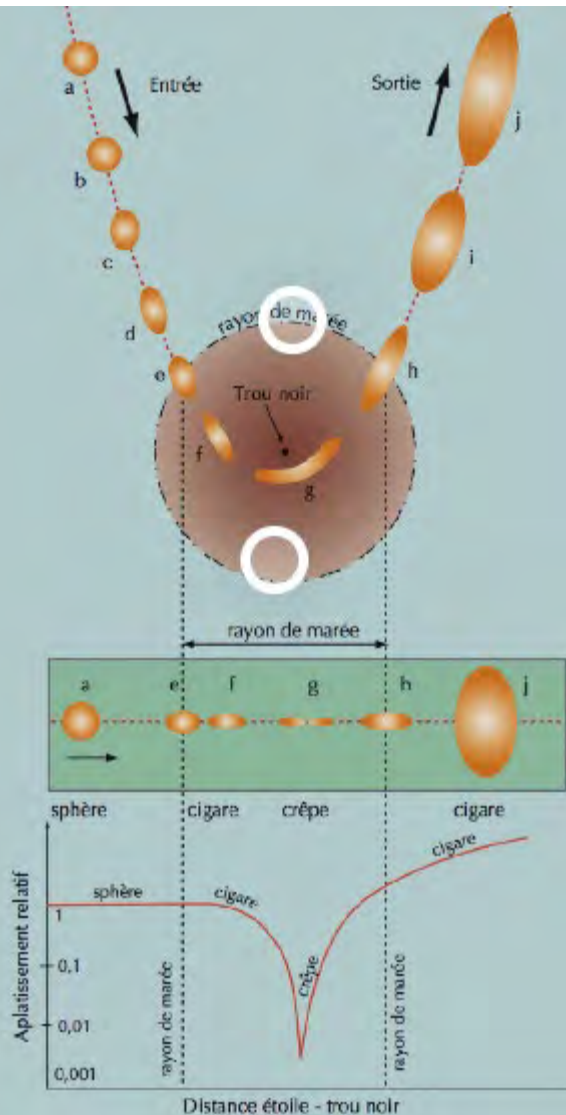
Etoile S2: péricentre 124 AU (P=16a)  
 $\gg R_T$



# Crêpes stellaires

L'aplatissement de l'étoile produit une détonation due aux réactions nucléaires C-N-O

Dépend de la nature du fluide (compressible?)



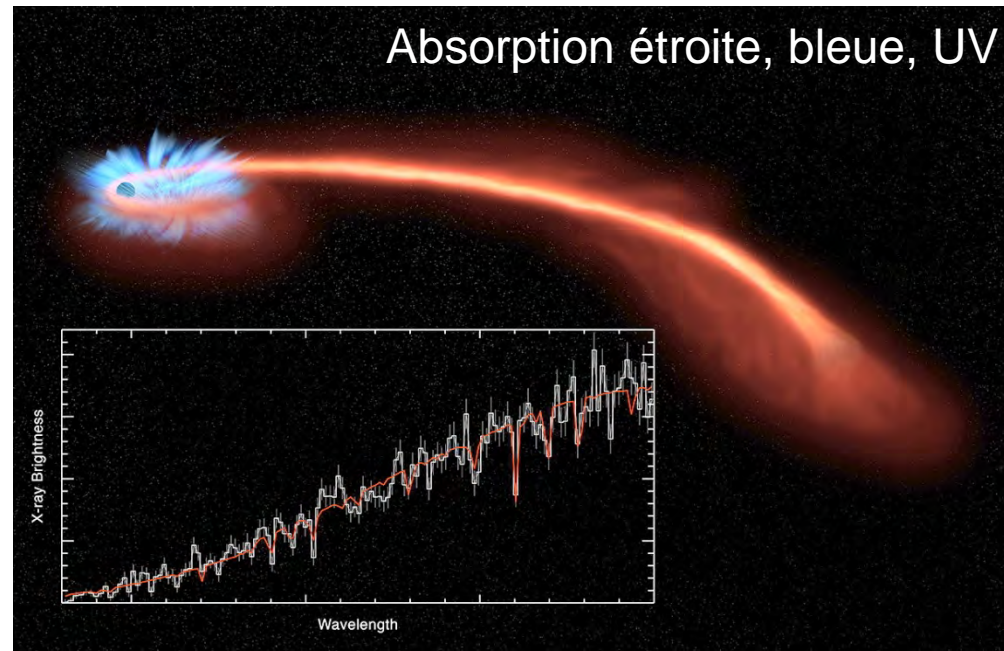
# Activité des trous noirs par absorption d'étoiles

Possible pour les trous noirs de masse inférieure à la limite de Hills  
 $M_{\bullet} = 3 \cdot 10^8 M_{\odot}$  Les TN plus massifs ont une densité moyenne trop faible et les étoiles sont avalées intactes

Pour un TN comme celui de la Voie Lactée, une étoile devrait être détruite **tous les 10 000 ans**

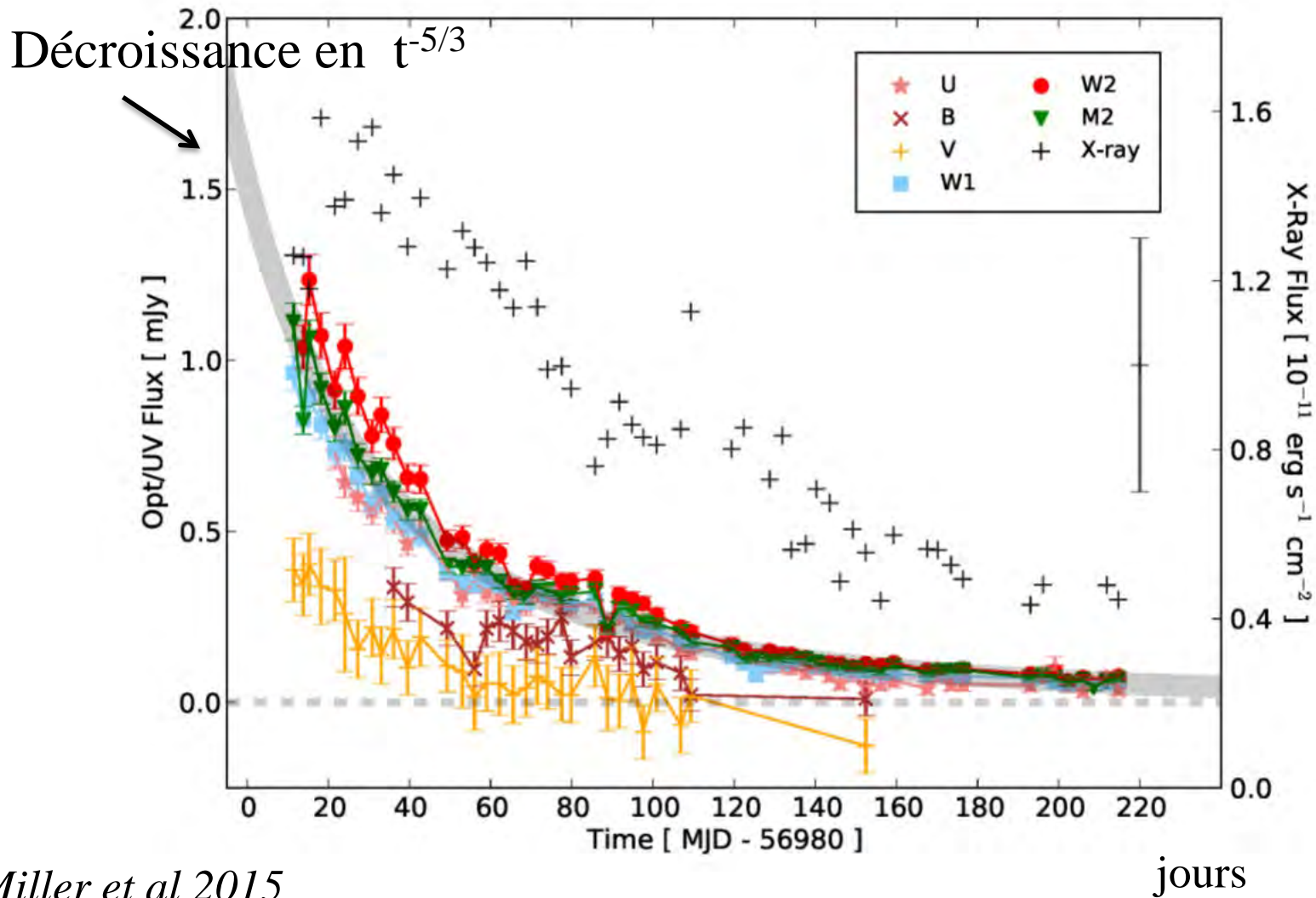
→ Ou bien on pourrait observer le phénomène tous les ans, avec le suivi de  $10^4$  galaxies

→ Observation par les rayons X  
*Miller et al 2015*  
ASASSN-14li dans PGC 043234  
ASAS «All-Sky Automated Survey»



# Preuve de l'évènement « TDE »

TDE Tidal Disruption Event = ASASSN-14li, galaxie non active  
Suivi de la décroissance du flux, depuis la découverte en 2014



# Energie de liaison

Période  $t = 2\pi GM_{\text{BH}} (2E)^{-3/2}$   
(selon Newton)

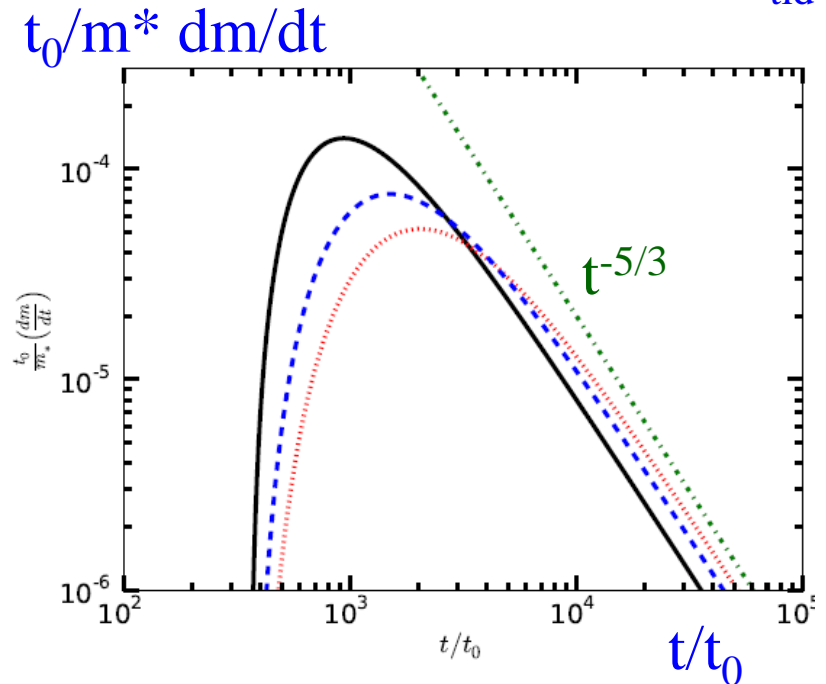
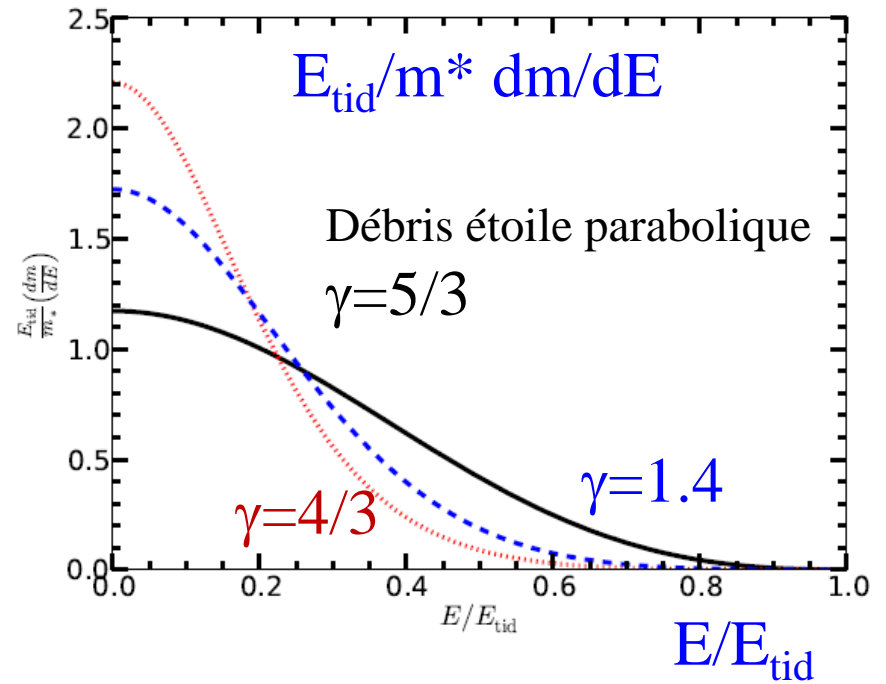
→ Luminosité  $\propto dE/dt \propto t^{-5/3}$

Si  $dm/dE = \text{cste}$

En fait,  $dm/dE$  dépend un peu  
de la nature de l'étoile ( $\gamma$ )

Le calcul montre de faibles  
variations

Mais dépend des angles et du spin!



# Laboratoire pour étudier les jets

Un évènement TDE dure qqes mois tout au plus

Il peut rayonner à la limite d'Eddington

Taux de TDE  $\sim 10^{-4}$  /an/galaxie Avec 100 000 galaxies,  $\rightarrow$  10 par an

Peut-être plus pour les galaxies

avec amas stellaire nucléaire

Ou galaxie post-starburst

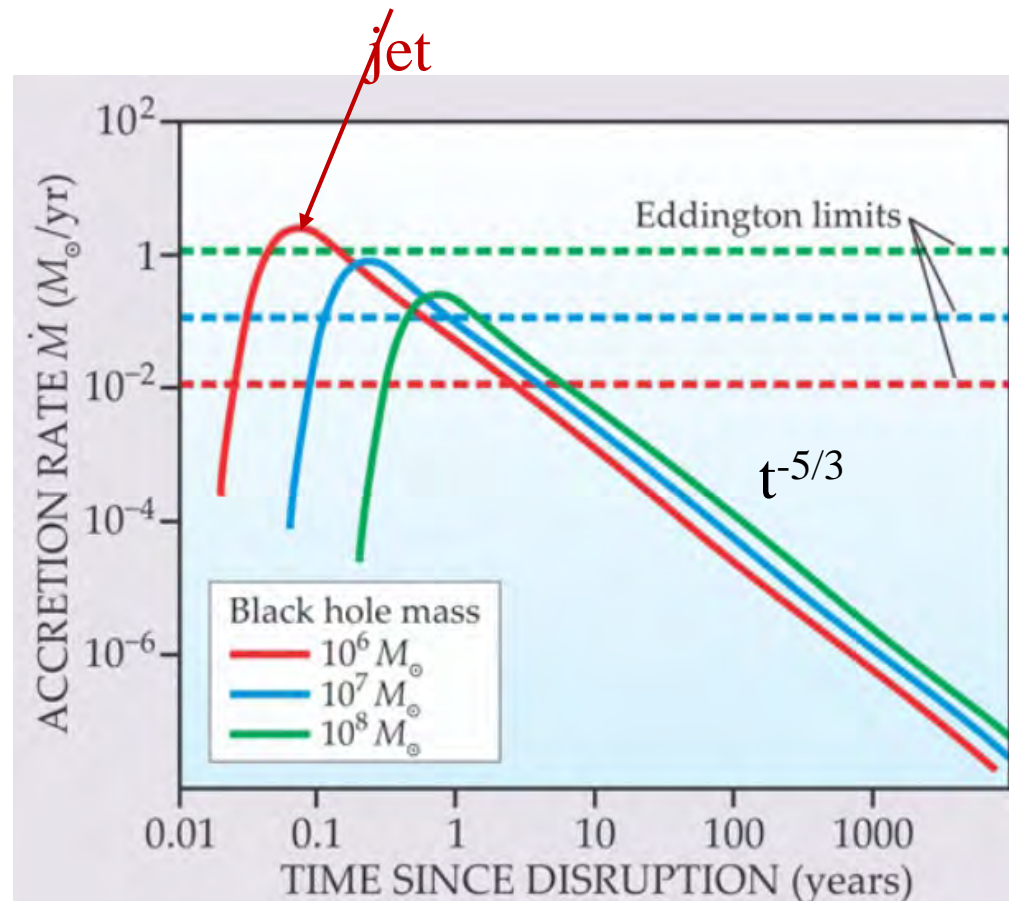
(signatures spectrales E+A)

Limite de Hill

$10^8 M_{\odot} \rightarrow 7 \cdot 10^8 M_{\odot}$  pour

un BH en rotation

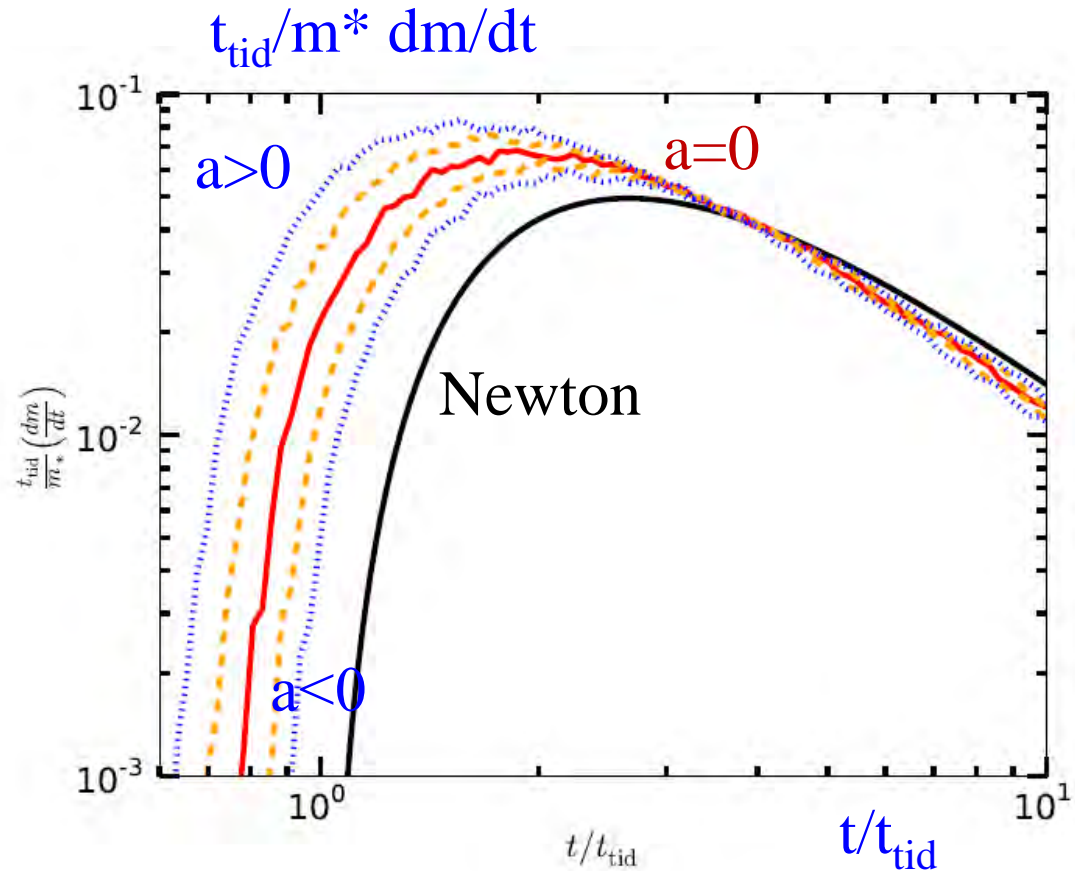
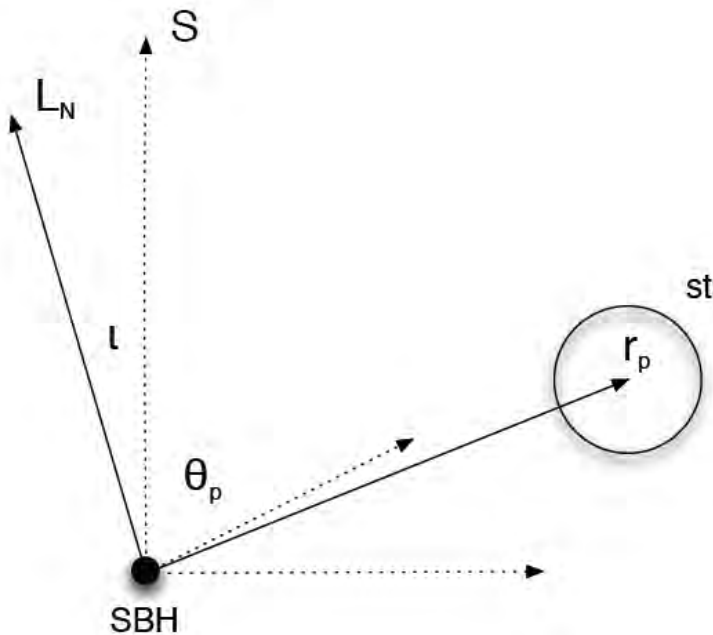
maximale ( $a=1$ )



# Effets relativistes

Proche du trou noir, les effets relativistes sont importants

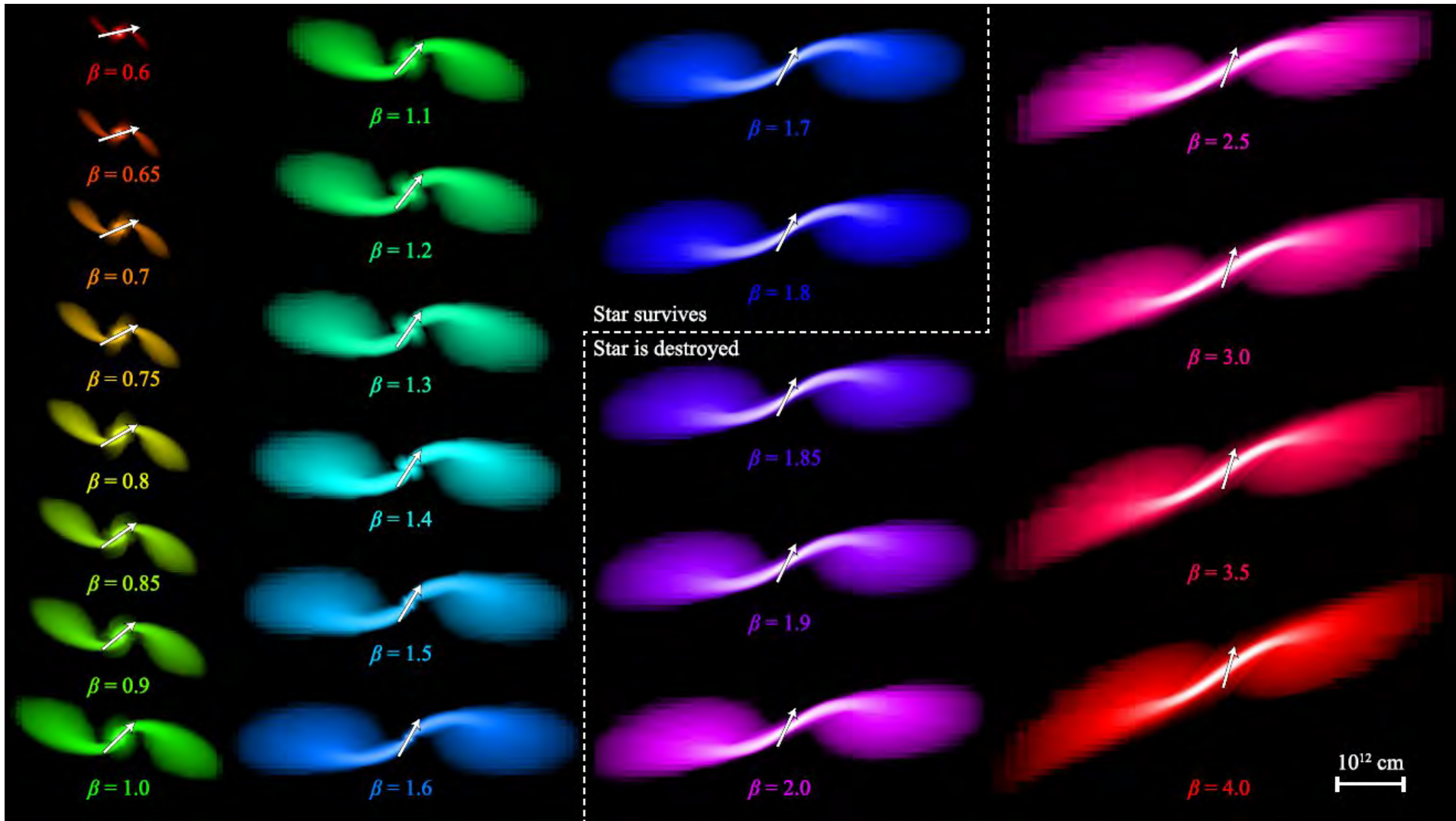
- effet de la rotation du trou noir  $-1 < a < 1$  (ISCO 9, 6, 1  $R_g$ )
- prise en compte de l'inclinaison  $i$ , de l'angle  $\theta_p$





# Simulations

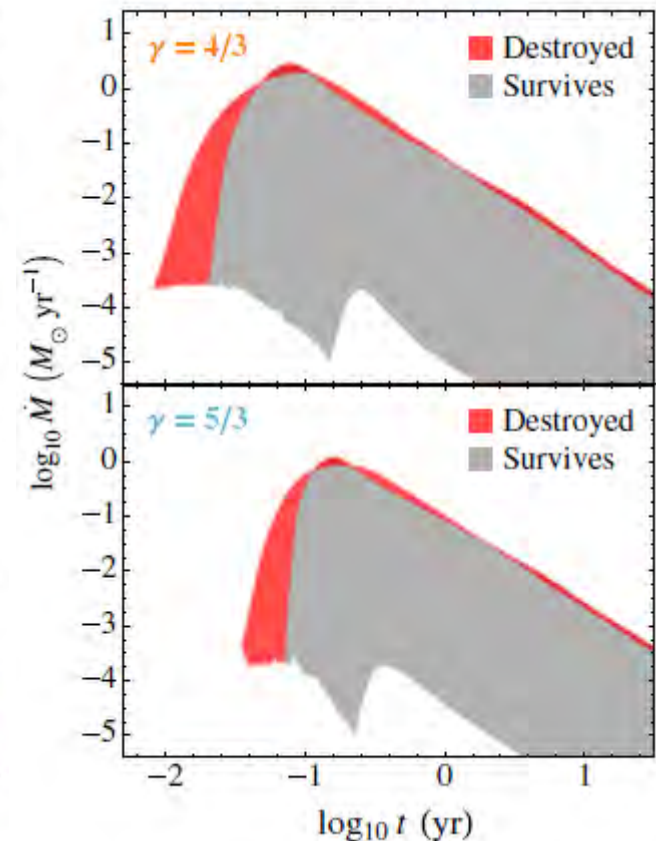
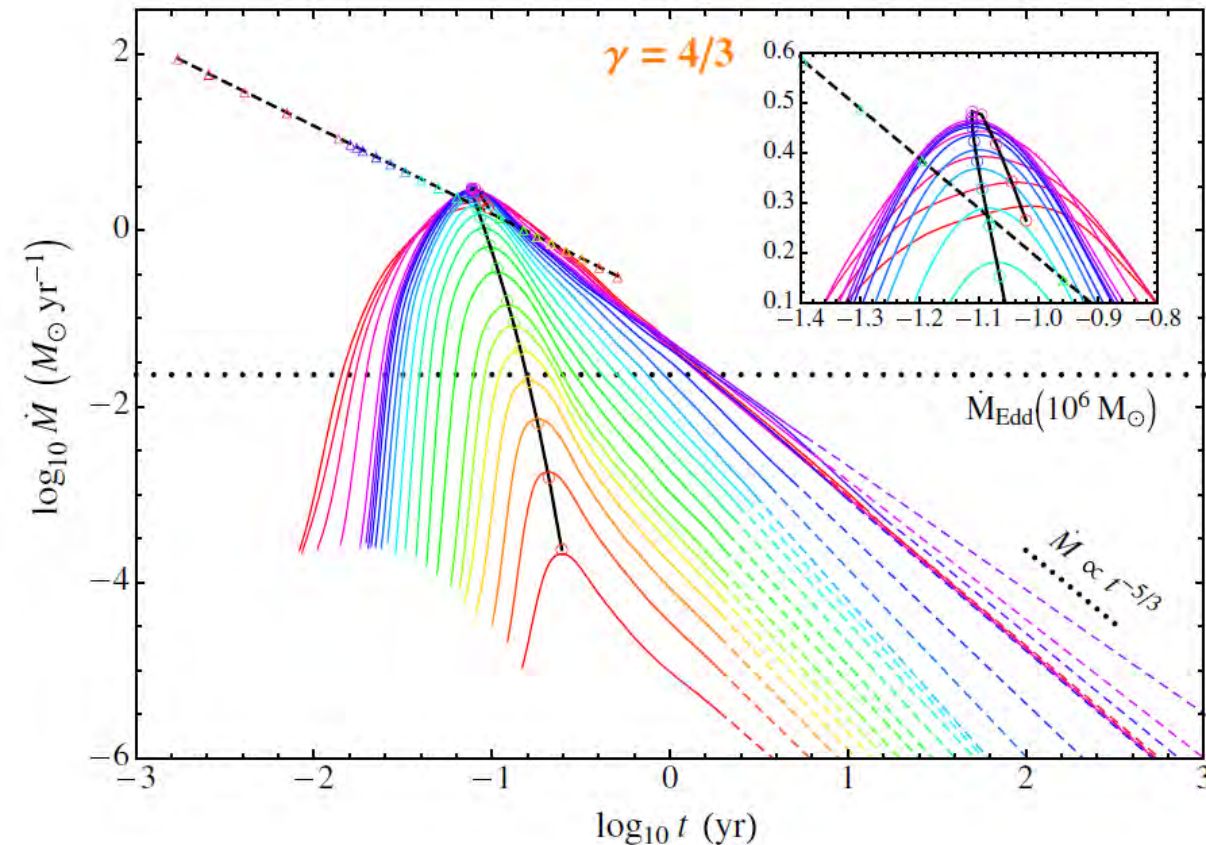
$\beta = R_T / R_{\text{peri}}$      $\beta < 1$  le coeur de l'étoile survit



# Prédiction des simulations

Taux d'accrétion en fonction du temps, même si le coeur survit

Contrairement aux calculs, ce ne sont pas toujours les étoiles les moins concentrées, avec  $R_{\text{peri}}$  le plus petit qui donnent les sursauts rapides

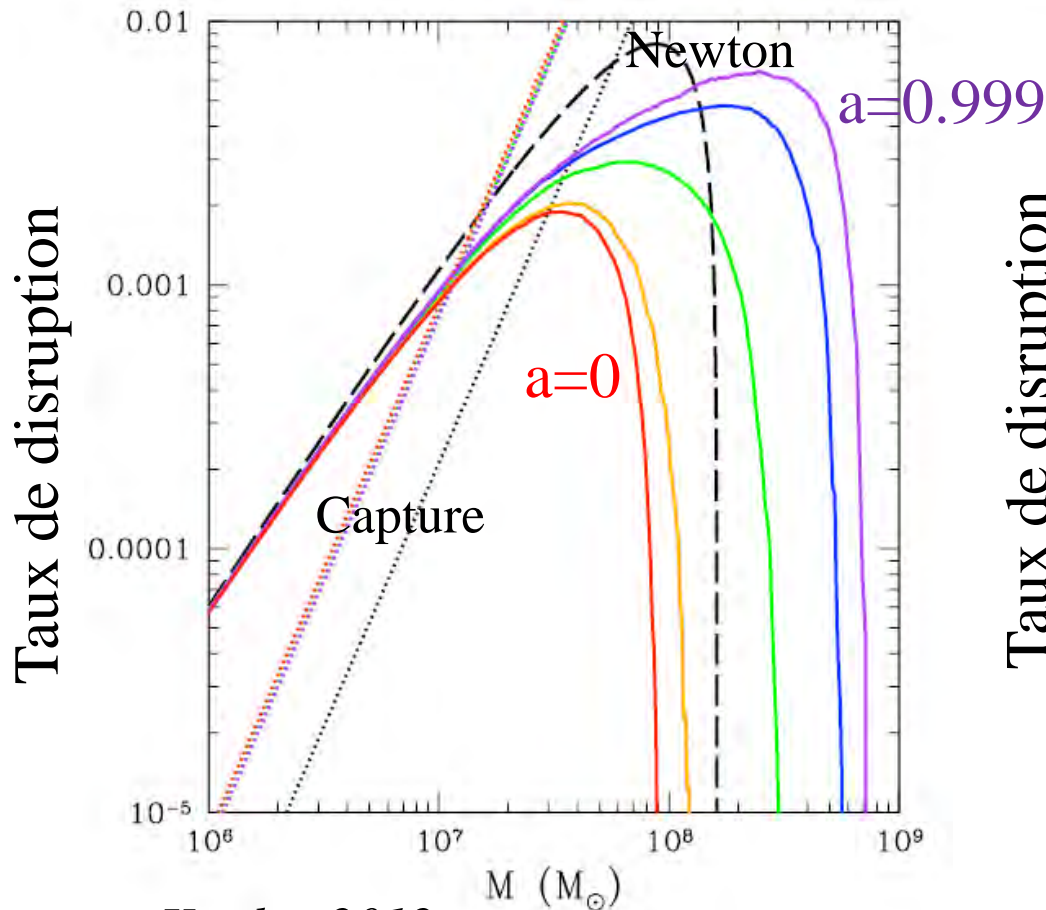


# Selon la densité d'étoiles

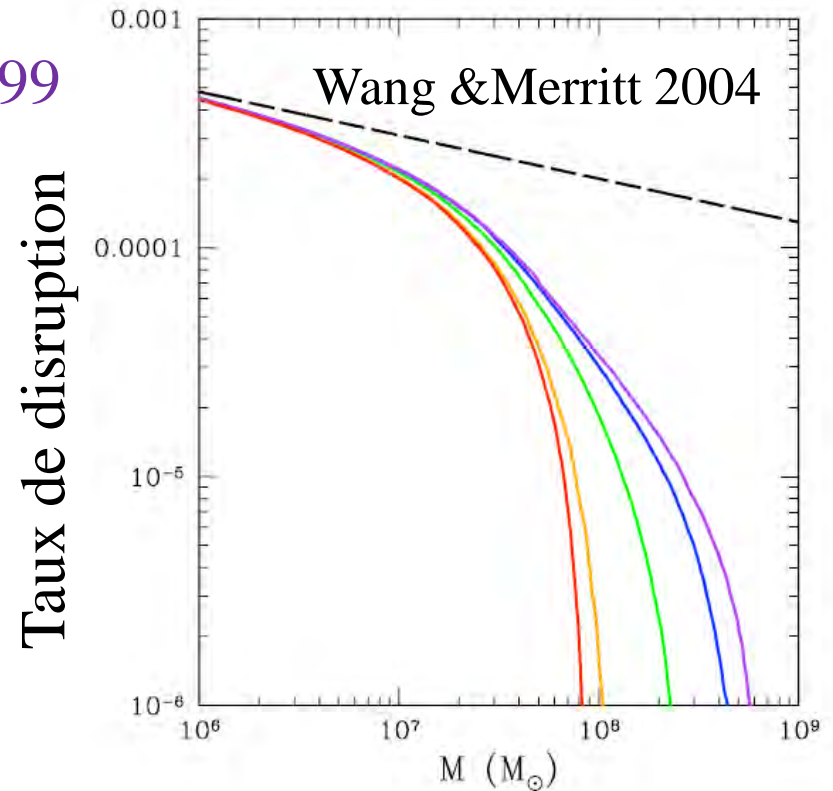
## Taux de capture et disruption

Cœur de densité cste  $n=10^5/\text{pc}^3$   
avec  $\sigma = 100\text{km/s}$

Densité en loi de puissance  
avec relation  $M-\sigma$



*Kesden 2012*



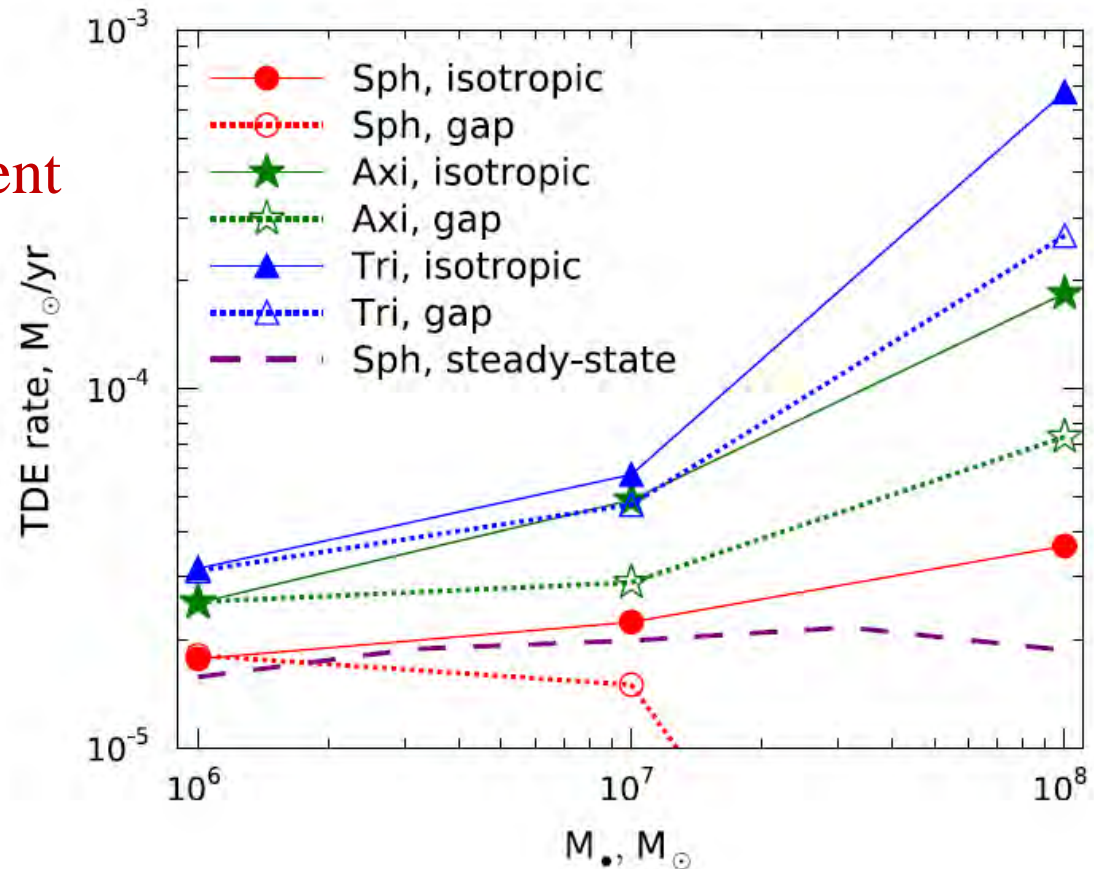
$a=0, 0.5, 0.9, 0.99, 0.999$

# Influence des fusions

Lors de fusion de galaxies, et de trous noirs, brassage des étoiles  
Moins de pertes dans le cône, +forme triaxiale ou axisymétrique

Taux de TDE fortement  
augmenté

En particulier  
à grande masse  $M_{\text{BH}}$



# TDE possibles

$R_p$  péricentre  
 $R_T$  rayon de marée

## Les étoiles détruites

Naines blanches C-O  $0.6M_\odot$   
 Naines blanches He,  $0.17M_\odot$

→ Possible SN

Séquence principale (MS)

$1M_\odot$

Géantes rouges (RG)

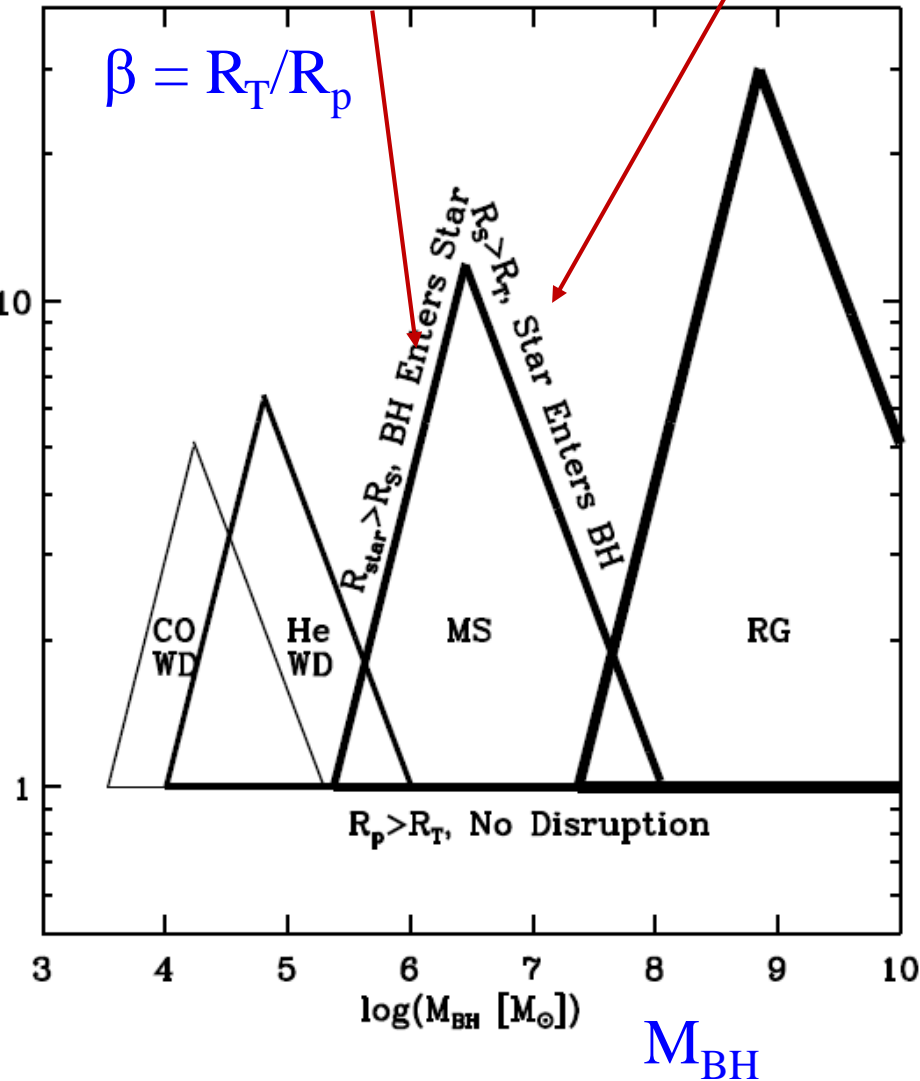
$1.4M_\odot$

Conditions  $R_* < R_S$

Et  $R_T > R_S$

Le BH rentre dans l'étoile  
 $R_S < R_*$

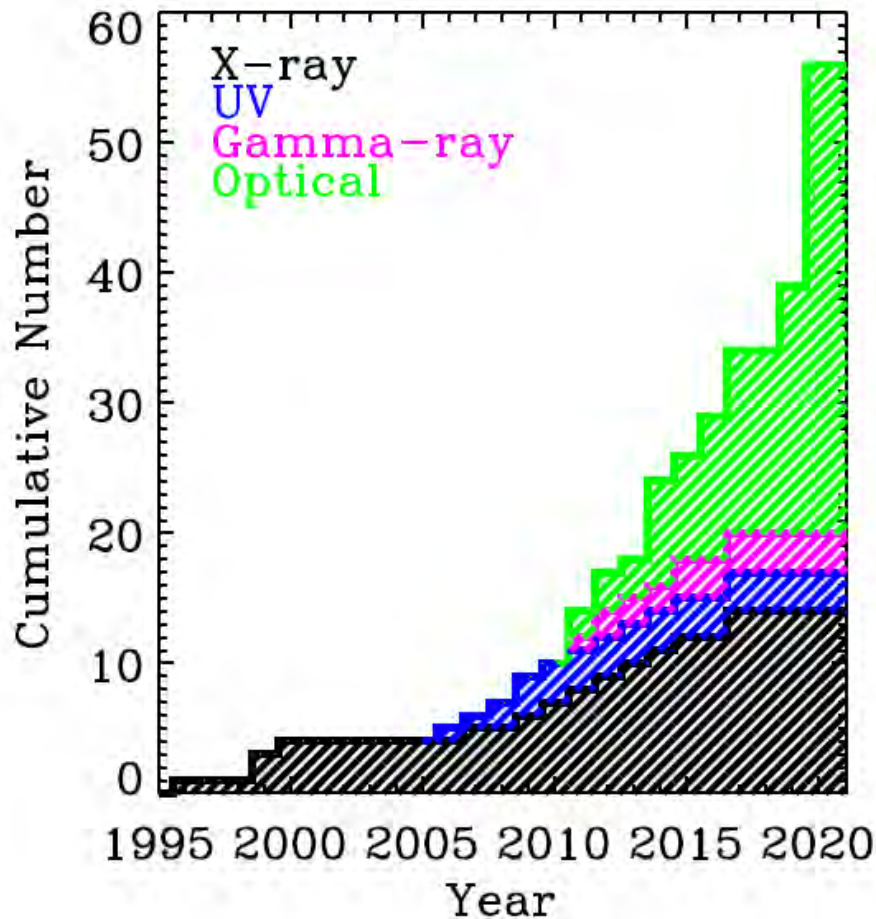
Etoile rentre dans le BH  
 $R_S > R_T$



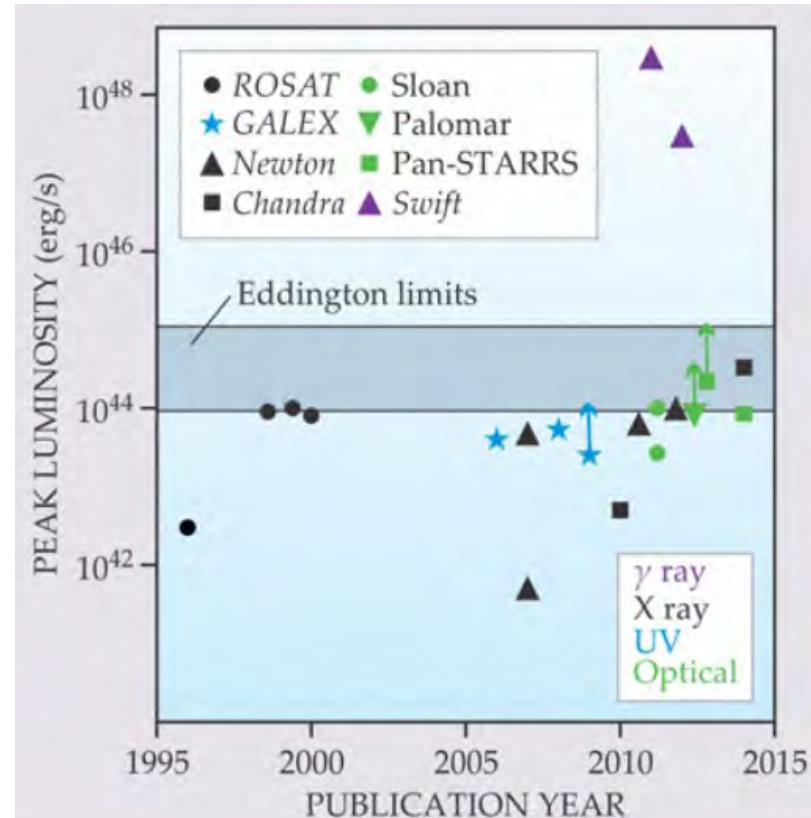
# Observations de TDE

**56 connues actuellement** – Les TDE sont détectées quand il n'y a pas d'AGN, ni de supernovae au centre des galaxies (éviter la confusion)

10% des TDE ont des jets détectés en radio



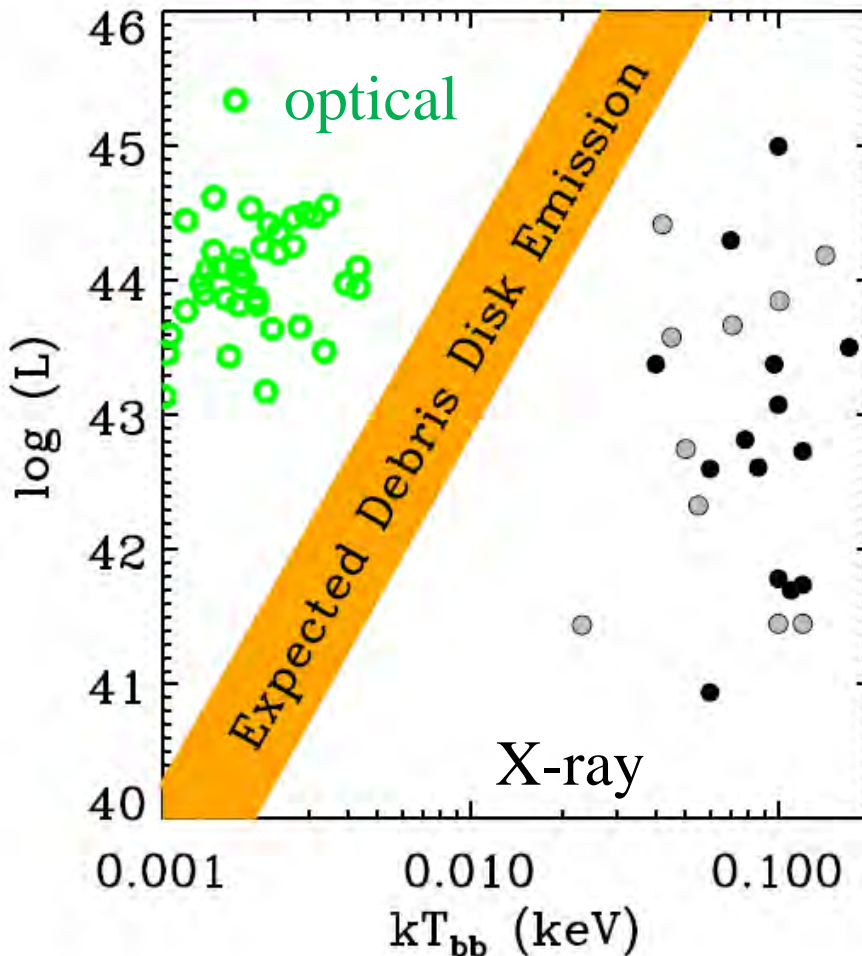
Gezari 2021



# Propriétés des TDE

Luminosité, température (émission thermique X-mou, optique)

Expected:  $1M_{\odot}$ ,  $M_{\text{BH}}=10^6-10^8M_{\odot}$



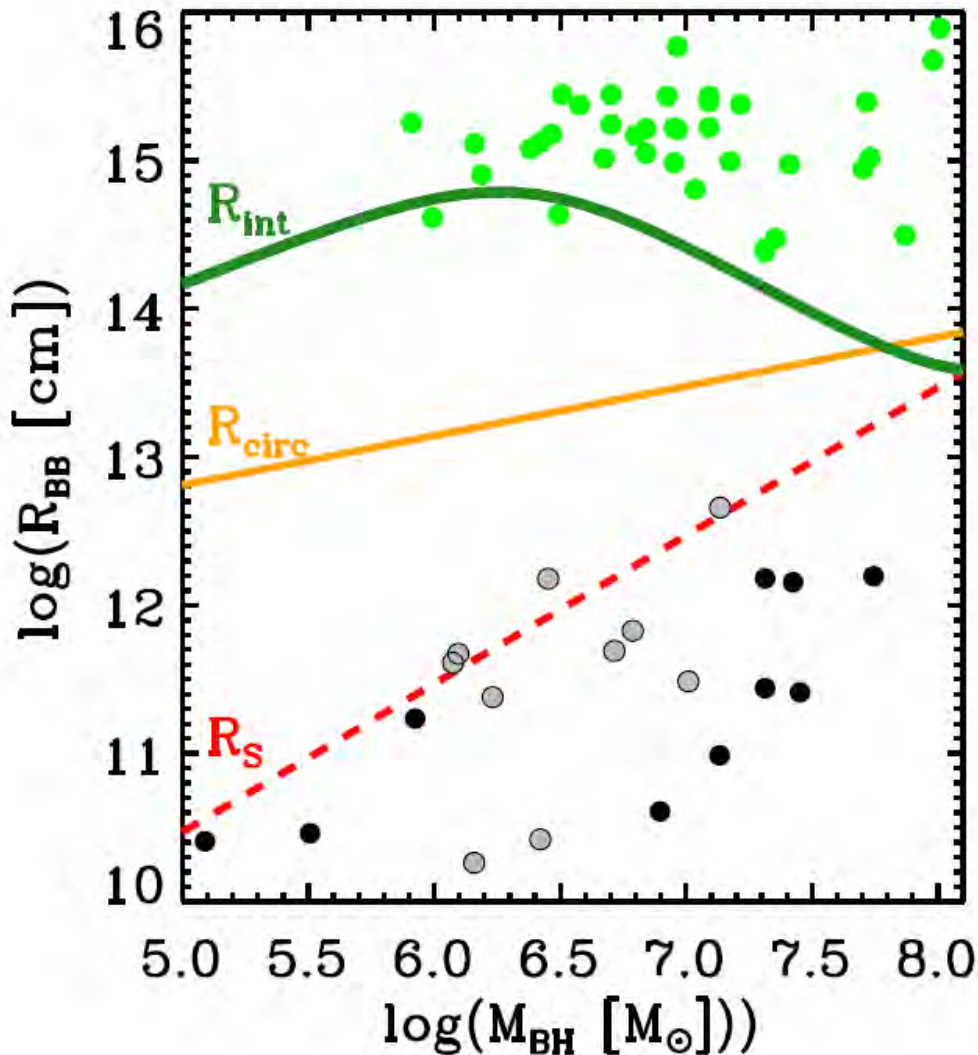
Gris: detection en optique et X  
Plus de suivi en optique  
Les sursauts X sont mous  
Durée quelques mois  
→ Emission de corps noir  $T_{\text{bb}}$

Aucune des observations ne correspond au modèle de  
Disque:  $T_{\text{bb}} 4 \cdot 10^5 \text{K} \lambda_{\text{Edd}} M_{\text{BH}}^{-0.25}$   
 $R_{\text{disk}} = 2 R_{\text{T}}$

# Interprétation des rayons

$$L = 4 \pi \sigma R_{\text{bb}} T^4$$

Différence optique-X: obscuration, délai, variabilité en X



Auto-intersection  
des courants de débris

$$= 2 R_{\text{T}}$$

En X et UV rayons  
proches de l'horizon



# Interprétation

Peut-être un vent, de rayon  $R_{\text{wind}} \gg R_{\text{bb}}$   
expliquerait la grande taille en optique/UV

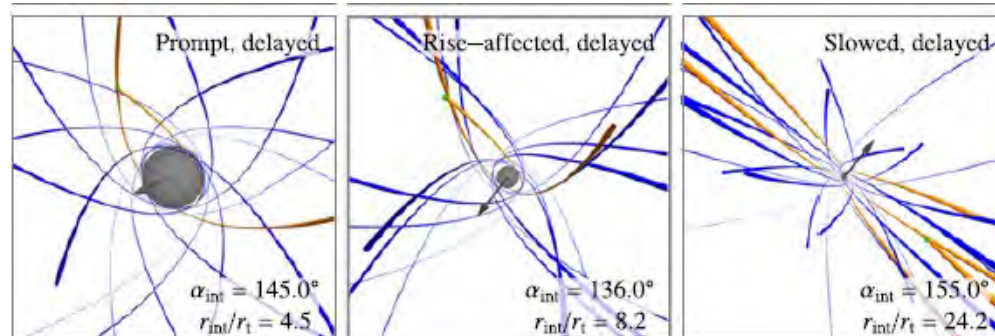
**Pour les X, le vent est opaque** par diffusion des e-  
La géométrie, ou la porosité du milieu laisserait passer  
les X du disque d'accrétion



Si précession relativiste: les débris ne se rencontrent plus  
à la re-intersection  $\rightarrow$  période « noire » pour le TDE

Il n'y a pas de dissipation, délai qqes années  
Le pic d'émission est retardé, et diminué, et la  
Décroissance est un peu différente de  $t^{-5/3}$

Des TDE ont pu être manqués



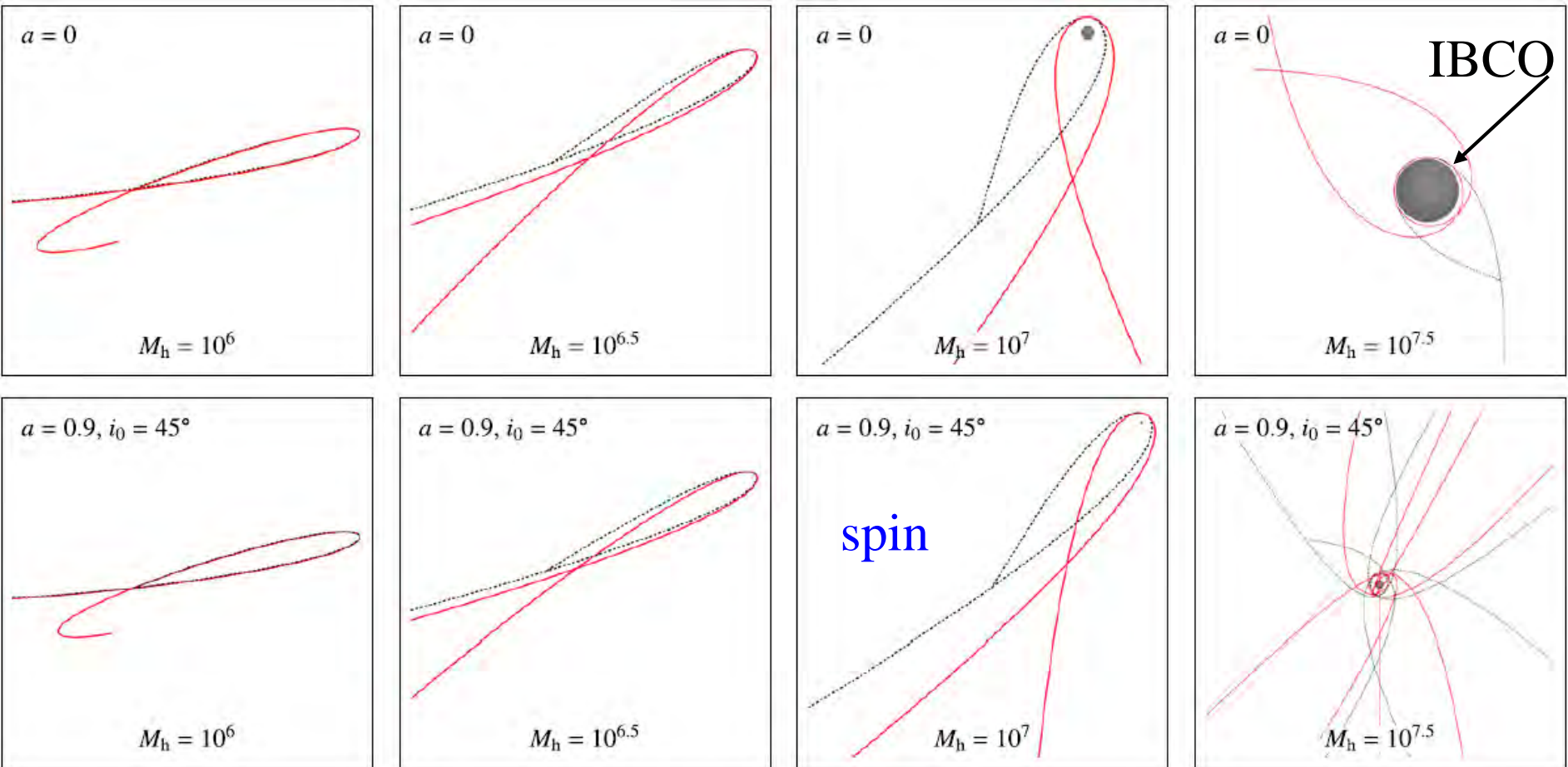
# Circularisation retardée

Solution exacte ----

Solution heuristique

Innermost Bound Circular Orbit

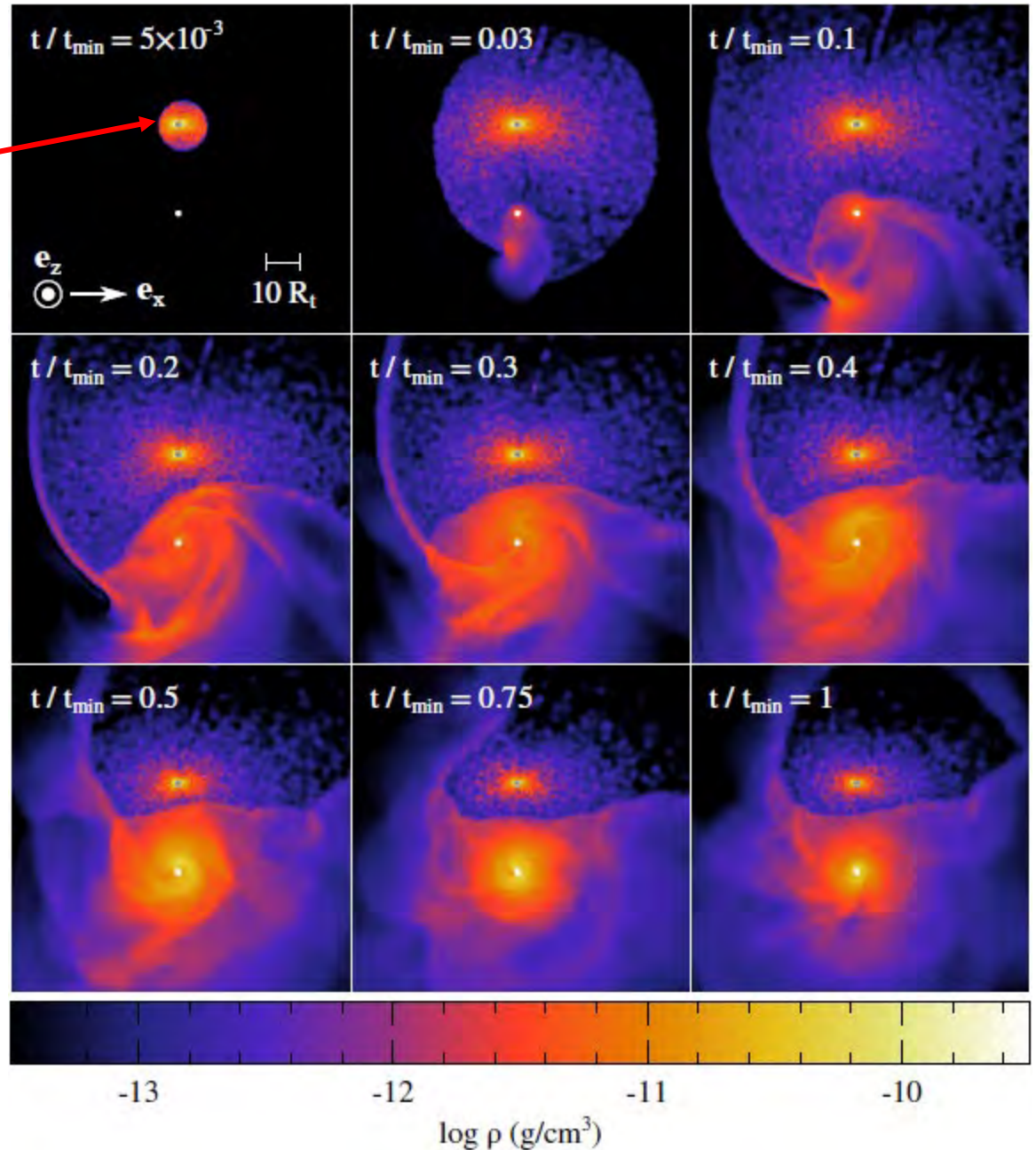
$M_{\text{BH}}$  croissant →



# Simulations

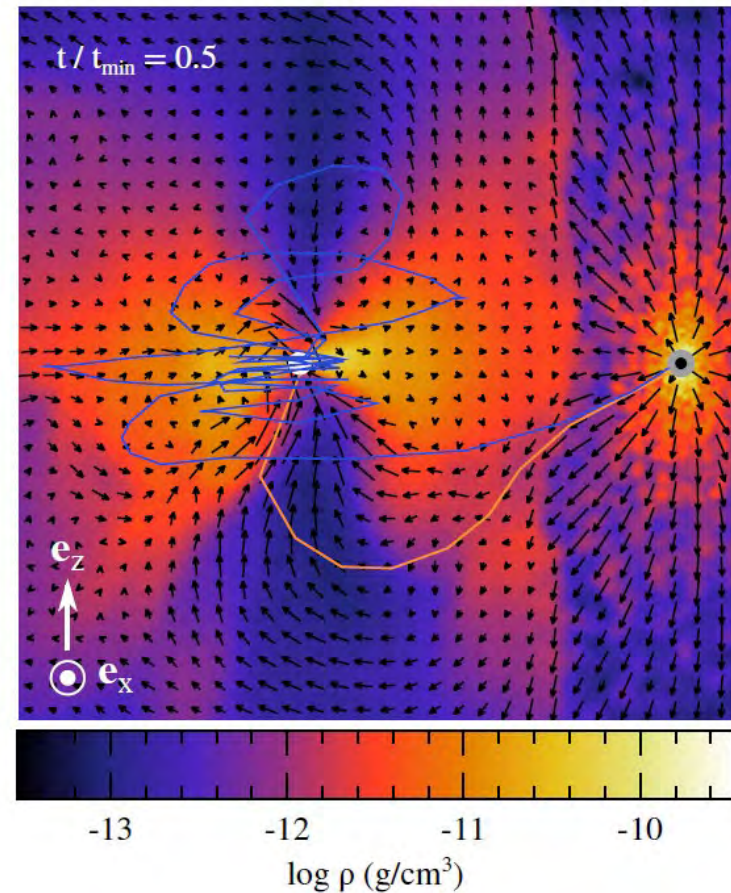
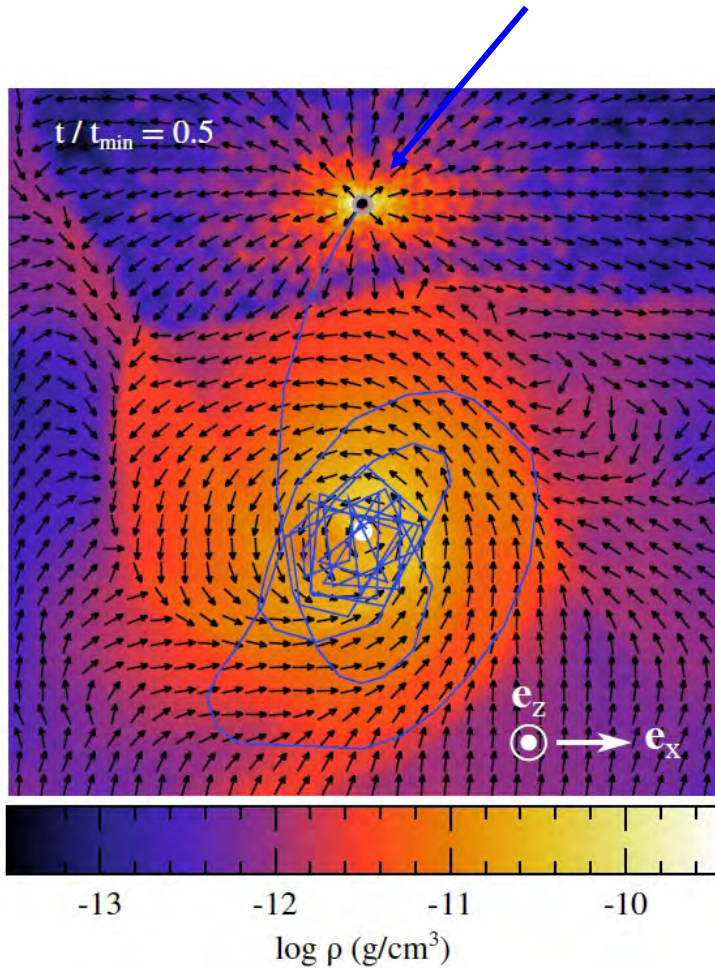
Le point d'intersection est artificiellement le lieu d'injection de particules

L'émission optique vient essentiellement de Rintersection, et pas du disque d'accrétion



# Choc des courants dû à la précession

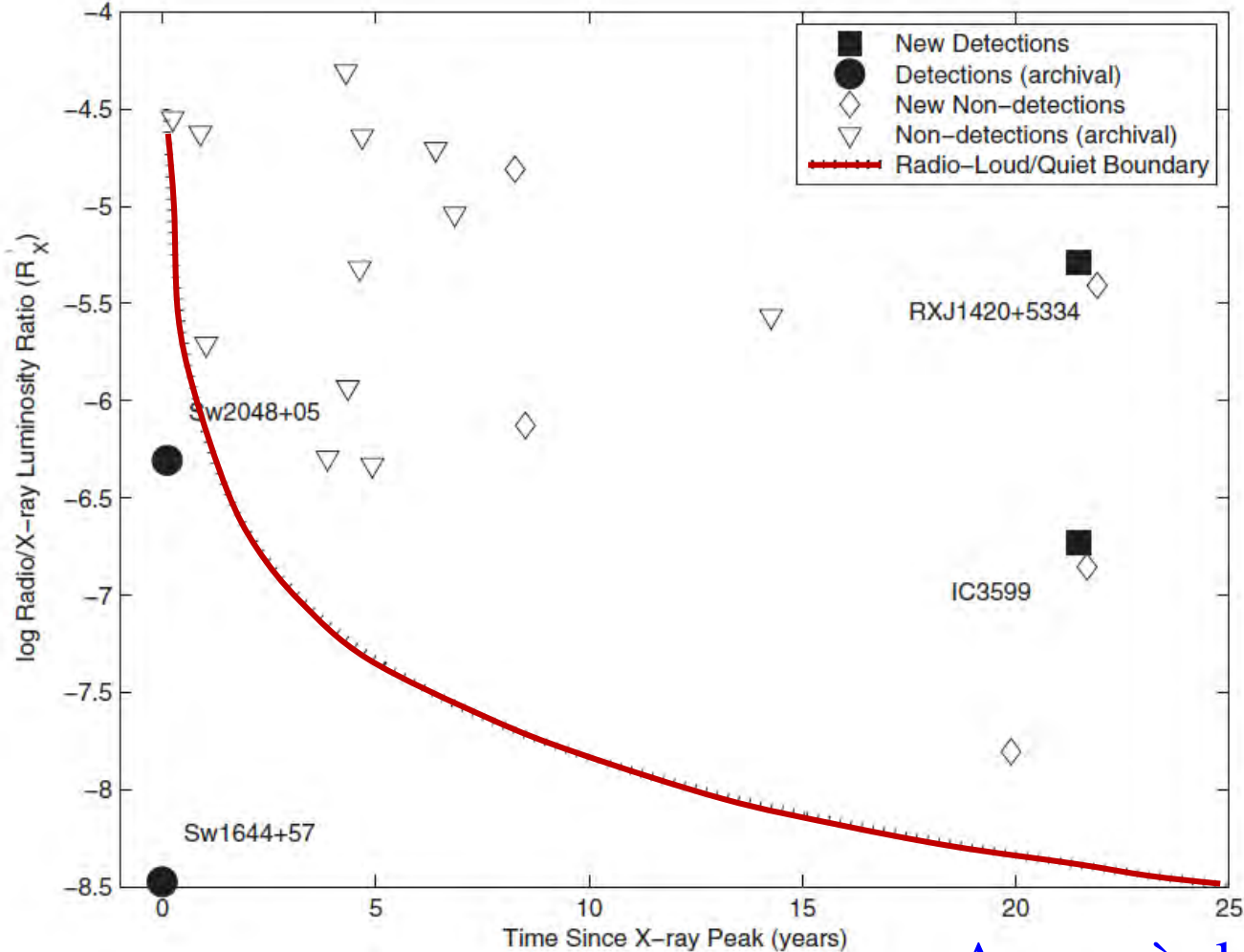
Particules lancées à partir du choc (jet)



# Détection de jets radio

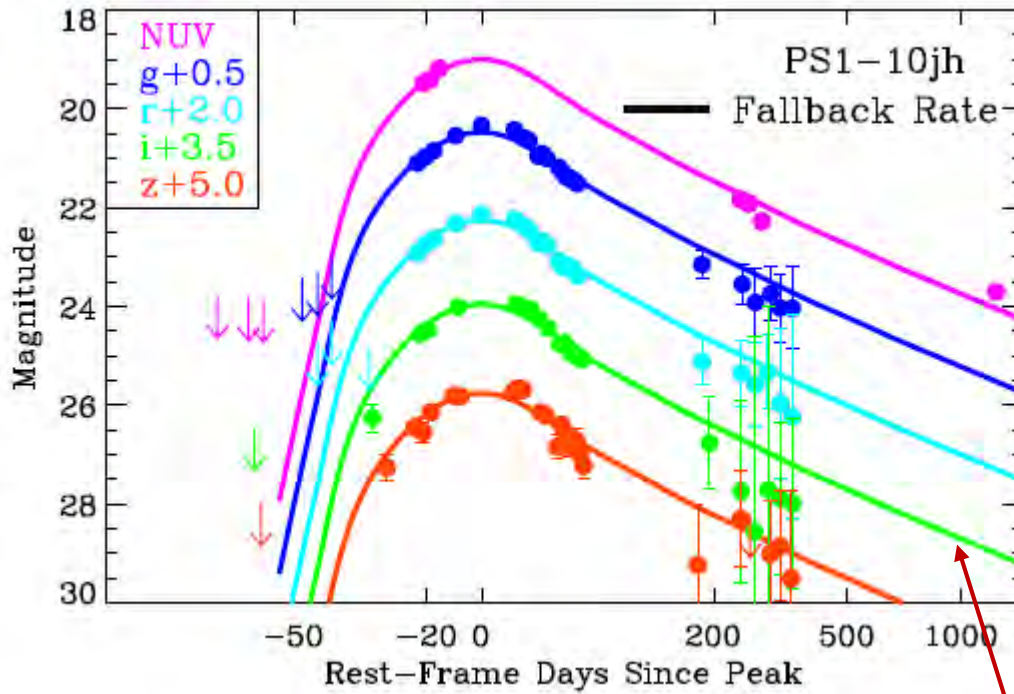
Uniquement après que rapport Edd  $< 10^{-2}$   
10% des TDE auraient des jets radio

Radio/X



Pour  $1M_{\odot}$   
BH de  $10^7M_{\odot}$

# TDE PS1-10jh

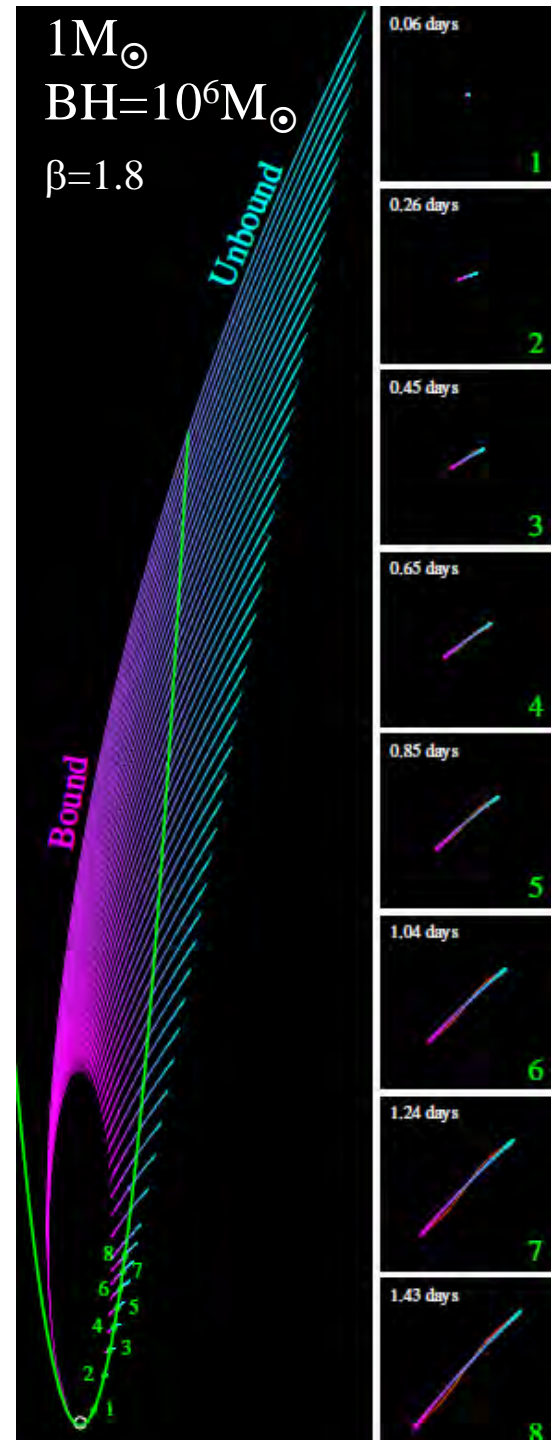


NUV Galex  
Pan-STARRS1 griz

Redshift=0.1696

Courbes= fit  
des paramètres

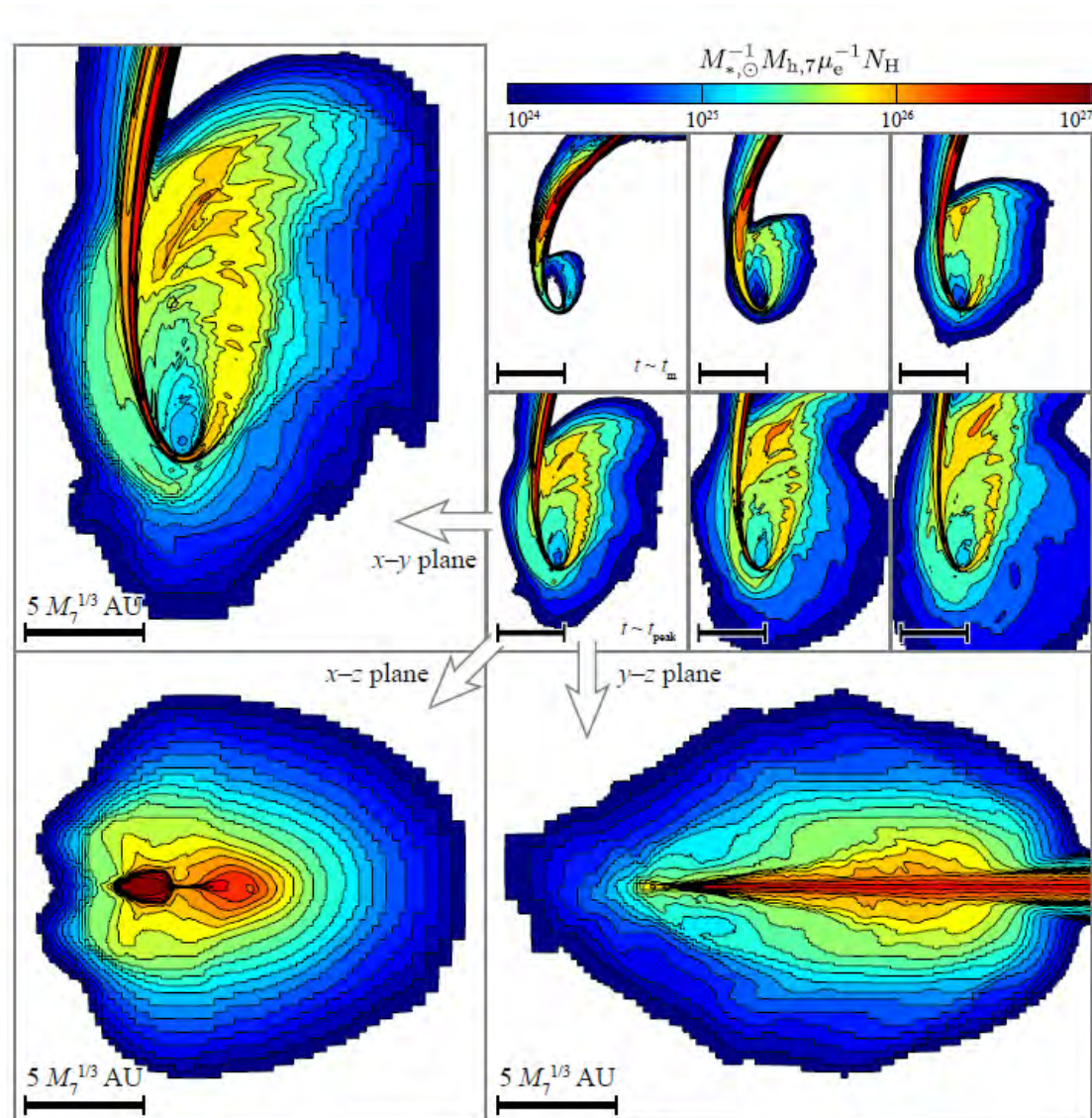
Guillochon 2013



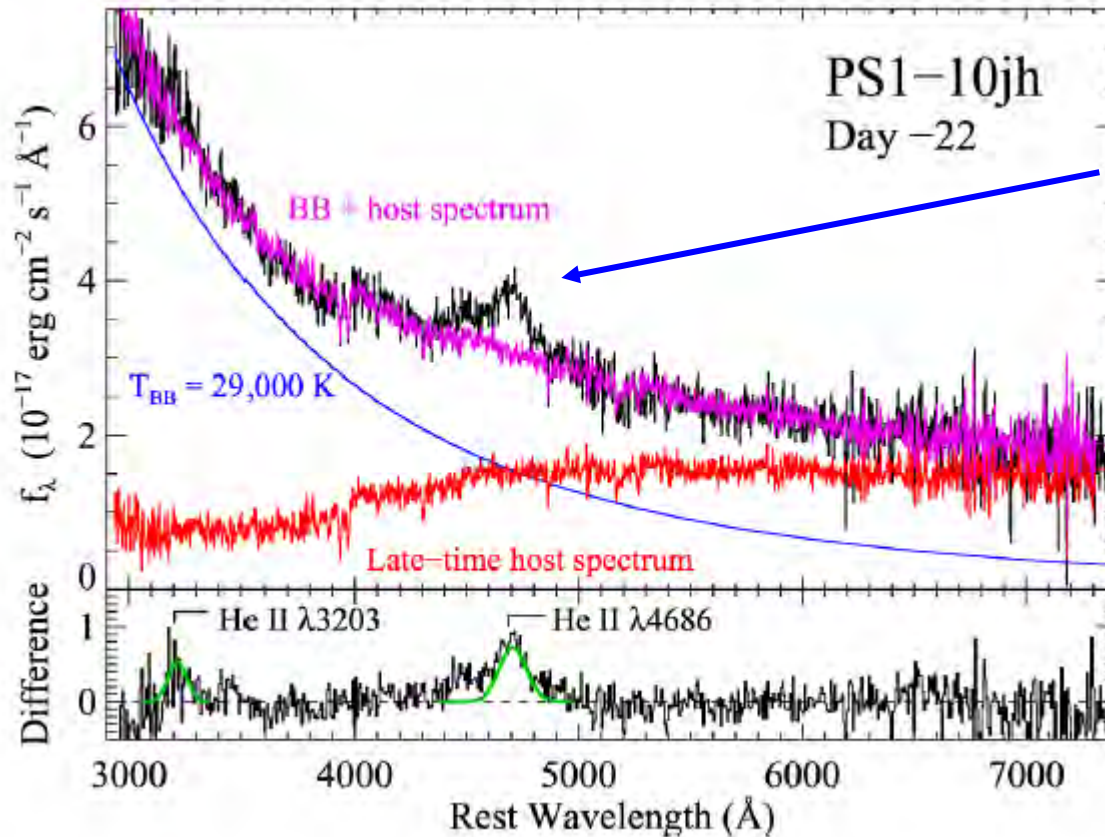
# TDE simulation

Pour une étoile de  $1M_{\odot}$   
 $M_{\text{BH}}=10^7M_{\odot}$  conduit  
à un dt trop petit,  
 $M_{\text{BH}}=10^3M_{\odot}$ ,  
remis à l'échelle

Le disque d'accrétion  
est très fourni, très proche  
du trou noir  
BLR HeII  
et pas de H $\alpha$



# TDE PS1-10jh



Detection d'une raie large  
De HeII, un peu avant  
le pic du sursaut

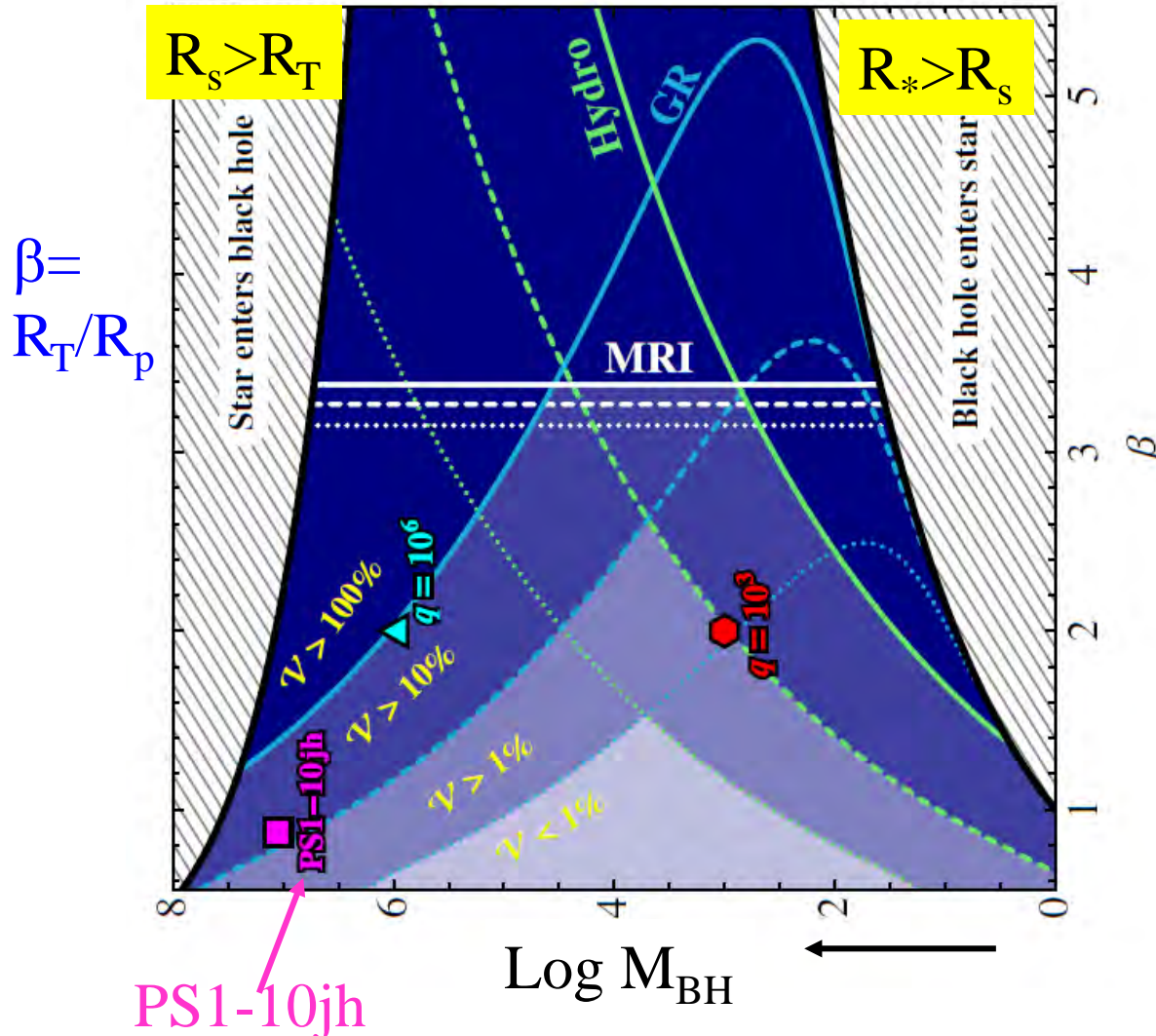
Cumulée avec le fond  
de corsp noir à  
 $T=29\ 000 \text{ K}$

FWHM=9000km/s BLR en HeII



# Dissipation des débris $\nu = dE/dt t_0/E$

$\nu$  Taux de dissipation 1-100%, par chocs hydro, précession relativiste



MRI instabilités  
Magneto-rotationnelles

B très amplifié  
→ compression

Ces mécanismes de  
dissipation contribuent  
à la circularisation des  
débris

# Interprétation de TDE PS1-10jh

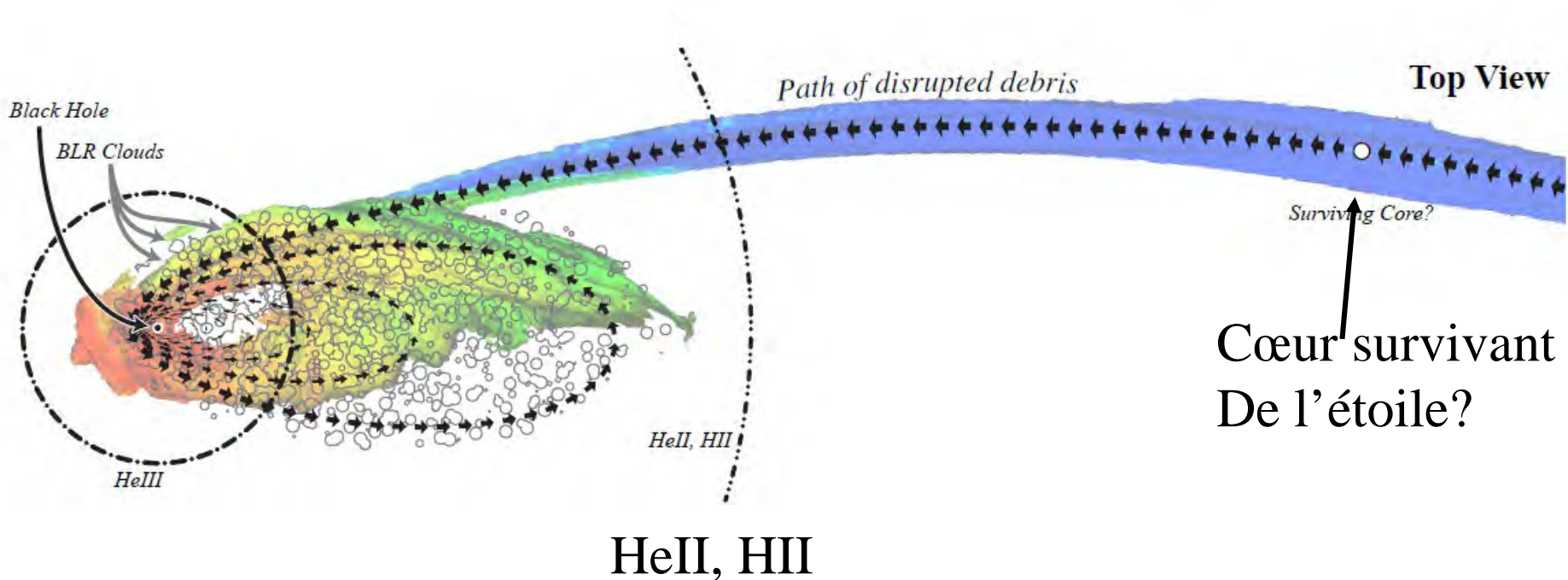
Etat du gaz, 5 jours après le sursaut

Couleur = température

Débris liés, retombent dans les ellipses ----

$$V = q^{-2/3}/\beta \quad \text{avec } q=1000$$

10% de l'énergie du gaz est dissipée en retombant



# Mesure de la masse du trou noir

$$\begin{aligned} \text{Temps de chute des débris} &= 2\pi G M_{\text{BH}} (2E)^{-3/2} = \frac{\pi}{M_{\star}} \left( \frac{M_{\text{BH}} R_{\star}^3}{2G} \right)^{1/2} \\ &= 0.11 \text{ an } R_{\star}^{3/2} M_6^{1/2} / M_{\star} \end{aligned}$$

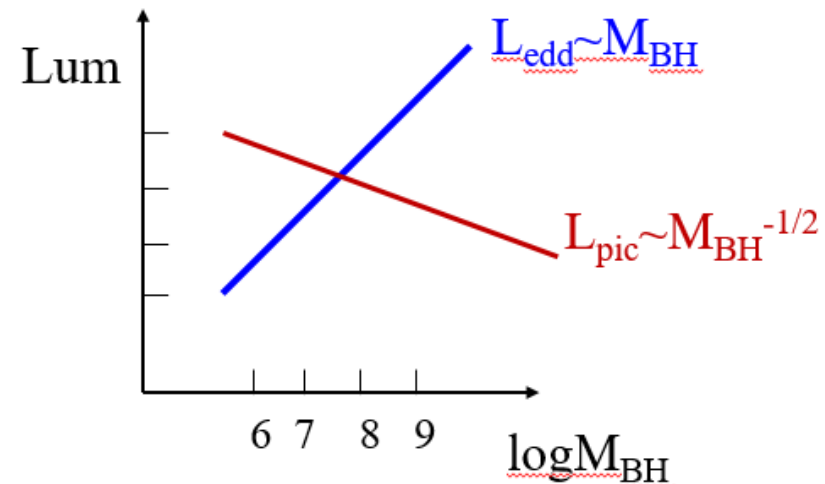
1 mois pour  $10^6 M_{\odot}$ , jusqu'à 1 an pour  $10^8 M_{\odot}$

± bien vérifié :  $\Delta T = t_{\text{pic}} - t_{\text{D}} \propto M_{\text{BH}}^{1/2}$

Loi de la Luminosité en  $t^{-5/3}$  surprenamment bien suivie  
avec des variantes avec  $\lambda$

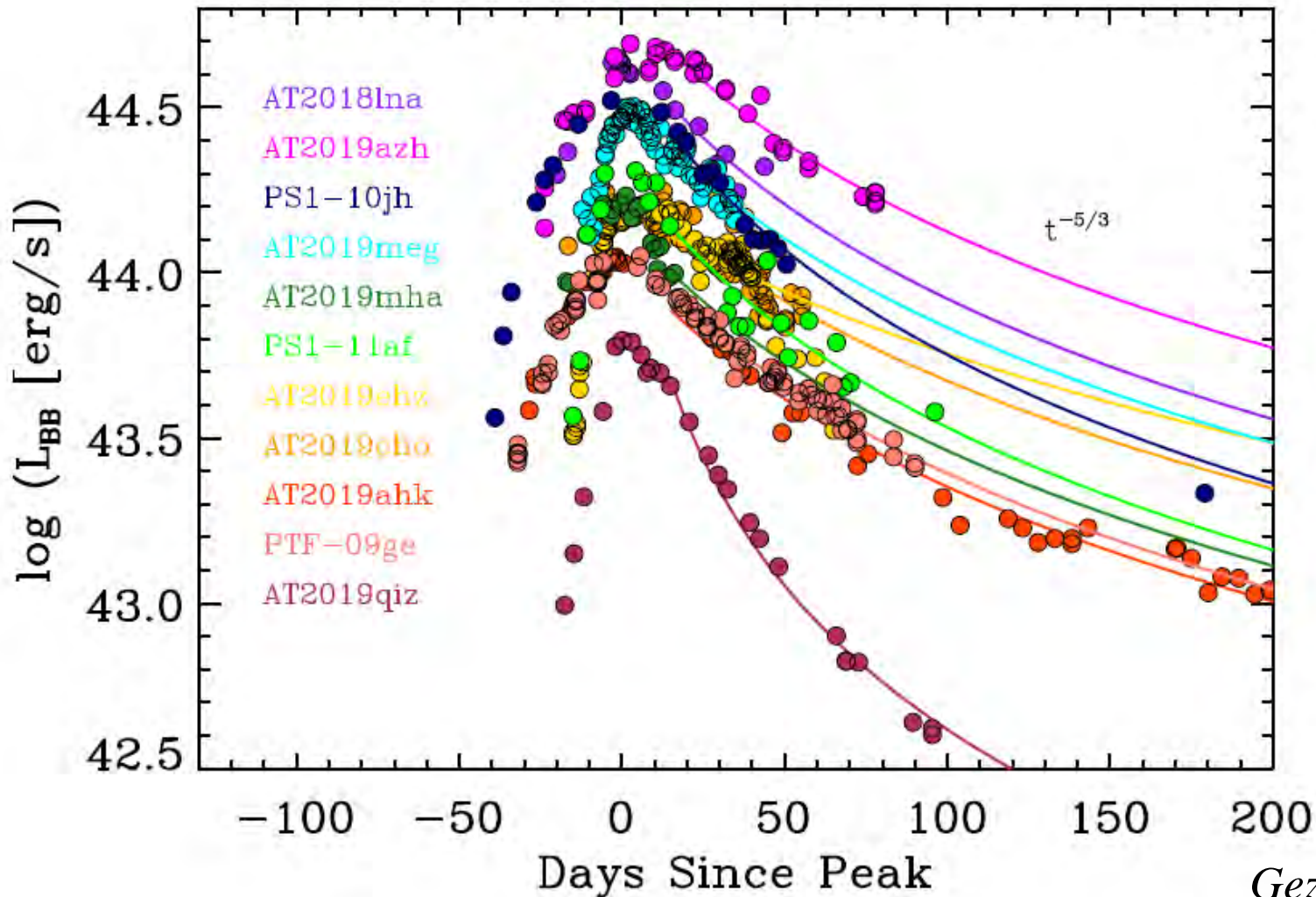
Rap. d'Eddington =  $133 M_6^{-3/2} M_{\star}^{4/5}$

Super-Edd  $M_{\text{BH}} < 3 \cdot 10^7 M_{\odot}$ ,  
et sous-Edd au delà

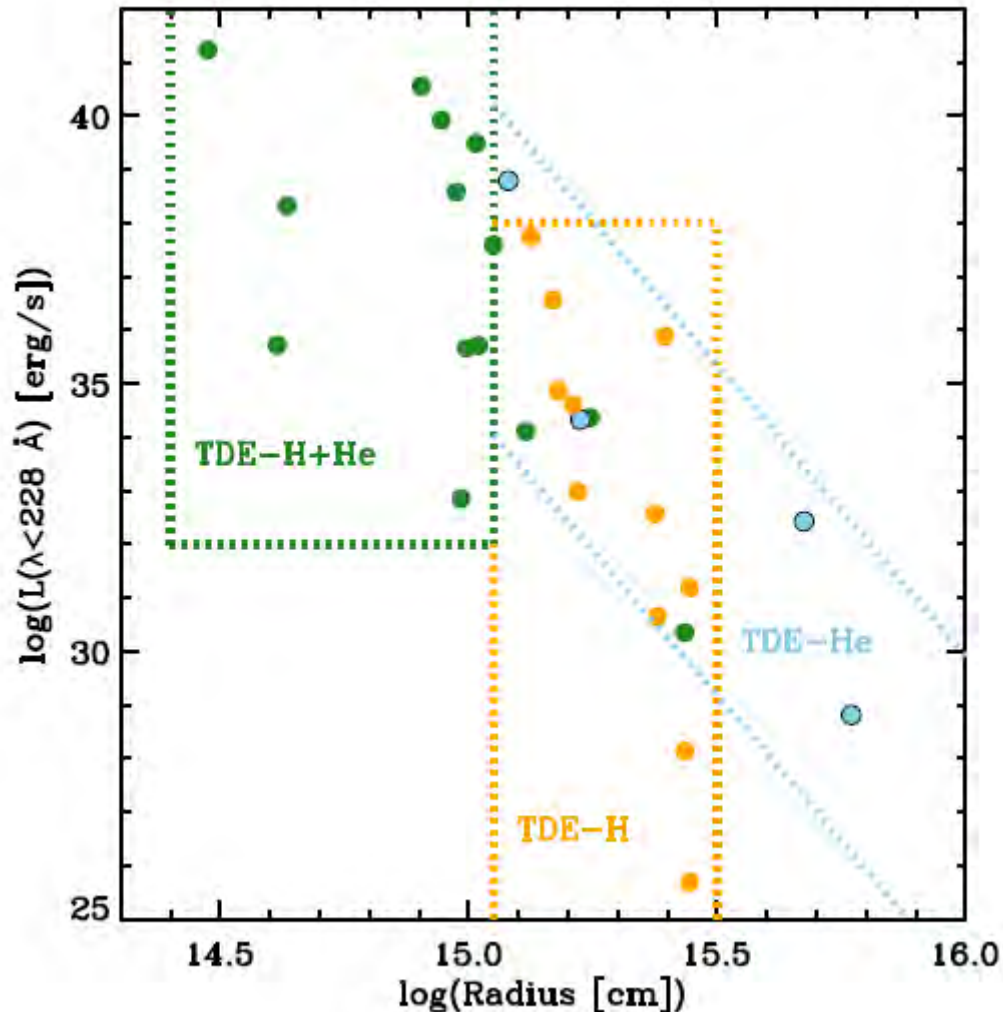


# Courbes de lumière

Raies BLR de He II4686, mais pas de H $\alpha$ ; assez général  
Gaz vient des étoiles enrichies en He, mais aussi le disque  
d'accrétion non étendu – Certaines TDE ont H $\alpha$ , d'autres HeII +H $\alpha$



# Taille du disque d'accrétion



Luminosité  $\lambda < 228 \text{ \AA}$   
Capable d'ioniser He, et de  
produire les raies de  
fluorescence de Bowen,  
Raies de OIII, NIII

Plusieurs classes de TDE  
Selon les raies observées

H+He ou H seul, He seul

# Echo en infrarouge moyen

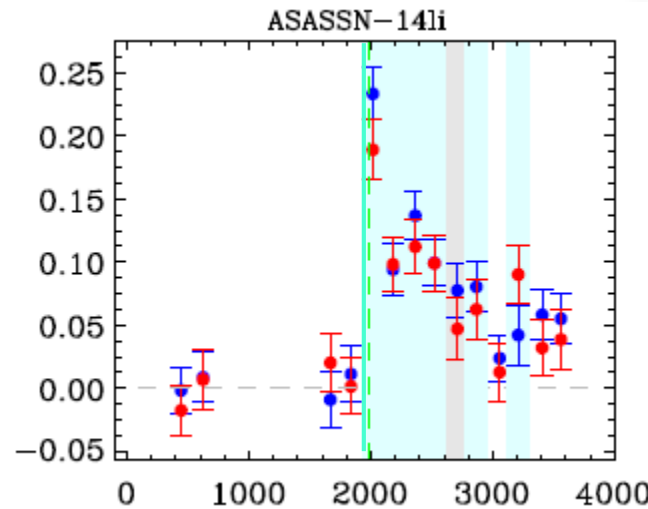
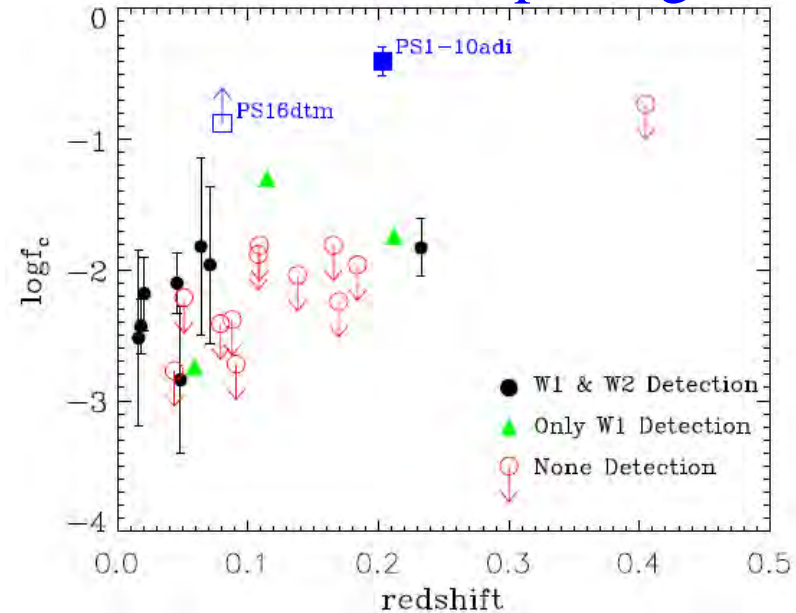
La poussière se trouve bien plus loin  
du noyau  
On attend un sursaut MIR  
des années après

Recherche dans WISE de la variabilité

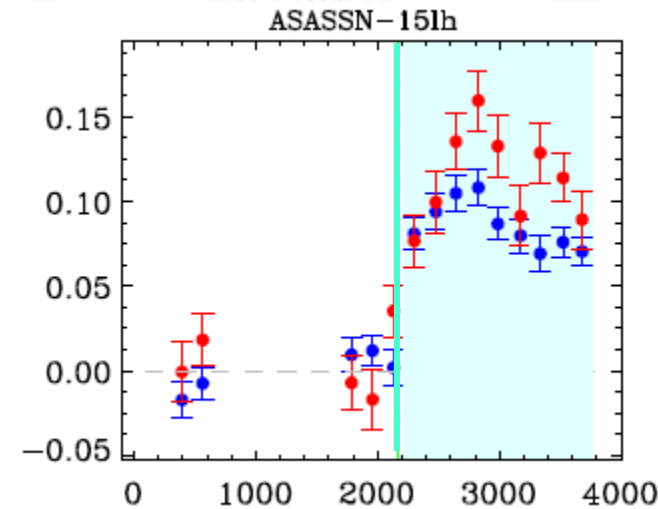
Poussière couvrant  
 $f < 0.01$  de la surface

$f = E_{\text{dust}}/E_{\text{abs}}$

## Facteur de remplissage



jours



*Jiang et al 2021*

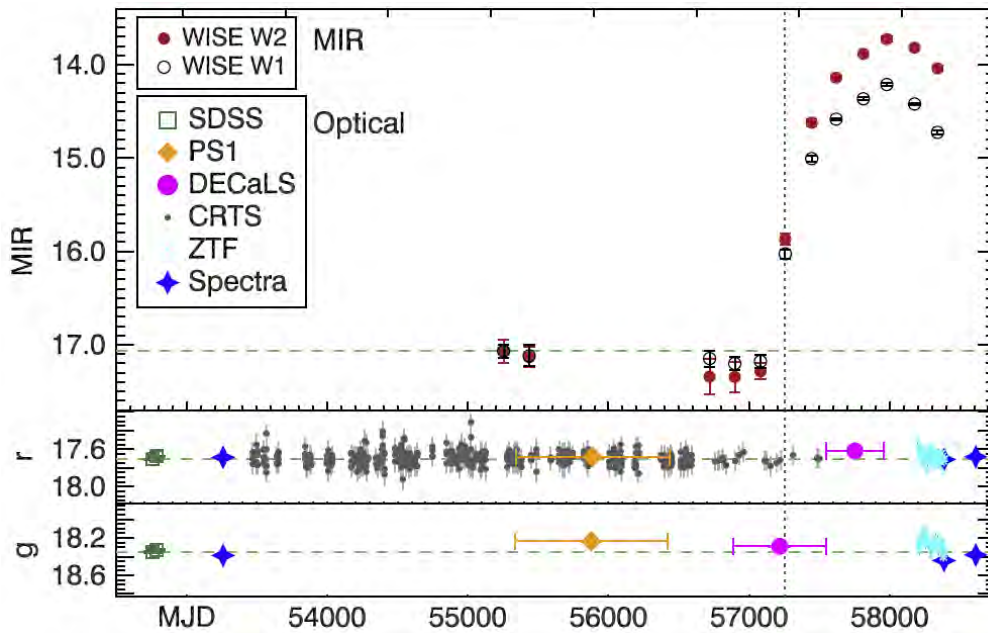
# Echo de la poussière

J1657+23  $z=0.059$

Sursaut en MIR, mais  
Pas de variabilité optique  
→ Pas de Sne

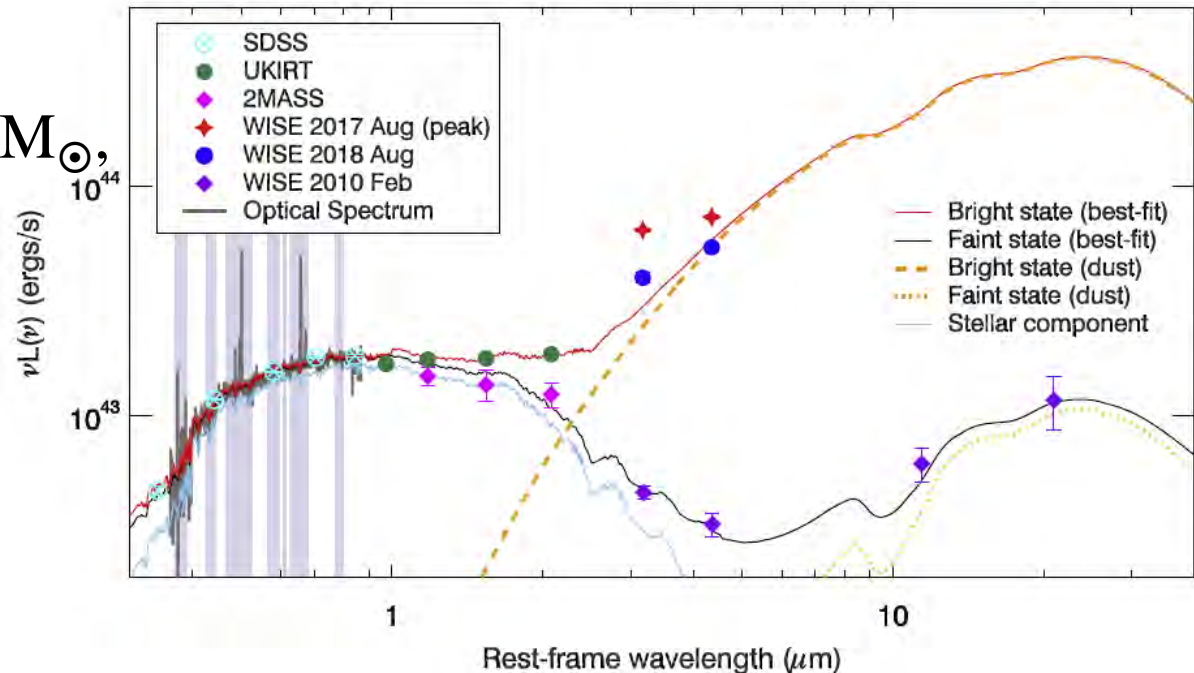
Tore de poussière à  $R \sim \text{pc}$ ?

*Yang et al 2019*

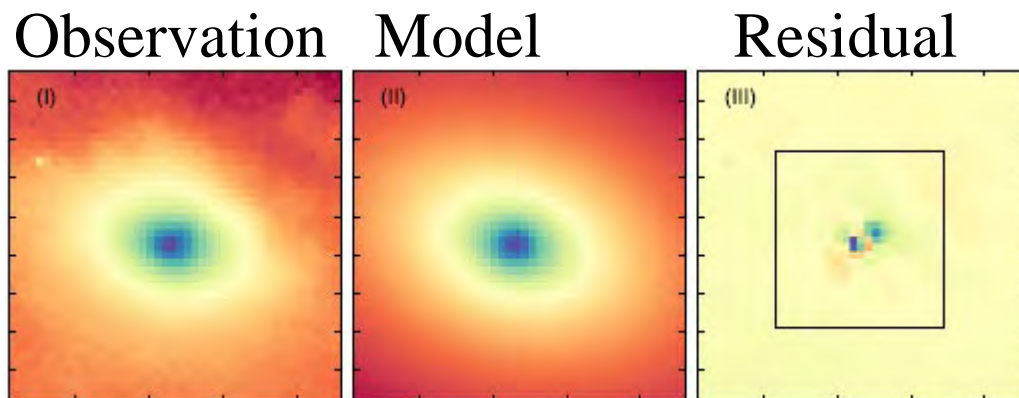
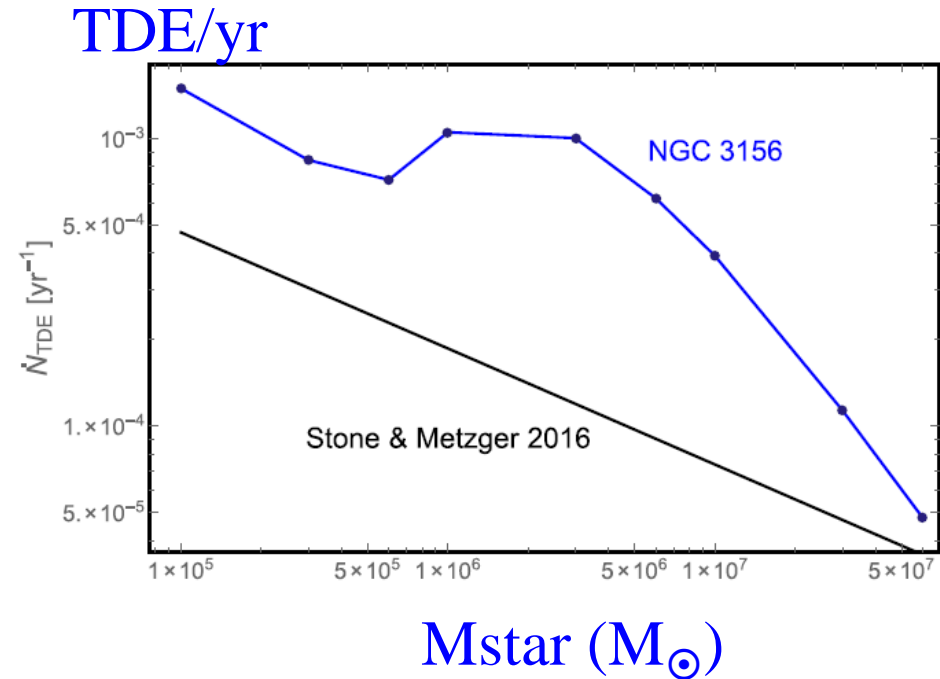
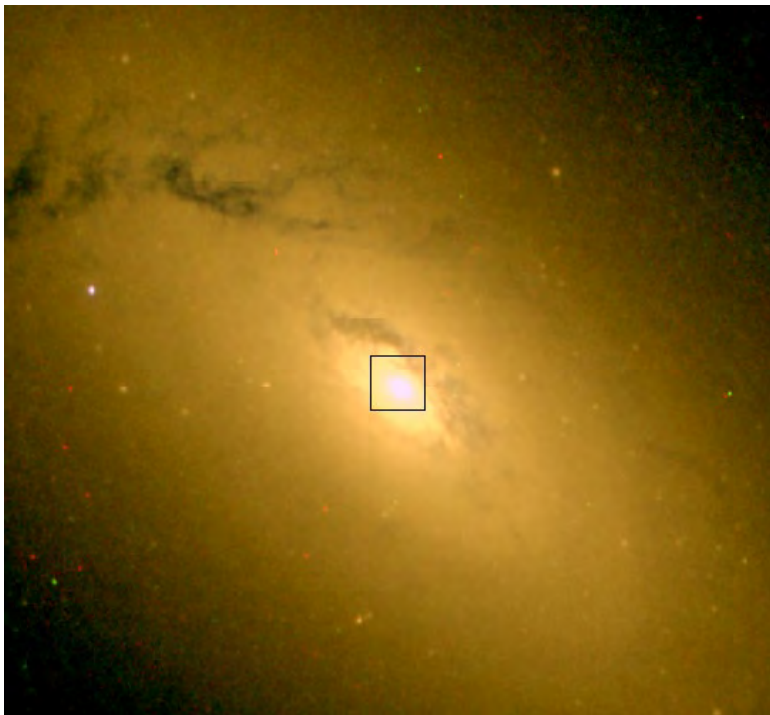


AGN type 2,  $M_{\text{BH}} = 10^{6.5} M_{\odot}$ ,  
Pic de luminosité  
 $\sim$ Eddington

Noyau caché par la  
Poussière?



# Le cas du post-starburst NGC 3156



Stone & van Velzen 2016

Fréquence 10 fois plus grande  
 $10^{-3}$  /an, grâce à la présence  
 d'un amas nucléaire d'étoiles  
 Potentiel non-axisym  
 Lz non conservé, plus efficace  
 pour faire tomber les étoiles



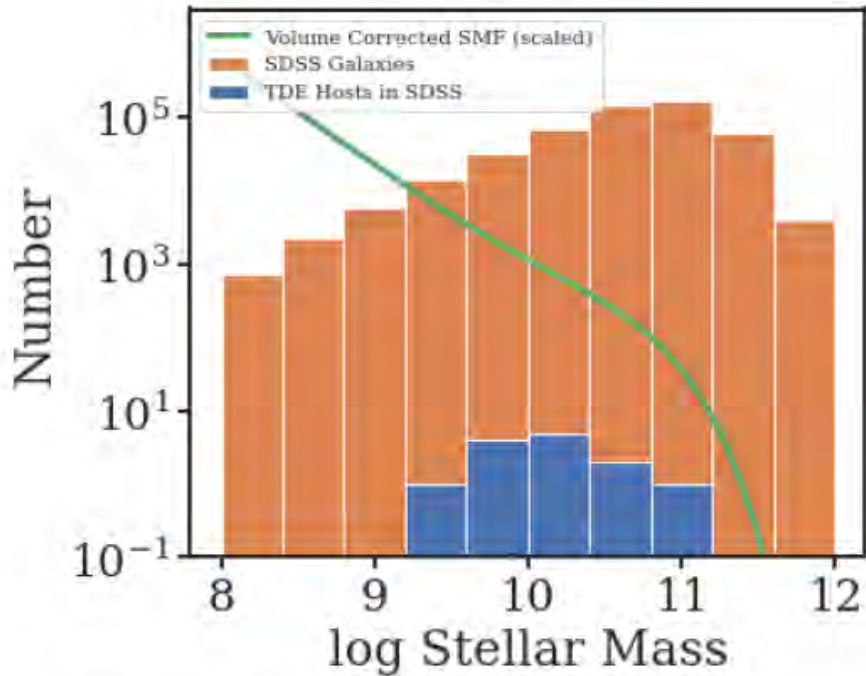
# Post-starbursts: TDE plus fréquents

Les galaxies restes de fusions, comme NGC 6240, ou suivant un starburst (galaxies dites E+A, selon leur population d'étoiles: Type A, pas de O ni B, âge très étroit)  
Formation d'étoiles stoppée brutalement (« quenching »)

Les AGN variables  
sont de bons  
candidats TDE  
→ brassage d'étoiles

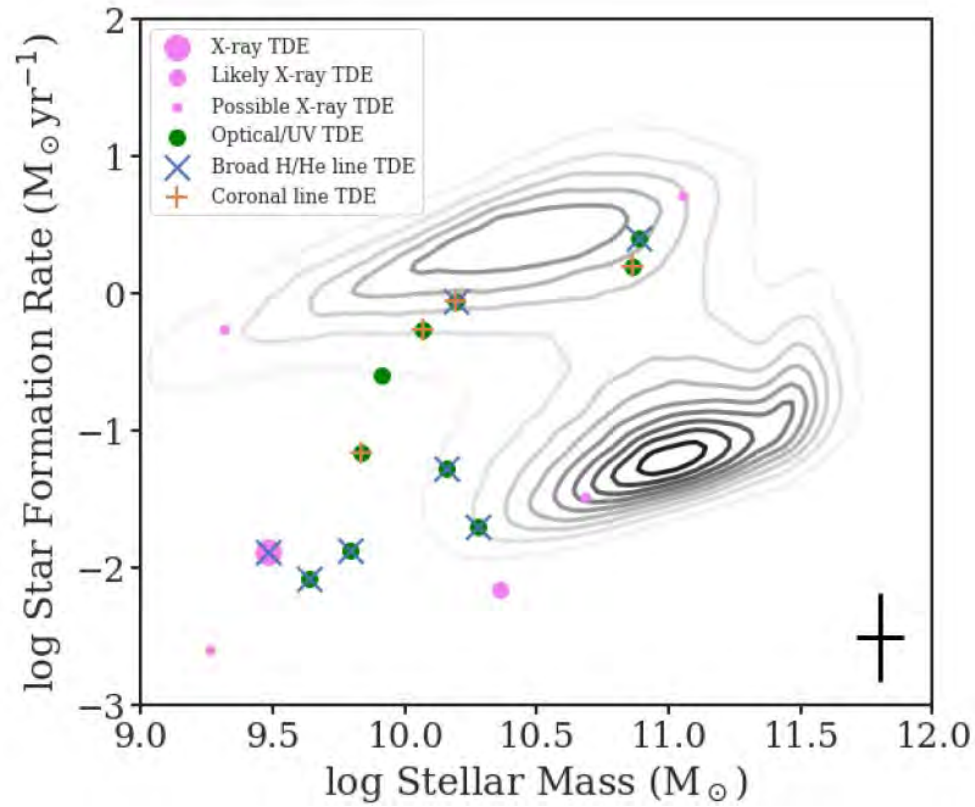


# Galaxies hôtes



SMF Stellar Mass Function  
Corriger du biais de Malmquist  
Volume (courbe verte)  
TDE en bleu, compatibles avec  
Un SMF pour  $M > 10^9 M_{\odot}$

Position des TDE dans les  
Galaxies de la « Green Valley »  
Pas de correction en volume



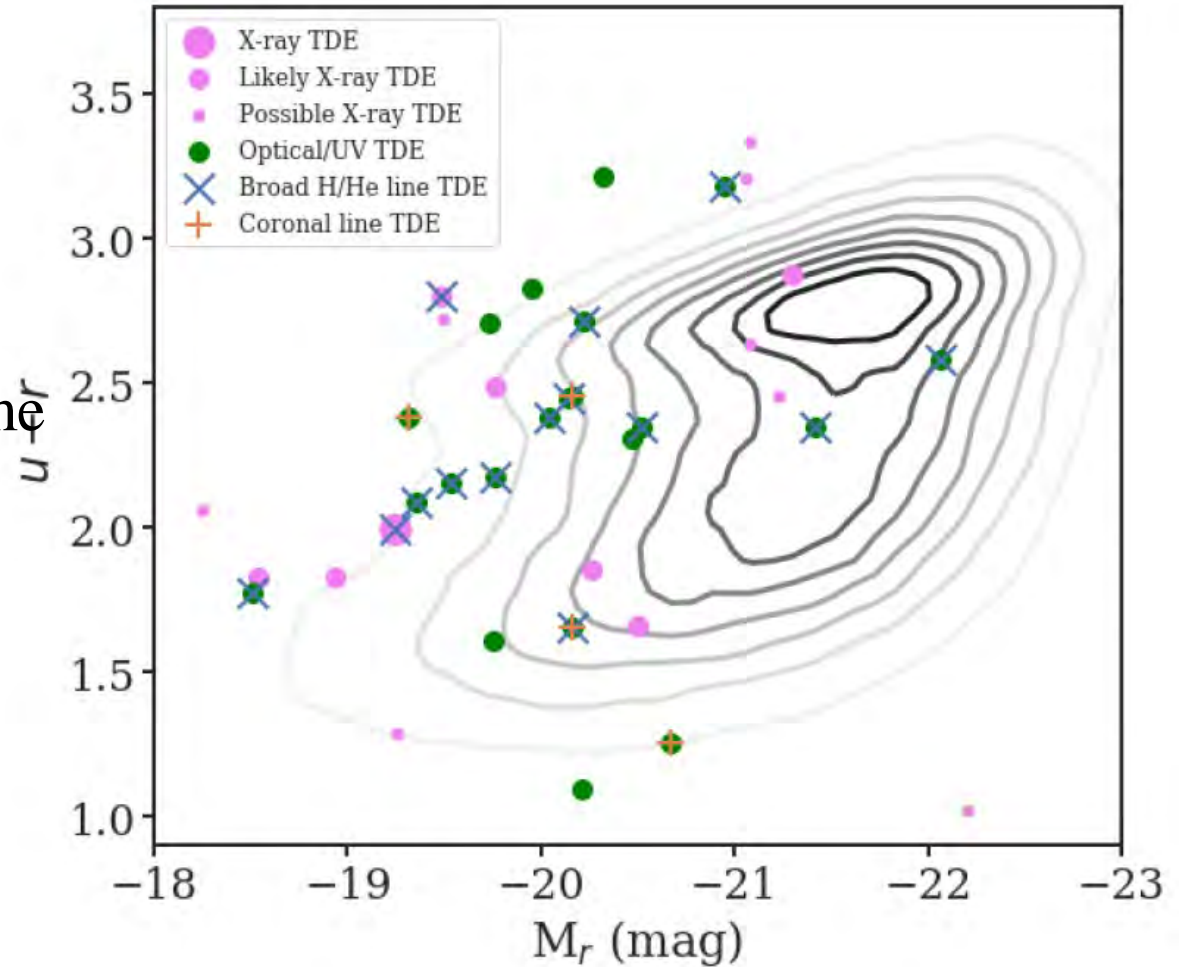
# Galaxies hôtes

Diagramme Couleur-  
Magnitude

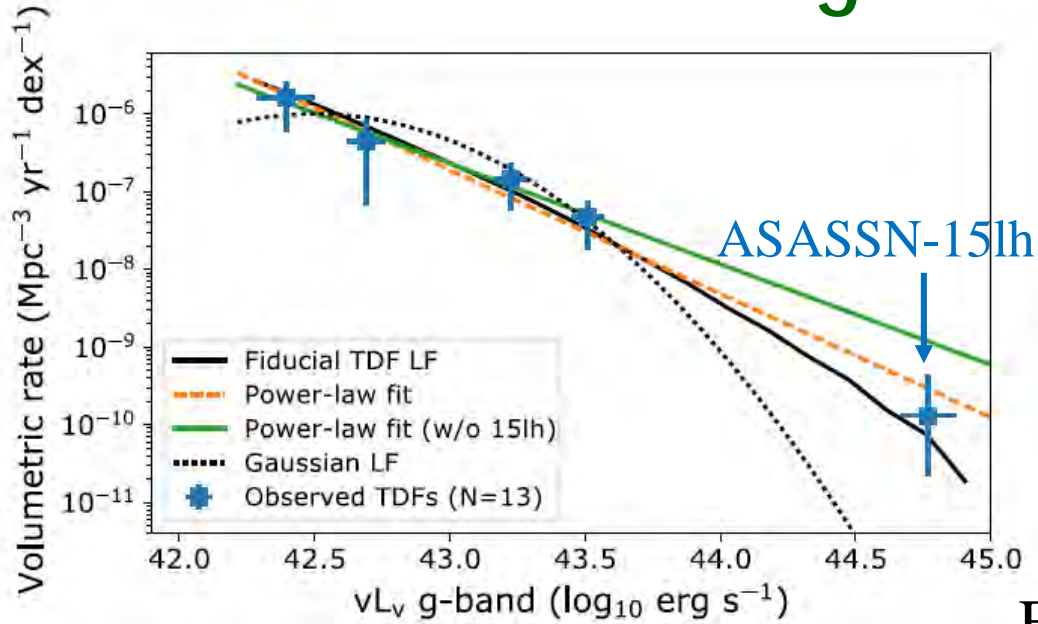
TDE comparés aux  
galaxies SDSS

Non corrigé de volume

TDE se distribuent  
un peu dans toutes  
les séquences



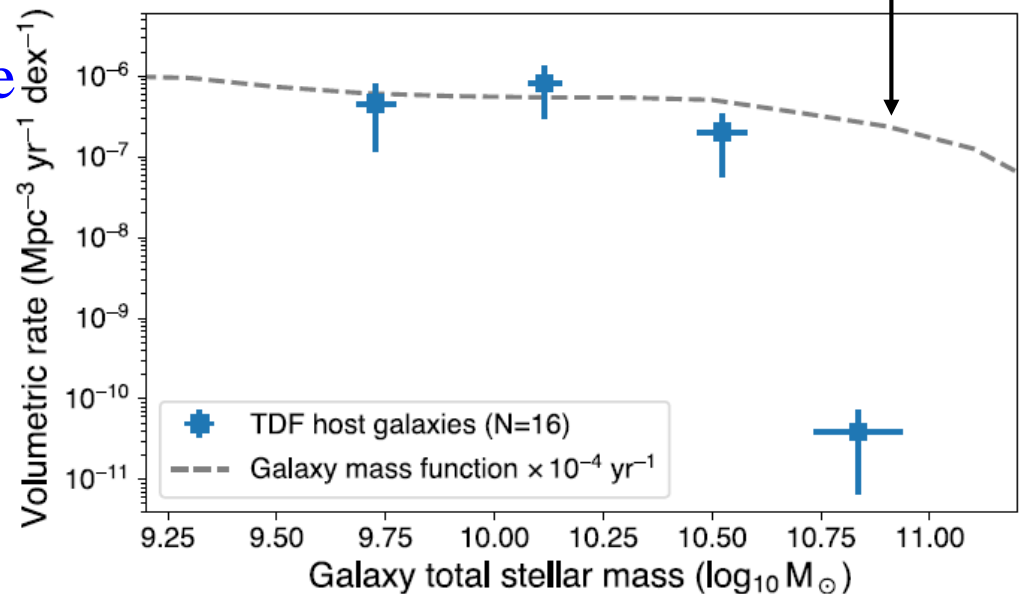
# Chute à grande masse



Les observations favorisent une coupure à  $10^{7.5} M_{\odot}$   
 → Confirmation de  $R_T < R_s$

Fonction de L, loi de puissance de pente -2.5

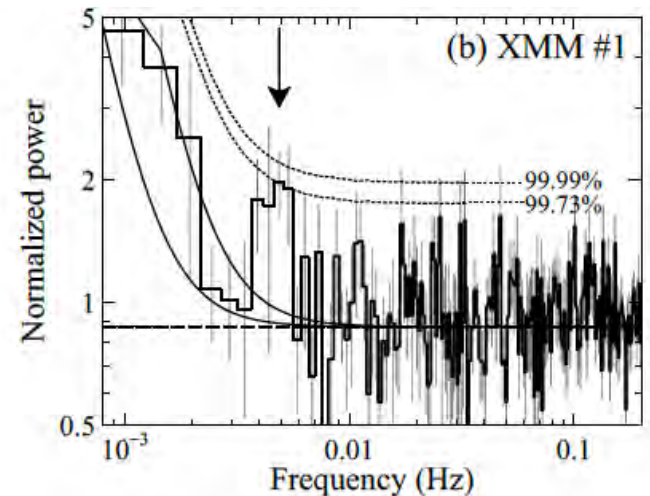
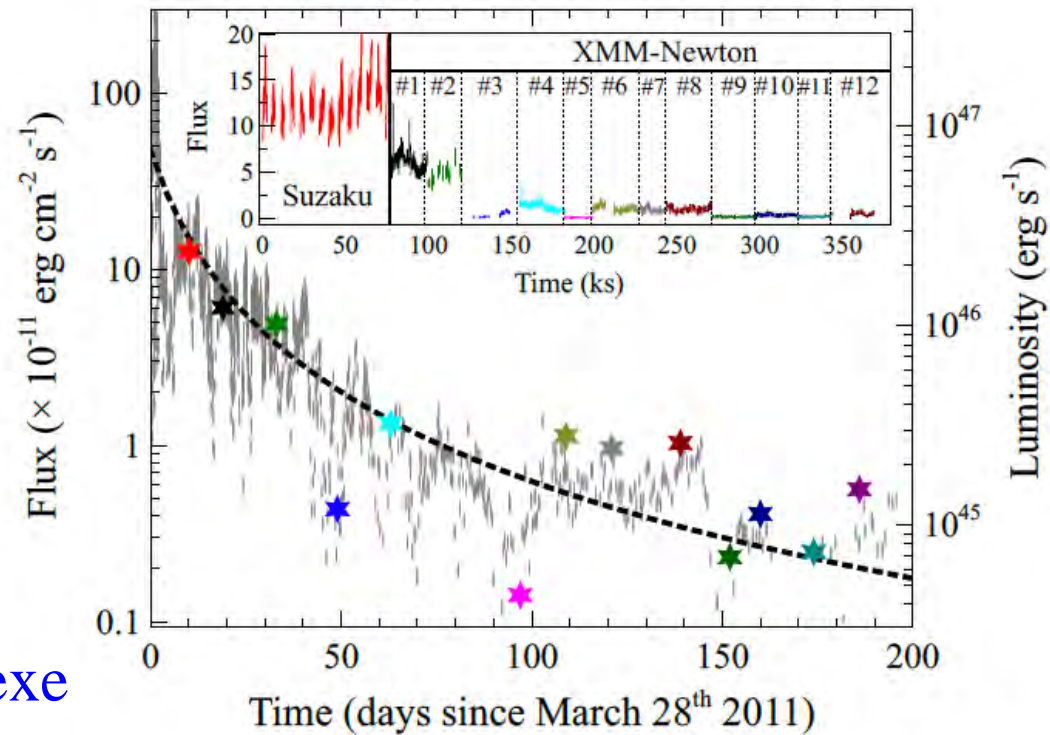
F(M) galaxies x 10<sup>-4</sup> TDE/an



# Autres problèmes

Pas vraiment de corrélation du temps de montée avec  $M_{\text{BH}}$   
Ni du temps de descente,  
ni du pic de Luminosité  
Courbe de lumière plus complexe  
→ Outflow?

Il existe des QPO (oscillations quasi-périodiques) dans les TDE  
En rayons-X, Période  $\sim 200\text{sec}$   
Si ces QPO correspondent à l'ISCO,  
 $R_{\text{isco}} = 3 R_s$  (pour  $a=0$ ) →  $M_{\text{BH}}$

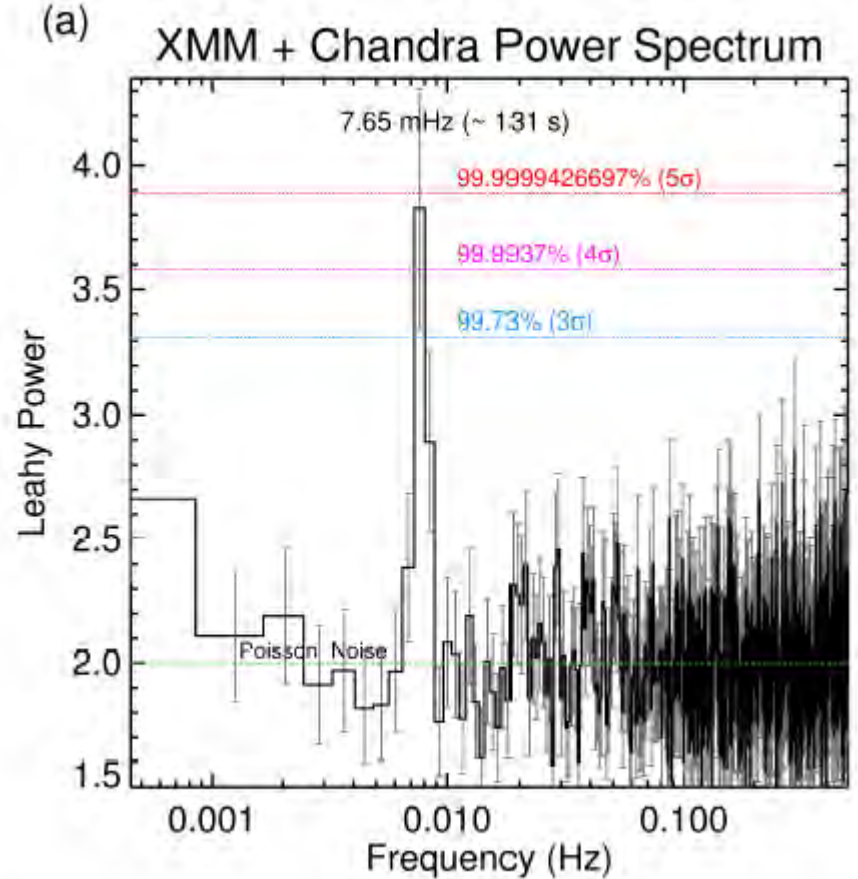
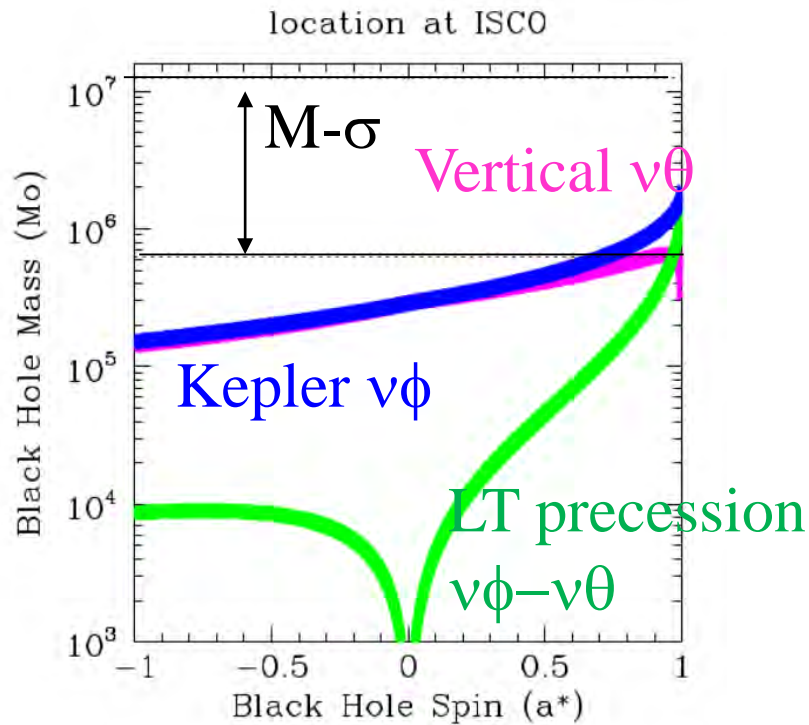


# QPO et masse du trou noir

ASASSN-14li

Un rare exemple de TDE  
avec QPO régulière

→  $a > 0.7$  ?



$7.65_{\pm 0.7}$  mHz soit 131 sec  
FFT de 80 000 sec d'observation

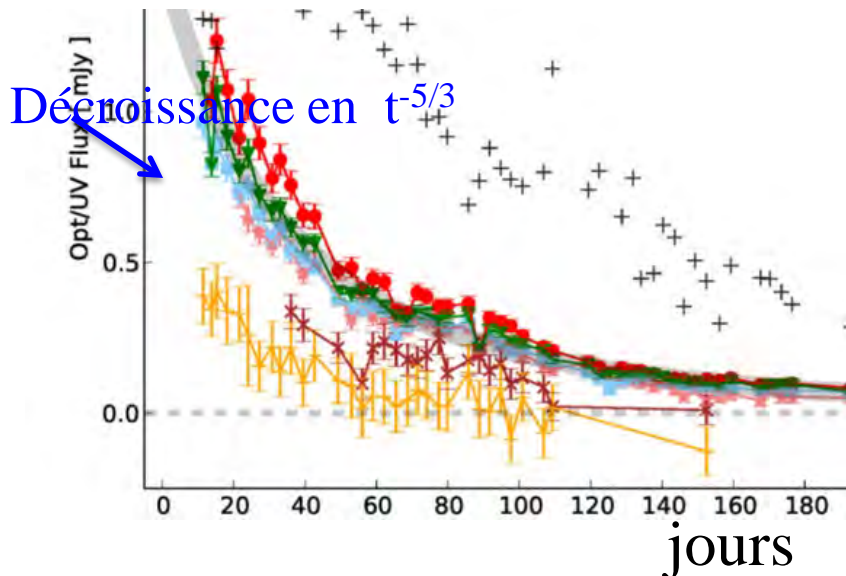
# Mrk1018: causes du changement

Taux d'accrétion augmenté soudainement?

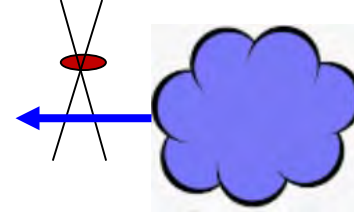
**TDE** étoile détruite par les marées du trou noir

Durée: montée rapide qqes semaines à  $L_{\text{Edd}}$ , puis descente en mois ou dizaines années, loi en  $t^{-5/3}$  Pas de X durs

➔ La variation temporelle de luminosité ne correspond pas



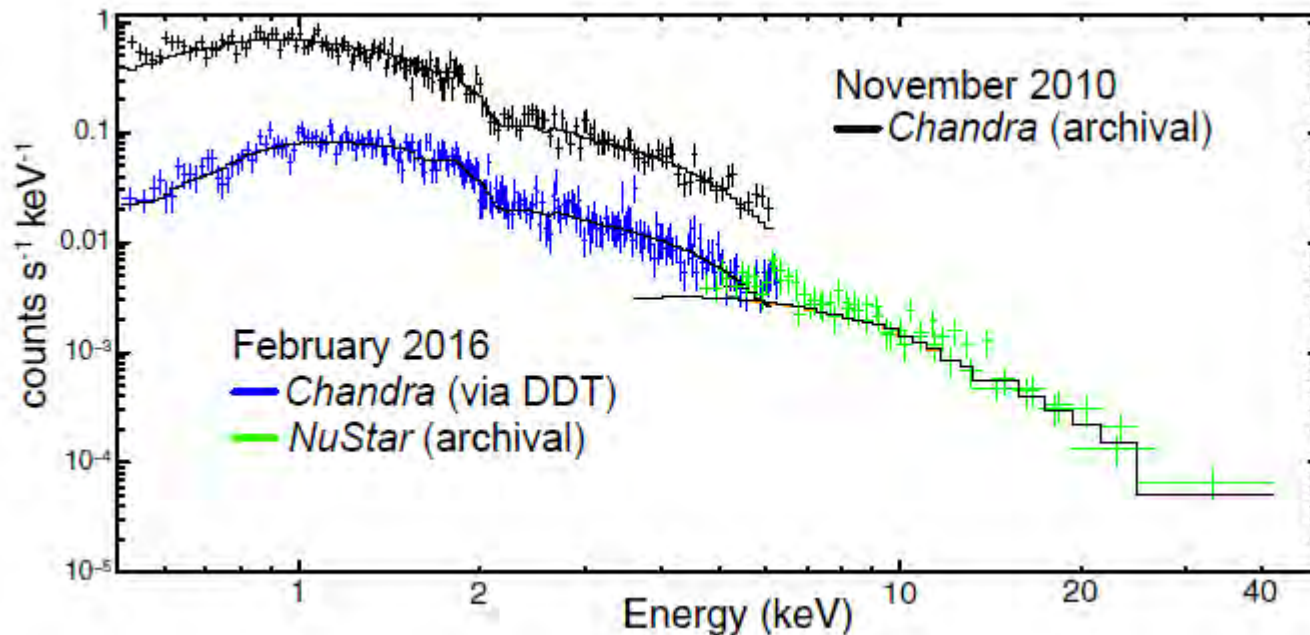
# Mrk1018: obscuration?



Passage d'une haute colonne densité de gaz+poussière devant AGN

Taille nuage  $10^{-2}$  pc,  $V \sim 300$  km/s, temps  $\sim 30$  ans

Ou bien  $10^{-1}$  pc,  $V \sim 3000$  km/s, orbitant à  $R = 100$  pc



Toutefois, pas de signe d'obscuration dans le spectre X ou en optique (rougissement..), mais très fort  $A_V$ ??

*Husemann et al 2016*

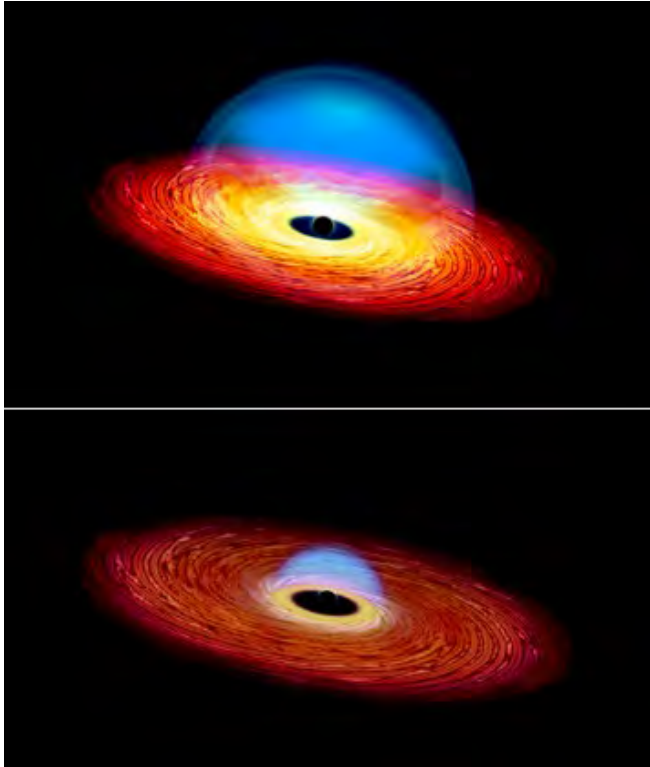


# Le quasar qui change de look

J0159-0033,  $z=0.31$ , quasar

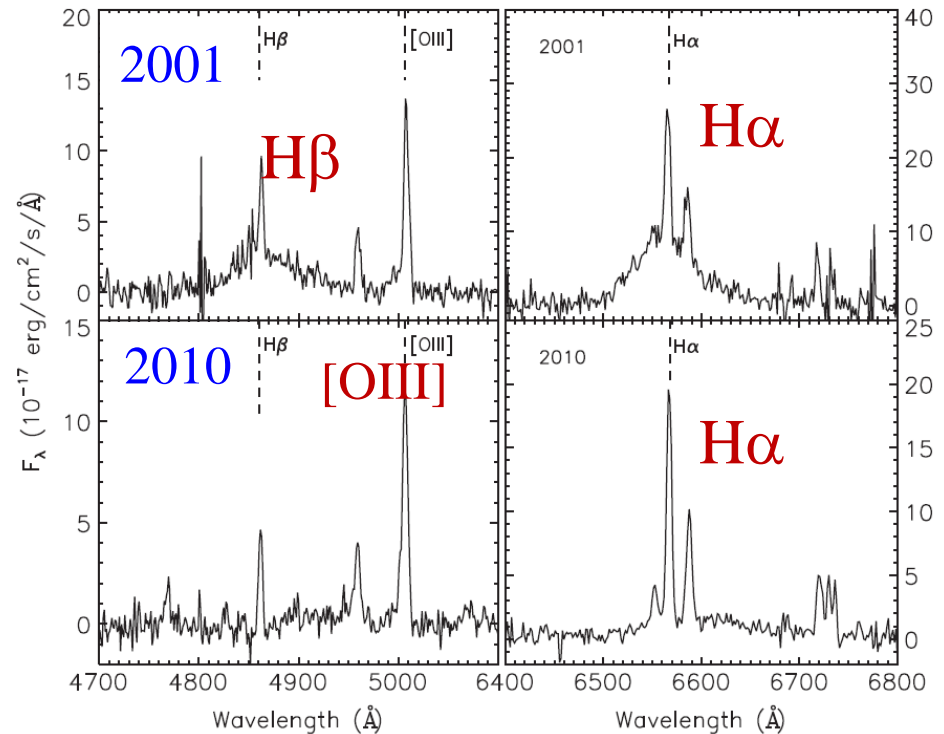
Passe de AGN-1 vers AGN-1.9 de 2000 à 2010

Chute de flux d'un facteur 6, optique et X  
Pas d'obscurantion



→ Permet d'étudier la galaxie hôte, éblouie par le QSO

*LaMassa et al 2015*



# Pas d'absorption de rayons-X

$$M_{\text{BH}} = 2.2 \cdot 10^8 M_{\odot}$$

$$L/L_{\text{Edd}} = 0.04$$

Chute à 0.007

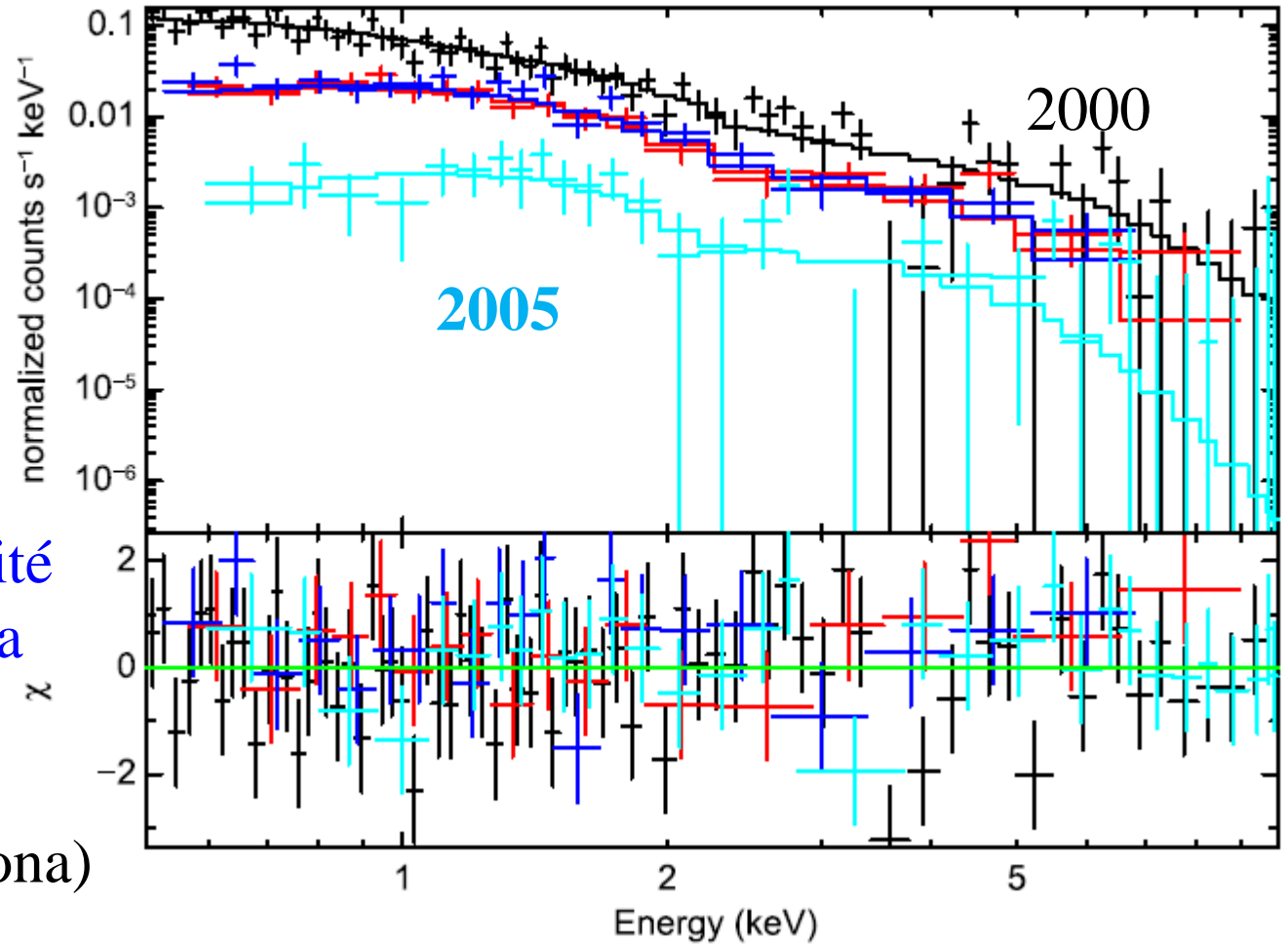
$$R_{\text{BLR}} = 35 \text{ j-lum}$$

1998-2000 état  
haut AGN-1

Puis chute d'activité  
De la BLR, mais la  
NLR non affectée  
(trop loin)

Optique et X (corona)

Proches du centre



# Possible mécanisme

Le quasar J0159-0033,  $z=0.31$ ,  $M(\text{BH}) \sim 10^8 M_{\odot}$

Destruction d'une étoile par effet de marée: TDE

Loi de décroissance

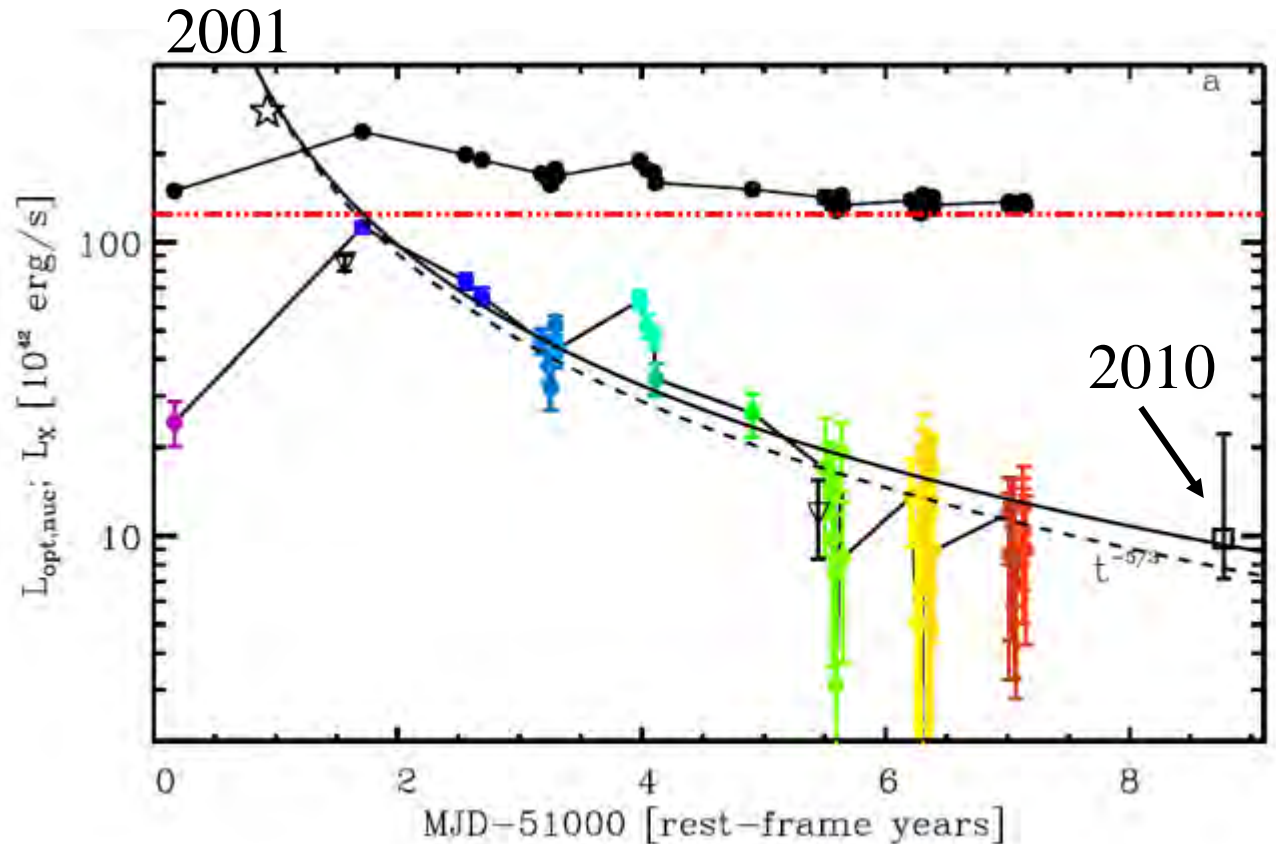
$$t^{-5/3}$$

Surface émettrice

$R_{\text{photosphérique}}$

$\sim 100 R_s$

Température  $\sim 10^4 \text{K}$



Compatible avec le spectre – Il existe toutefois une BLR étendue 30 al et massive, qui existait avant l'événement

2010, X-emission x **240!**  $z=0.018$   $M_{\text{BH}} = 4 \cdot 10^5 M_{\odot}$

# GSN 069

Sy2 en 1994

2018, 54 jours de suivi  
Sursauts  $\sim 1\text{h}$   
X mous  $T=120\text{eV}$

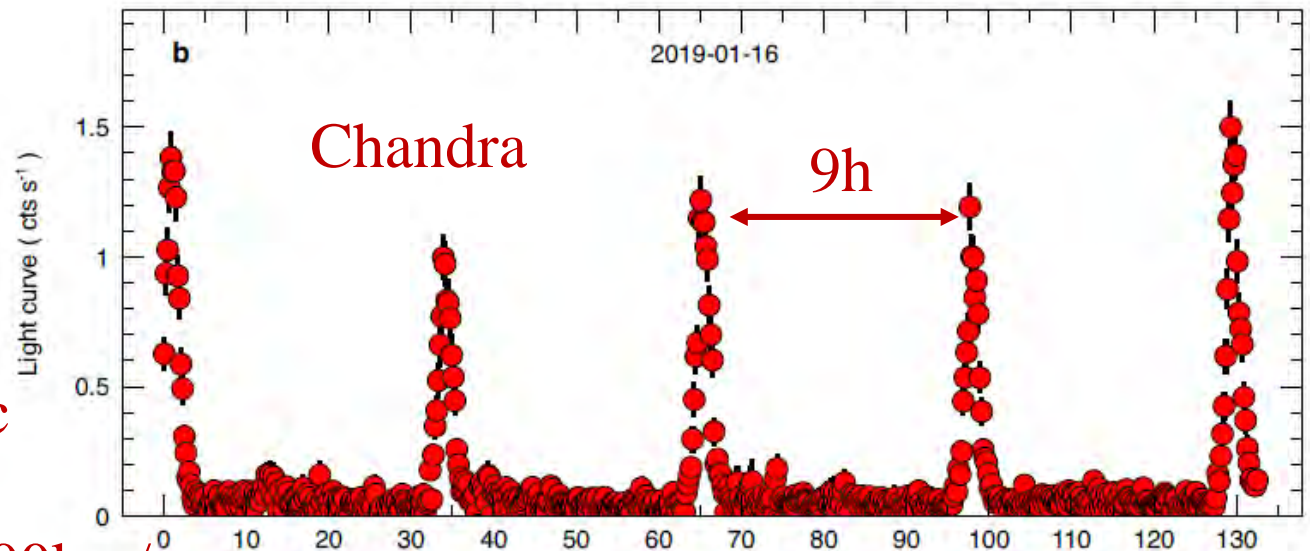
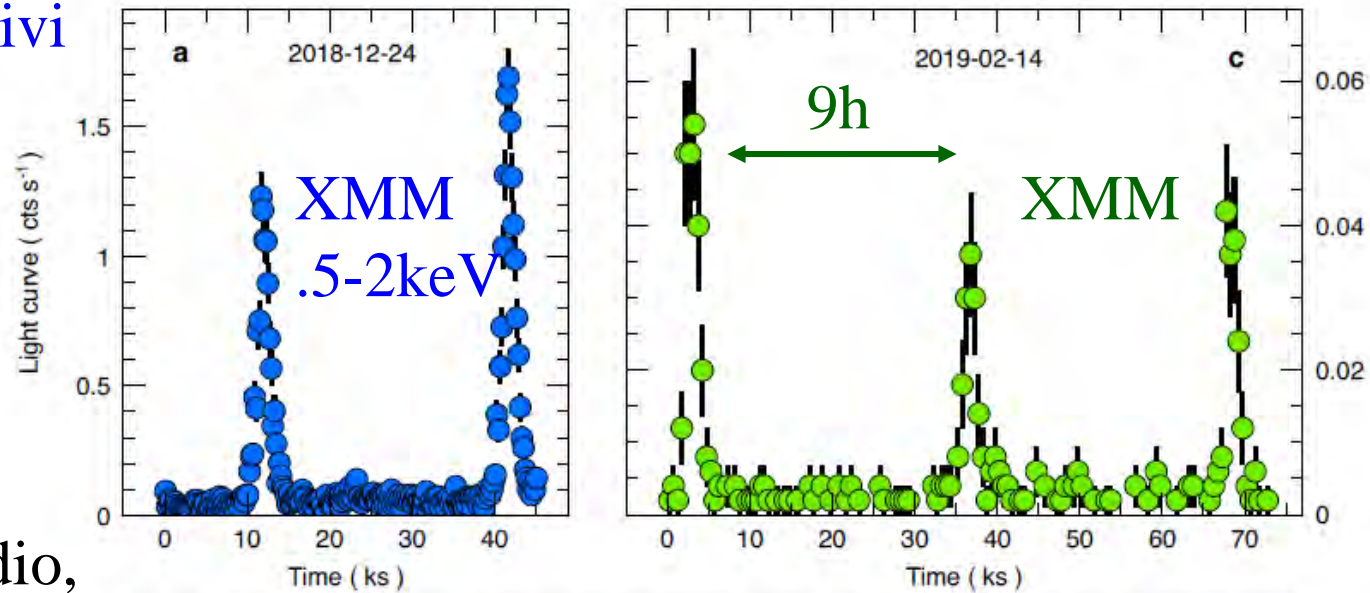
Amplitude sursauts  
diminue, P croît

Sy2, détectée en radio,  
Mais non-variable

**TDE?** Instabilité  
à cycle limite

QPE Quasi periodic  
Eruptions

$\rightarrow R \sim 1\text{AU}$ ,  $V = 20\,000\text{km/s}$



*Miniutti et al 2019*

# GSN 069 –QPE (pas de BLR)



Les sursauts à **haute énergie** commencent plus tôt, sont plus courts, et ont plus d'amplitude Max/min

Peu variable  $E < 0.1\text{keV}$   
Sursauts ne concernent que le centre du disque d'accrétion

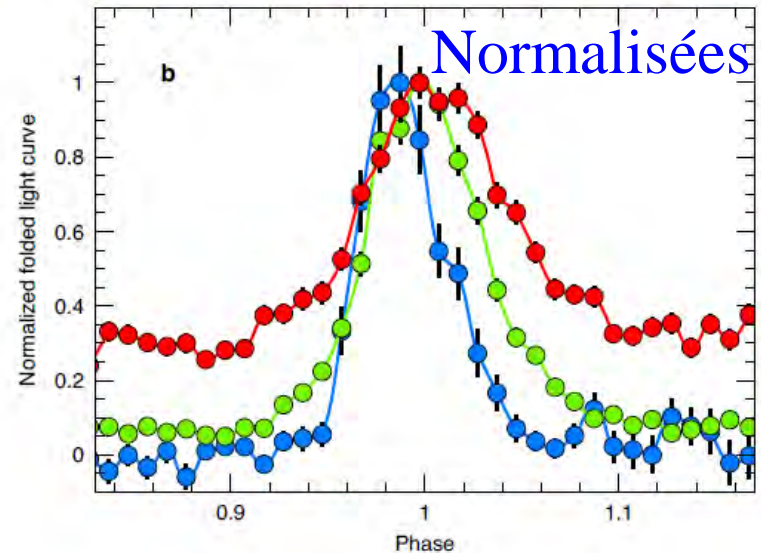
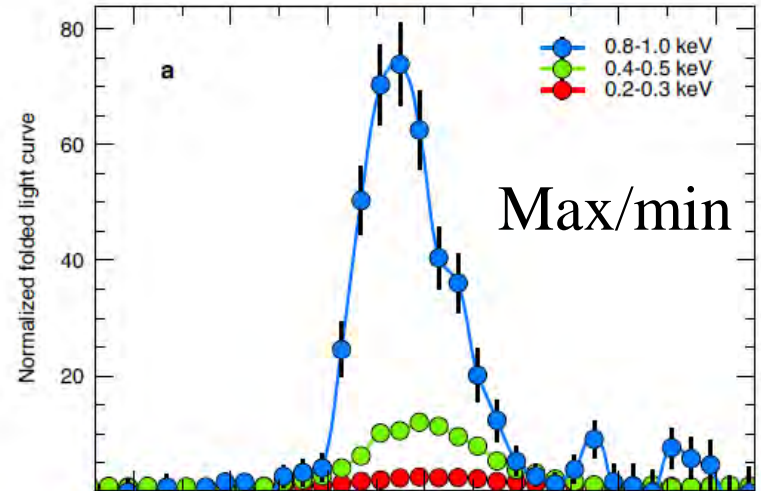
$$L/L_{\text{Edd}} = 0.5$$

**Spectre thermique (corps noir)**

Facile à détecter car  $P=9\text{j}$   
Pour des AGN plus massifs  $> 30j$

*Miniutti et al 2019*

## Courbes repliées



# Trous noirs masse intermédiaire (IMBH)

Les IMBH n'ont pas encore été observés/confirmés en grand nombre  
→ La signature TDE devrait être un indice fort

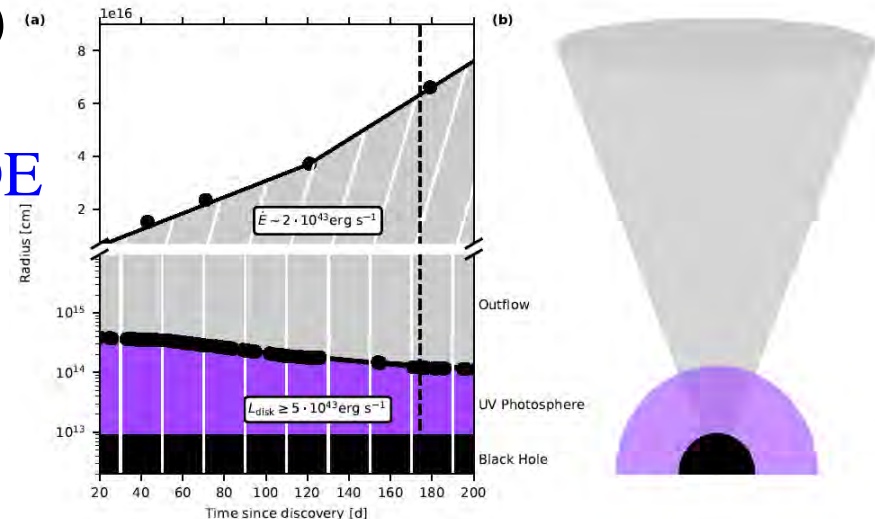
Les naines blanches (WD) sont nombreuses et ne peuvent être détruites que par les trous noirs IMBH  $< 2 \cdot 10^5 M_{\odot}$

Ex: ULX dans NGC1399 (Fornax): TDE?

CO-WD sans hydrogène, raies de [OIII] et [NII], pas  $H\alpha$

Durée de vie du TDE: 2 min, mais accompagné d'une détonation en SNIa (plus faible)

**Neutrino VHE** en direction d'une TDE  
AT2019dsg/ZTF19aapreis  
(Stein et al 2020) détectée en radio (jet)



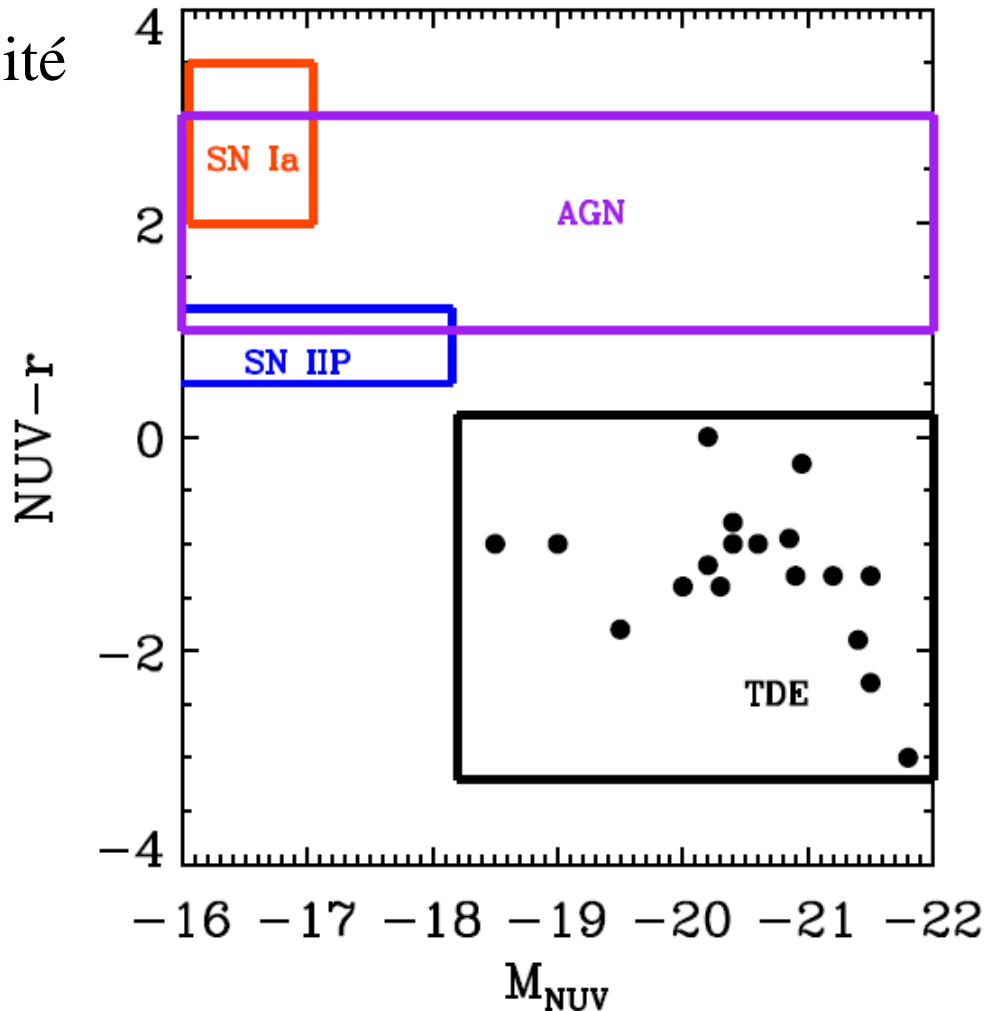
# Perspectives

Couleur bleue et forte luminosité distinguent les TDE

Vera Rubin telescope +  
UV et X dans l'espace  
(eRosita)

Questions en suspens:

- Selection en optique versus biais en X?
- temps d'arrivée versus  $M_{\text{BH}}$
- Fréquence réelle des TDE?

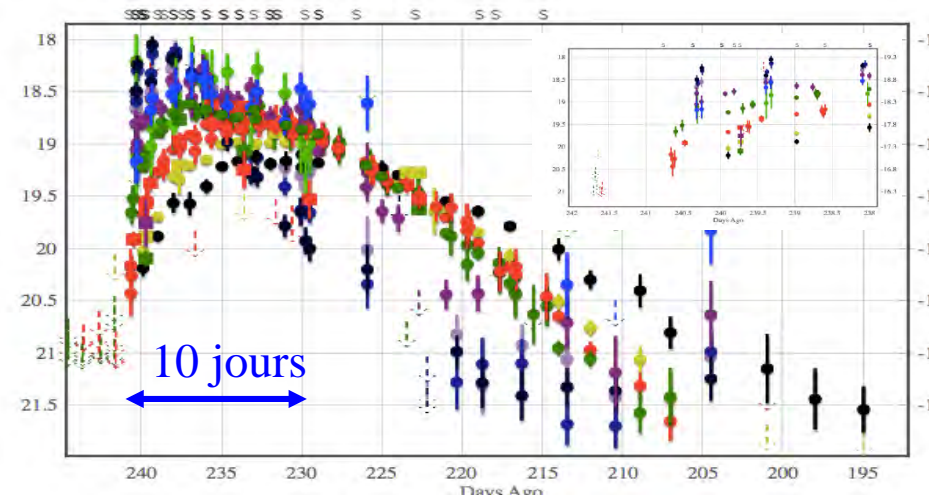


# Les surveys: SDSS, ZTF, ASASSN, ...

**ASAS-SN** All-Sky Automated Survey  
for Supernovae  
Chine, Hawaii, Texas, Chili, Afrique  
du Sud..

Projet prévu pour les  
supernovae, mais  
découvre beaucoup de  
variables → TDE

LOSS: Lick Observatory SN search





# Conclusion



- Les TDE sont de plus en plus détectées (56 aujourd'hui)
- Des X-rays à la radio, multiples  $\lambda$  correspondant à différentes distances du trou noir (optique/UV au rayon-intersection)
- Propriétés bien connues, mais restent des mystères, peut-être à cause d'un vent, ou de l'obscuration, ou précession GR
- $L \propto t^{-5/3}$ ,  $t_{\text{fall}} \propto M_{\text{BH}}^{1/2}$ , le temps de montée non corrélé, pourquoi?
- BLR: TDE-H, TDE-H+He (chaud+fluorescence), TDE-He (rare)
- Occasion de mieux trouver et connaître les IMBH
- Galaxies-hôtes, vallée verte, post-starburst (E+A)