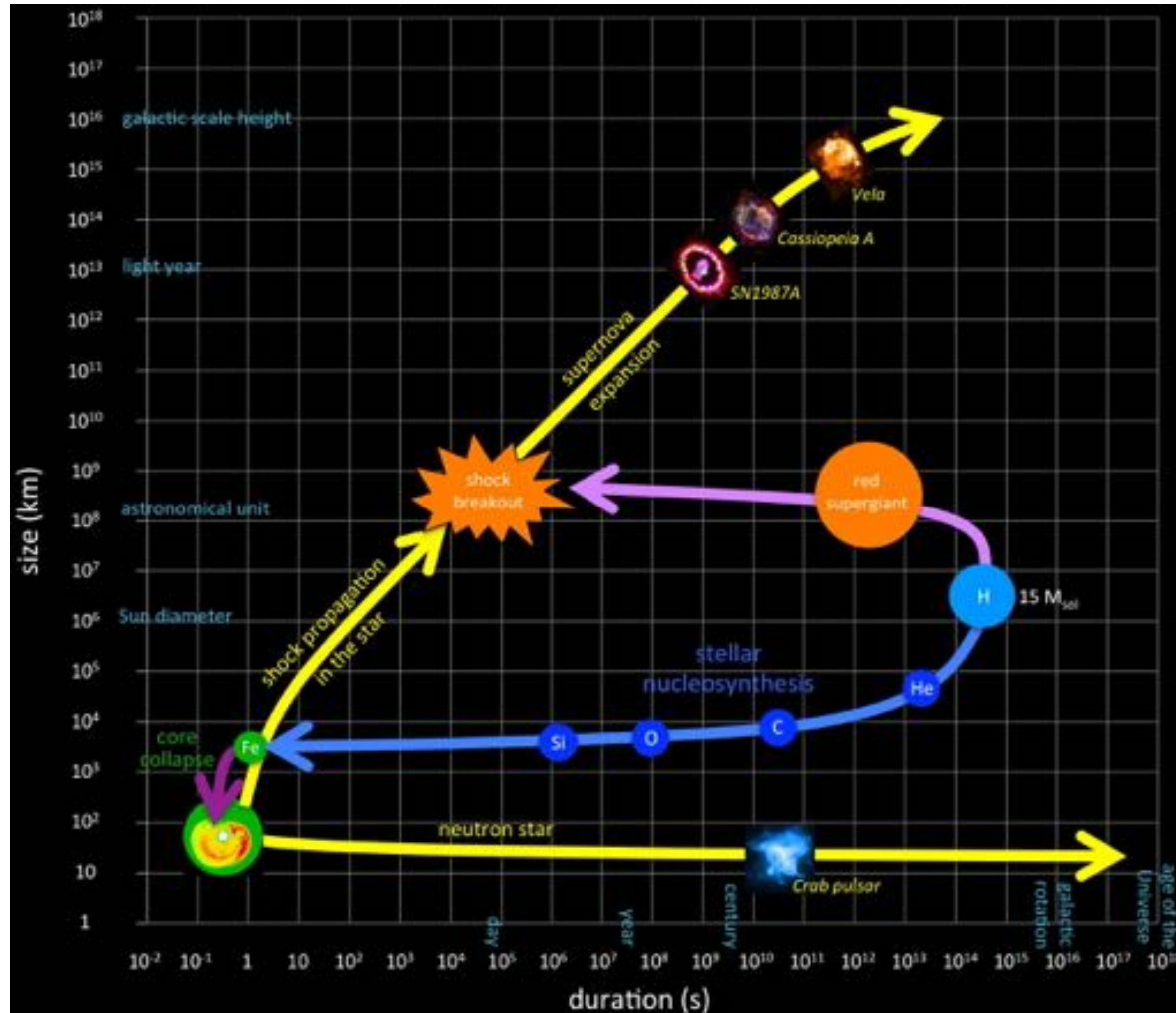


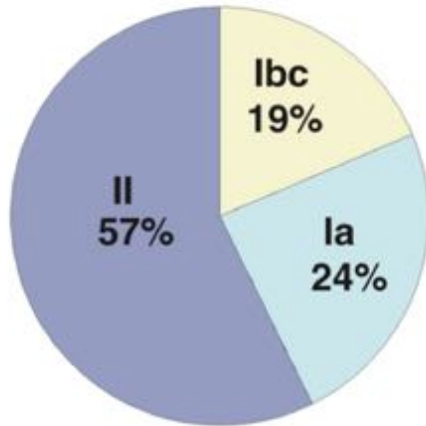
Comment explosent les supernovae, et comment se forment les étoiles compactes ?



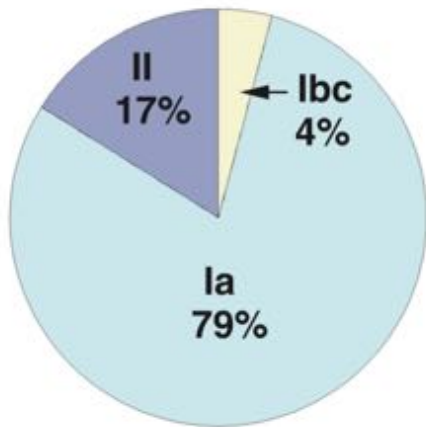
Thierry Foglizzo
CEA Saclay

Types de supernovae

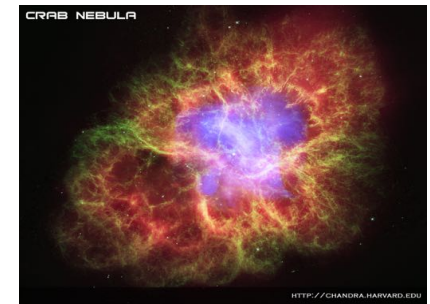
Distribution en volume



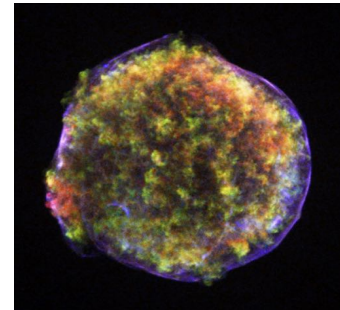
Distribution en luminosité



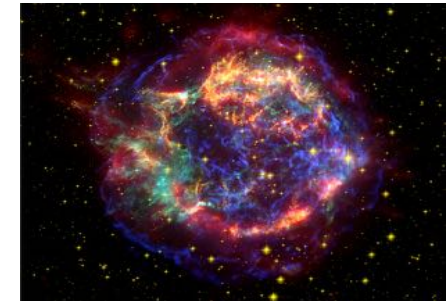
SN 1006



Crabe (1054)



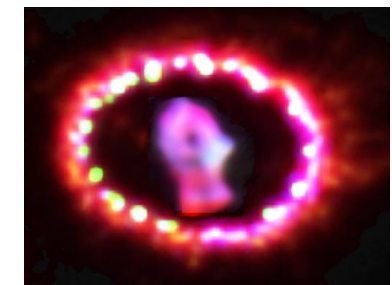
Tycho (1572)



Cassiopee A (~1680)



Kepler (1604)



SN1987A

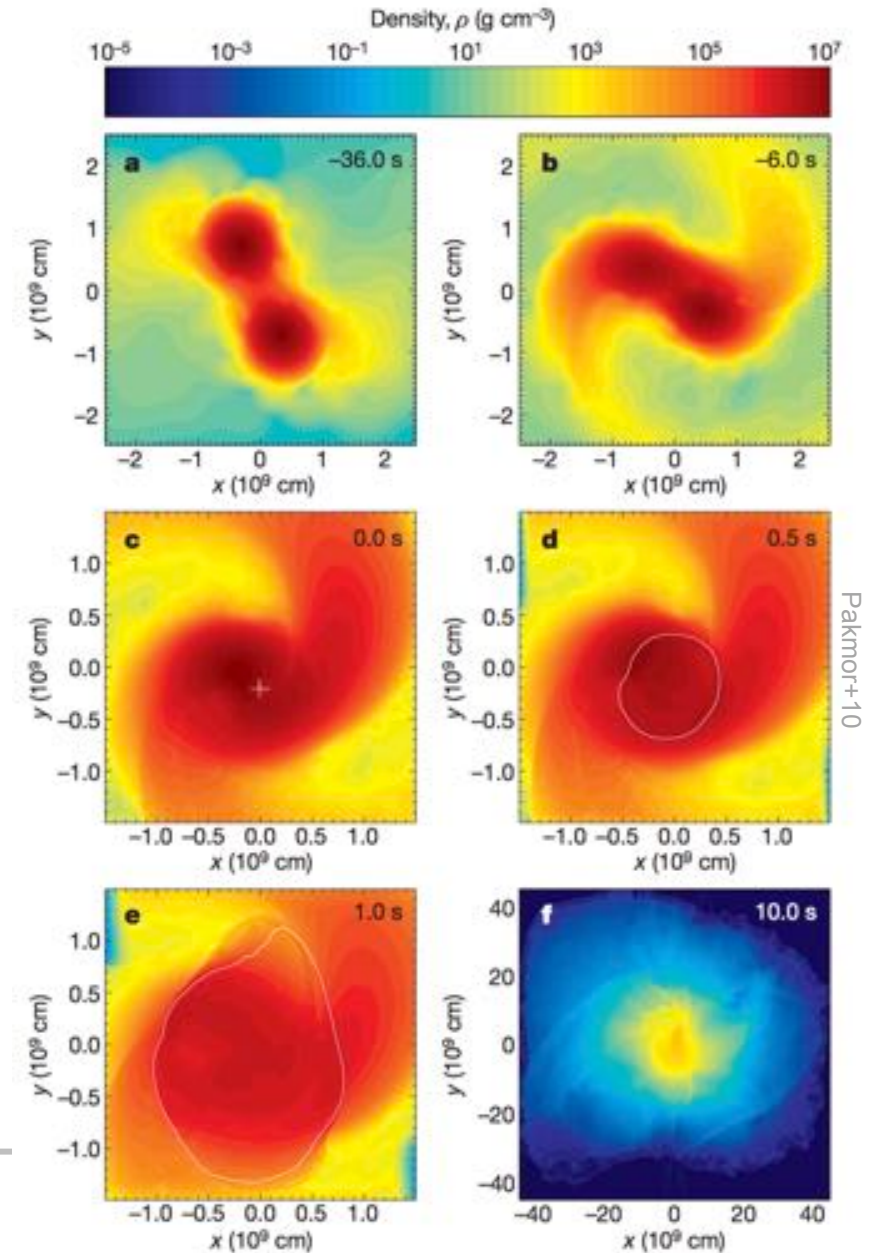
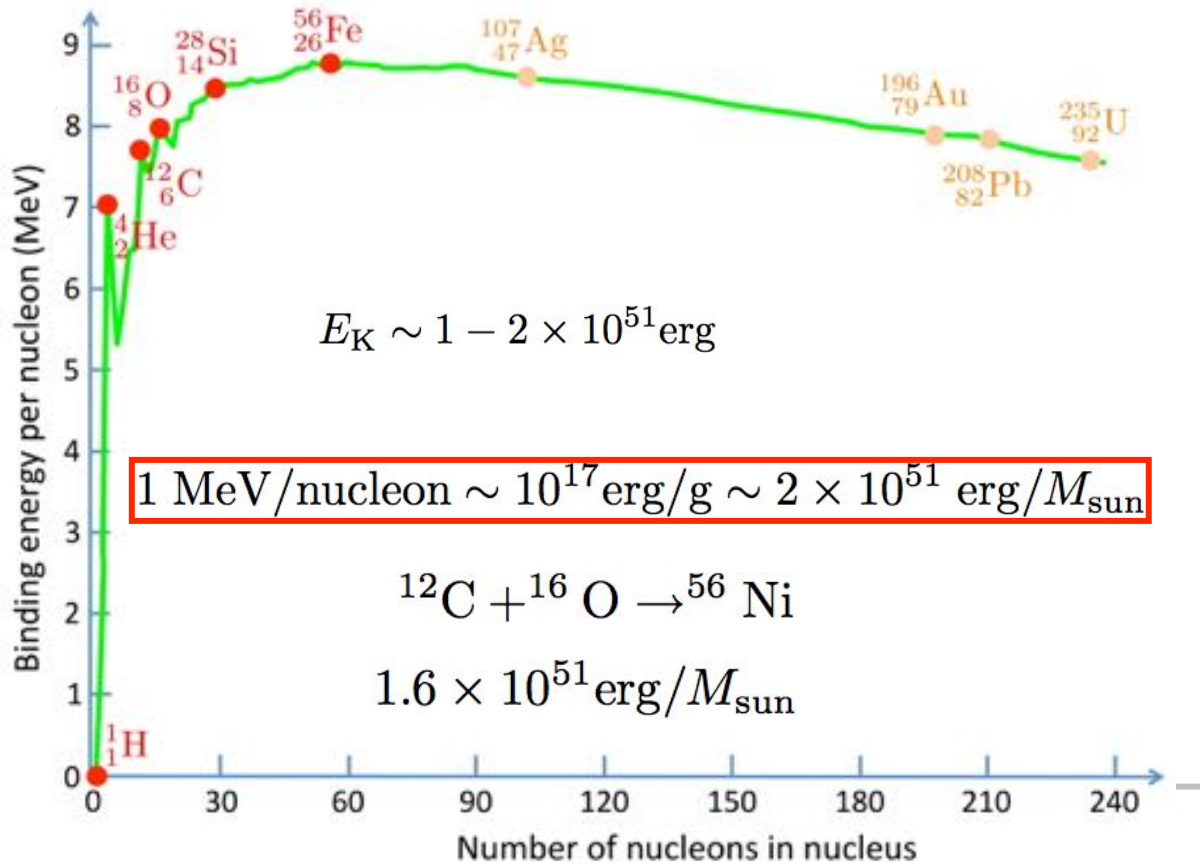
Supernovae thermonucléaires SNIa

Faiblesses du scénario SD (WD+compagnon)

- absence de détection du compagnon (SN2011fe: Li+11)
- synthèse de population inférieure au taux observé

-SNIa sous-lumineuse par coalescence de 2 naines blanches

$0.9M_{\text{sol}} + 0.9M_{\text{sol}}$ (Pakmor+10)



Supernovae thermonucléaires SNIa

Faiblesses du scénario SD (WD+compagnon)

- absence de détection du compagnon (SN2011fe: Li+11)
- synthèse de population inférieure au taux observé

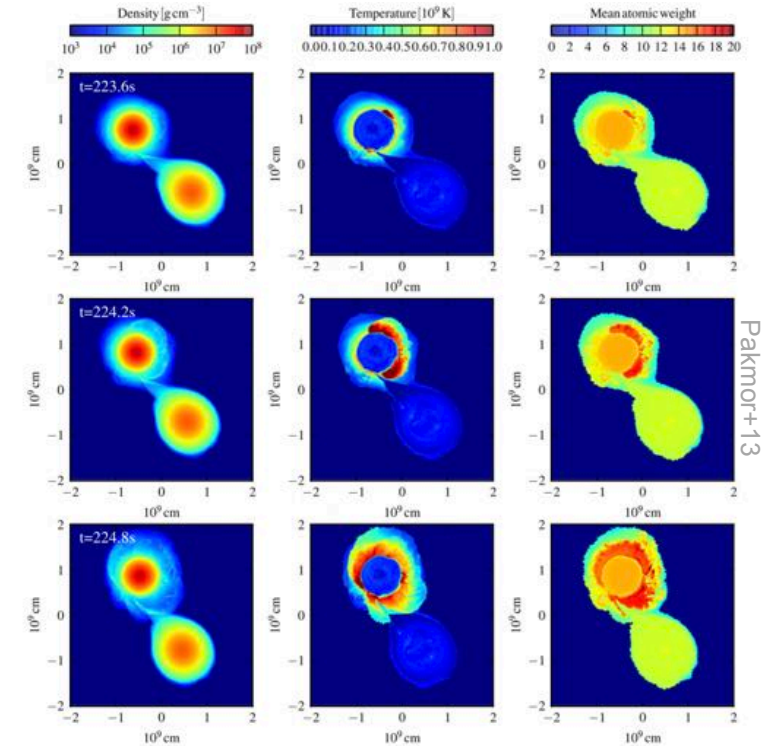
-SNIa sous-lumineuse par coalescence de 2 naines blanches

$$0.9M_{\text{sol}} + 0.9M_{\text{sol}} \text{ (Pakmor+10)}$$

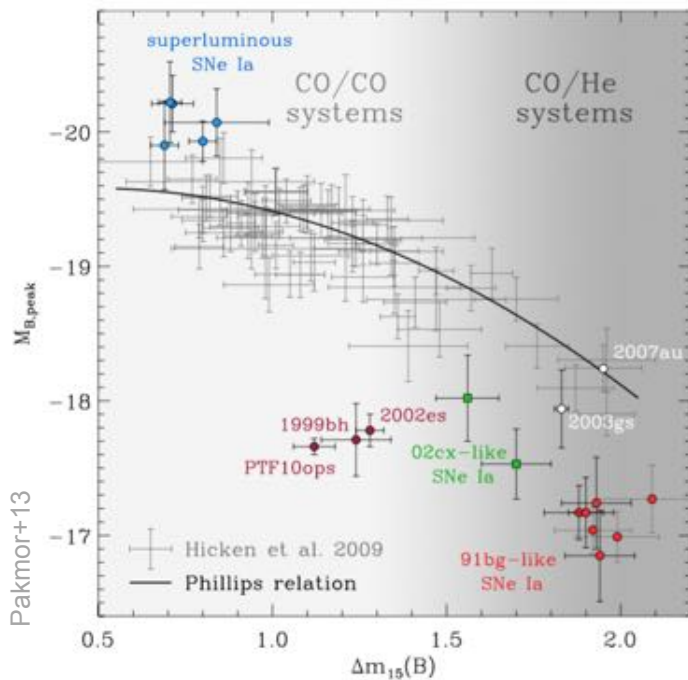
-SNIa "normale" par coalescence de 2 naines blanches

$$0.9M_{\text{sol}} + 1.1M_{\text{sol}} \text{ (Pakmor+12)}$$

-Diversité des SNIa par coalescence de 2 naines blanches CO/CO ou CO/He avec double detonation d'une fine couche d'hélium (Pakmor+13, Dessart & Hillier 2015)



Pakmor+13

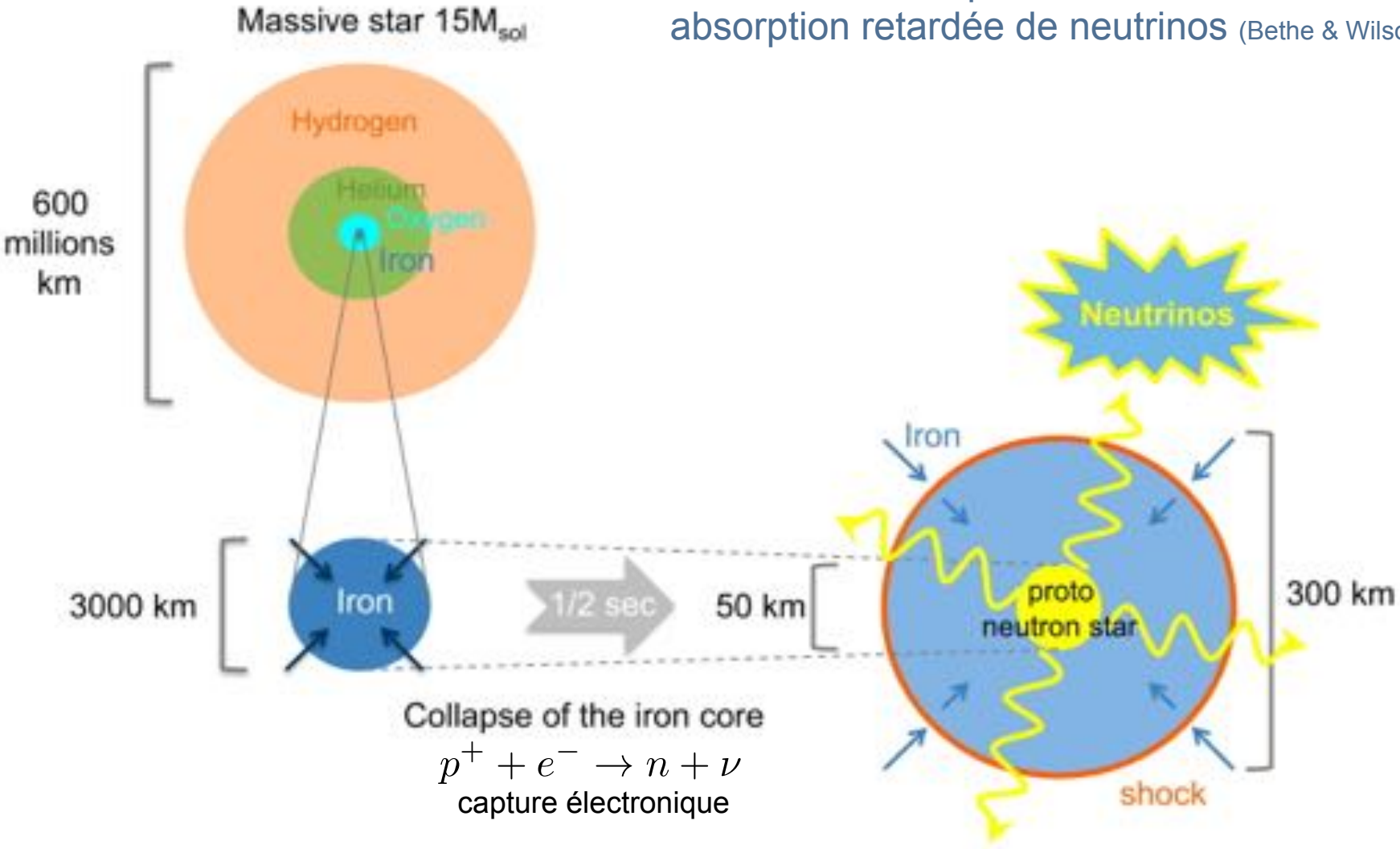


-déflagration pure dans 5% des cas ? (Kromer+13, Fink+14)

-Détonation retardée (Roepke+12, Seitenzahl+13)

-SNIa par double detonation sub-Chandrasekhar ($0.8M_{\text{sol}}\text{C/O}+0.1M_{\text{sol}}\text{He}$) à ($1.28M_{\text{sol}}\text{C/O}+0.01M_{\text{sol}}\text{He}$) (Fink+07, +10)

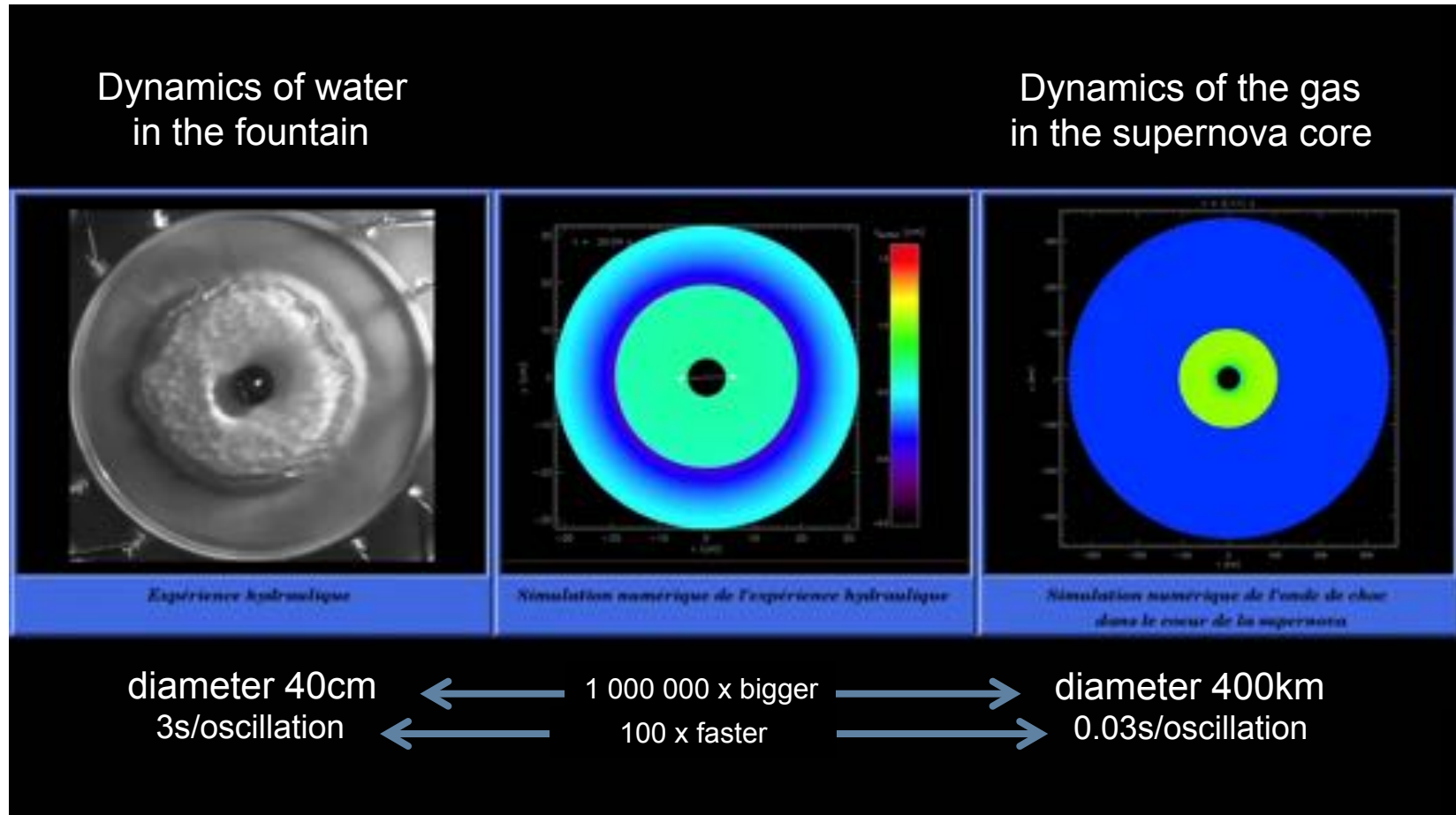
Mécanisme d'explosion des étoiles massives:
absorption retardée de neutrinos (Bethe & Wilson 1985) —



$$\frac{GM_{\text{ns}}^2}{R_{\text{ns}}} \sim 2 \times 10^{53} \text{erg} \left(\frac{30\text{km}}{R_{\text{ns}}} \right) \left(\frac{M_{\text{ns}}}{1.5M_{\text{sol}}} \right)^2$$

Energie cinétique différentielle: $E_{\text{diff}} < E_{\text{rot}} \sim 2.4 \times 10^{50} \text{erg} \left(\frac{M_{\text{ns}}}{1.5M_{\text{sol}}} \right) \left(\frac{R_{\text{ns}}}{10\text{km}} \right)^2 \left(\frac{10\text{ms}}{P_{\text{ns}}} \right)^2$

Analogie expérimental de la dynamique du choc (Foglizzo+12)

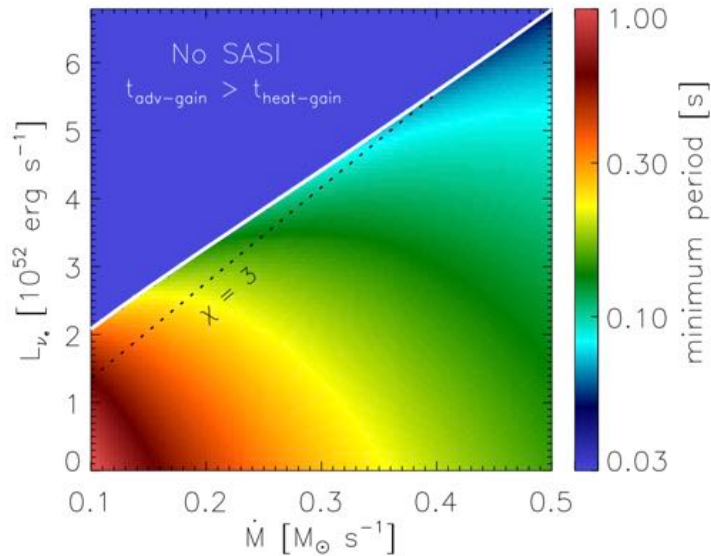
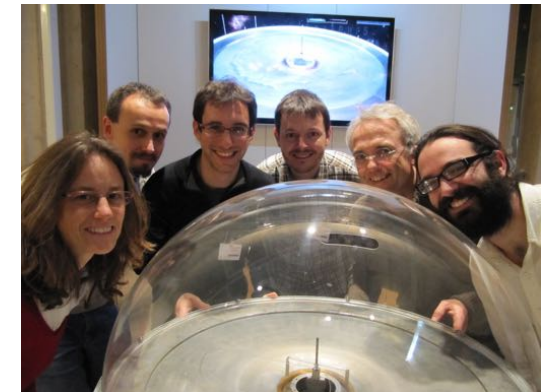
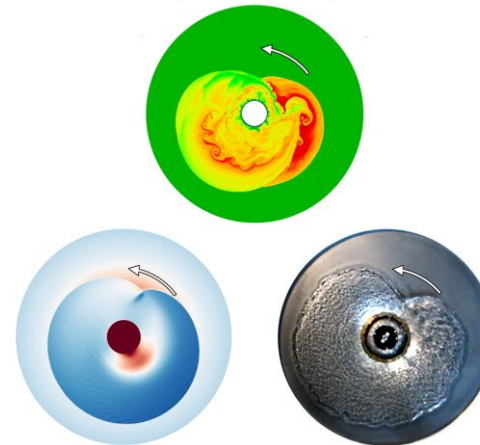


Supernovae explosions, from stellar core-collapse to neutron stars and black holes



La fontaine aux supernovae au Palais de la Découverte, Paris

17 décembre 2013-16 février 2014
12 chercheurs
138 présentations
2059 visiteurs



-développement du code d'effondrement gravitationnel CoCoNuT: relativité générale, équation d'état avec hyperons (Oertel+12, Peres+13)

-base publique d'équations d'état CompOSE.obspm.fr (Typel, Oertl, Klähn 2015)

-incidence de l'instabilité de choc SASI sur le spin des pulsars à la naissance (Guilet & Fernandez 14, Kazeroni+16)

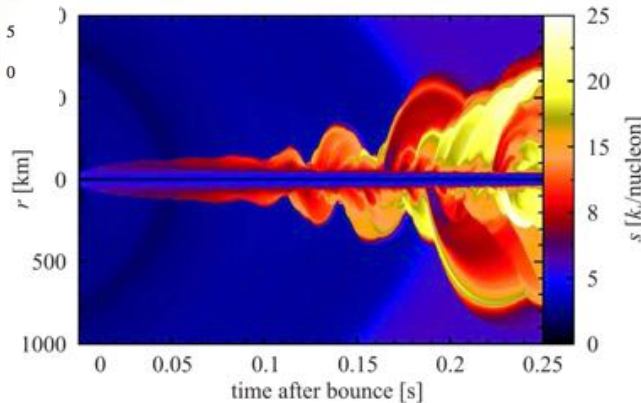
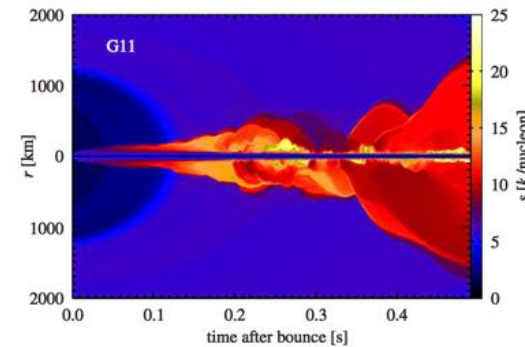
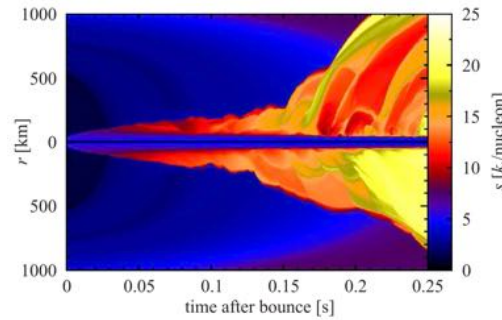
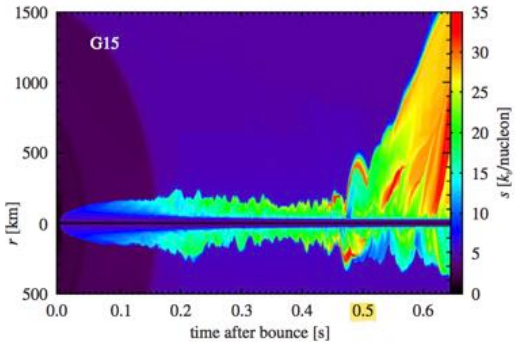
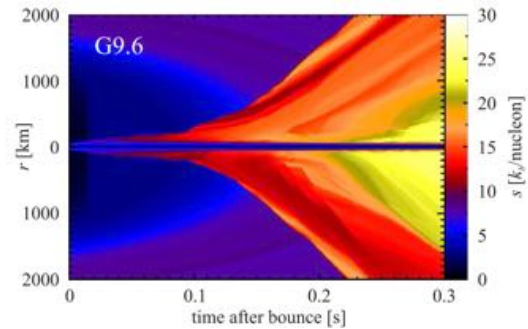
Progrès des explosions ab initio de supernovae : diversité de scénarios

-explosions ab initio 2D axisymétrique

8.1, 9.6 ,11.2, 15, 27M_{sol} (MPA)

12, 15, 20, 25 M_{sol} (ORNL)

(Müller+12a,b,+13, Bruenn+13)



-selon le progéniteur, évolution dynamique dominée par la poussée d'Archimède induite par l'absorption de neutrinos (11.2M_{sol}) ou par SASI (27M_{sol}) ou les deux (15M_{sol})

-compétition entre les échelles de temps advective et Brunt-Vaisala (Foglizzo+06, Fernandez+13)

$$\chi \equiv \int_{\text{sh}}^{\text{gain}} \omega_{\text{BV}} \frac{dr}{v_r} < 3$$

-faible énergie d'explosion < 10⁵¹ erg

-manque de convergence numérique (Bruenn+13)

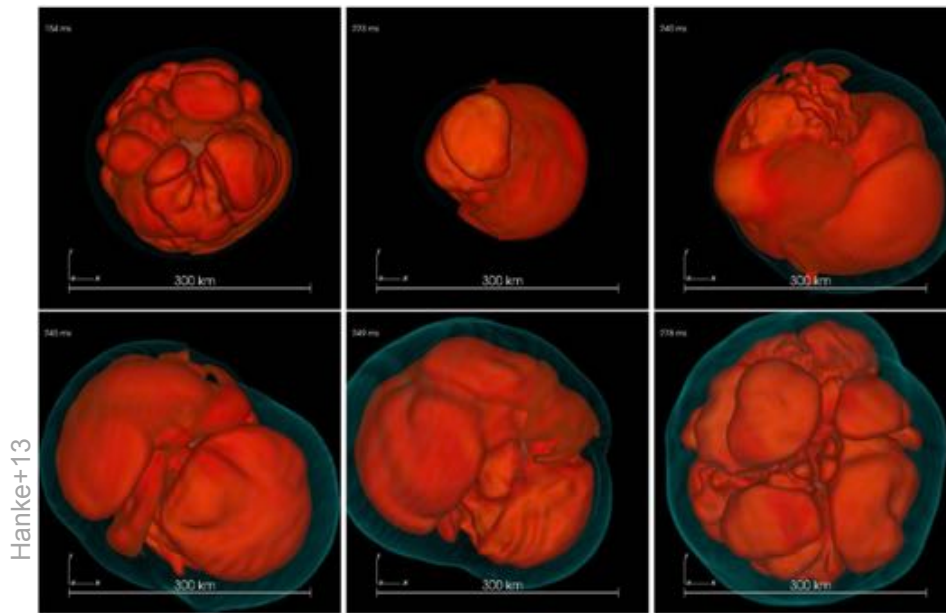
-transport de neutrinos approximatif (Dolence+14)

Les débuts des simulations 3D ab initio (MPA Garching)

-L'explosion n'est pas plus facile à obtenir à 3D qu'à 2D (Hanke+12, Couch & O'Connor 13)

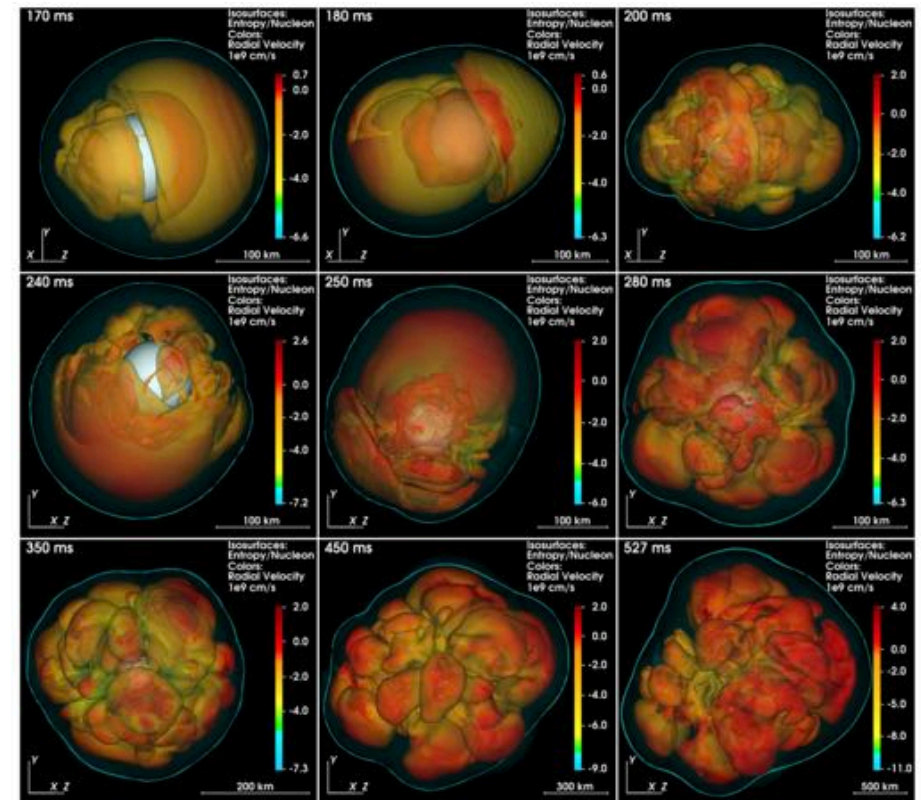
-La première simulation 3D n'a pas explosé après 380ms (Hanke+13)

... mais une modification mineure (étrangeté du nucléon) a suffi à produire une explosion (Melson+15)

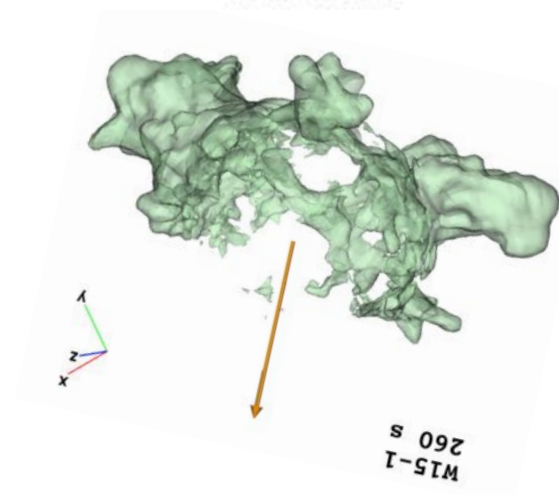
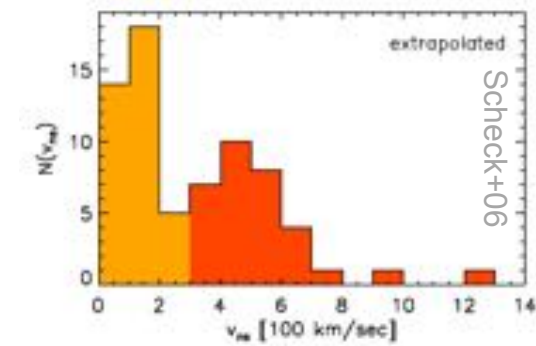
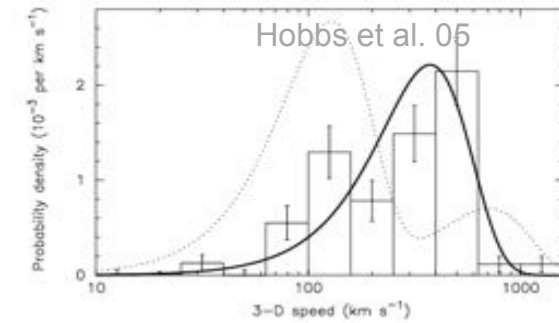
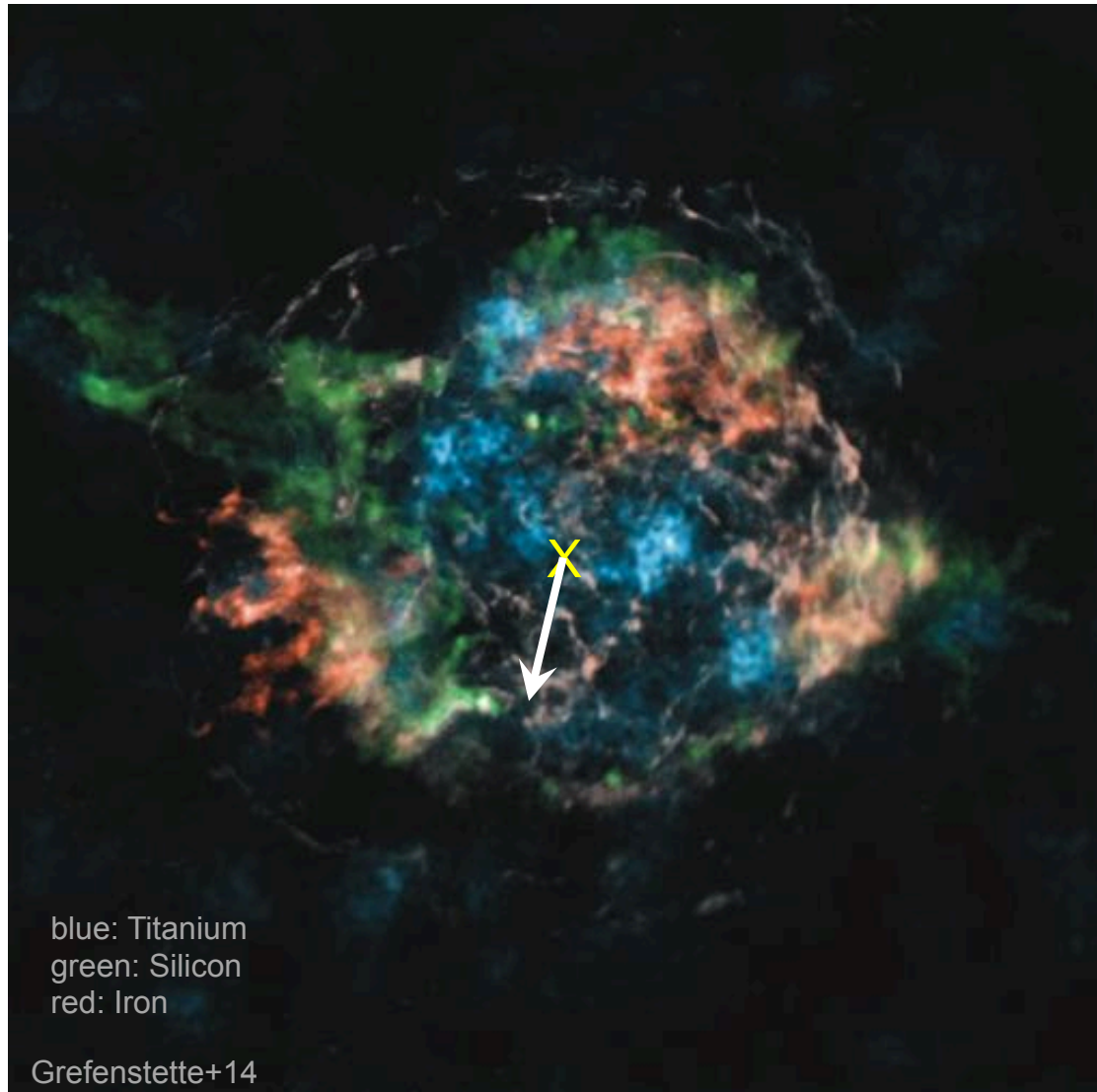


projet PRACE 150 millions d'heures
16.000 processeurs, 4,5 mois/modèle

durée d'évolution: 500ms
diamètre: 300km



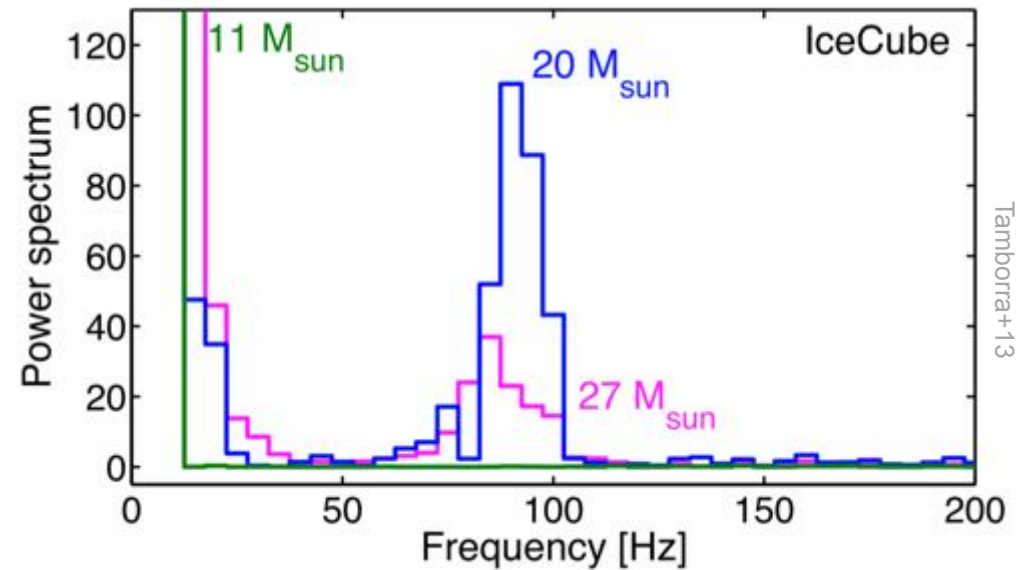
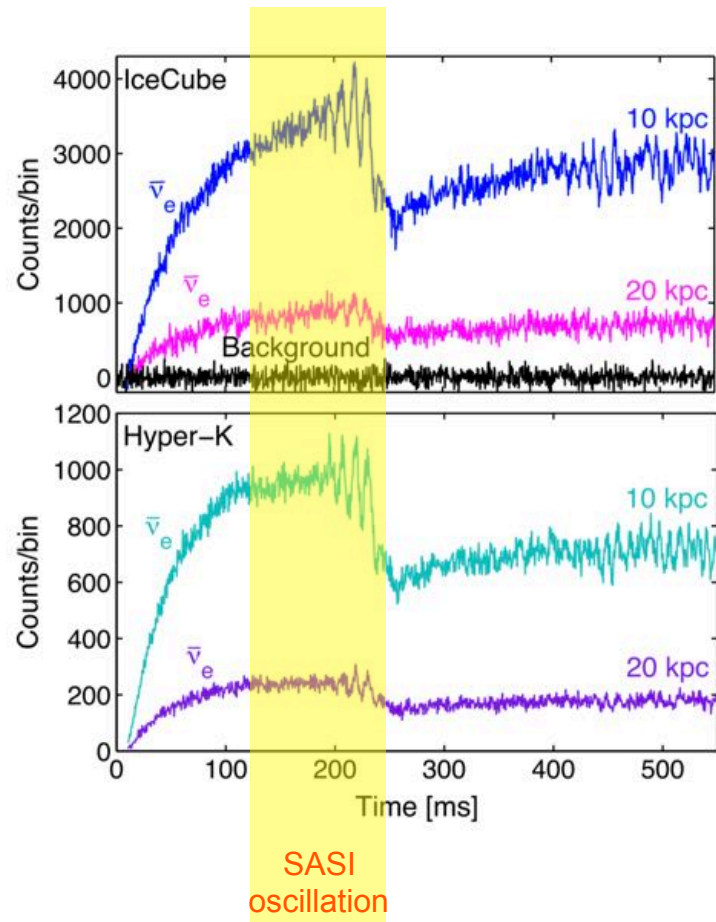
Hydrodynamique 3D asymétrique des supernovae gravitationnelles



Signature plus directe portée par les neutrinos (Tambora+13) et les ondes gravitationnelles (Kotake 2013)

Modulation attendue du flux de neutrinos d'une supernova galactique

IceCube & Hyper-Kamiokande peuvent détecter les oscillations induites par SASI (Tamborra+13,14):
signature directe du mécanisme d'explosion asymétrique



L'espace des paramètres diminue en physique nucléaire, mais augmente en structure stellaire

-l'équation d'état est mieux contrainte (cf talk Micaela Oertel)

PSR J1614-2230: $M=1.97M_{\text{sol}}\pm 0.04$ (Demorest+10)

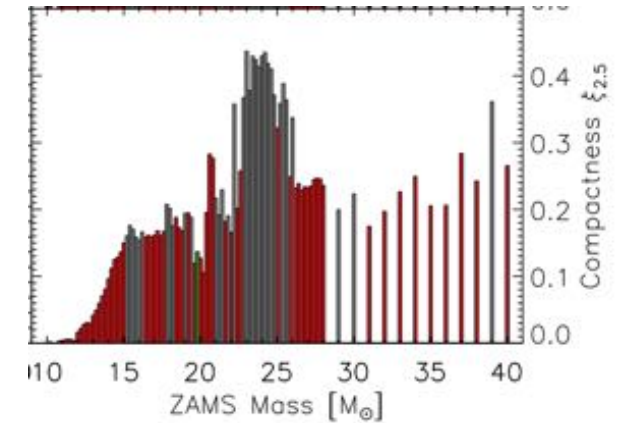
J0348+0432: $M=2.01M_{\text{sol}}\pm 0.04$ (Antoniadis+13)

dans les modèles numériques: EOS de LS1991, $K=180/220$ MeV

-l'explosion est sensible à la compacité ξ et aux asymétries du progéniteur

(O'Connor & Ott 11, Couch & Ott 13, Müller+15)

$$\xi_{2.5} \equiv \frac{M/M_{\text{sol}}}{R(M)/1000 \text{ km}}$$



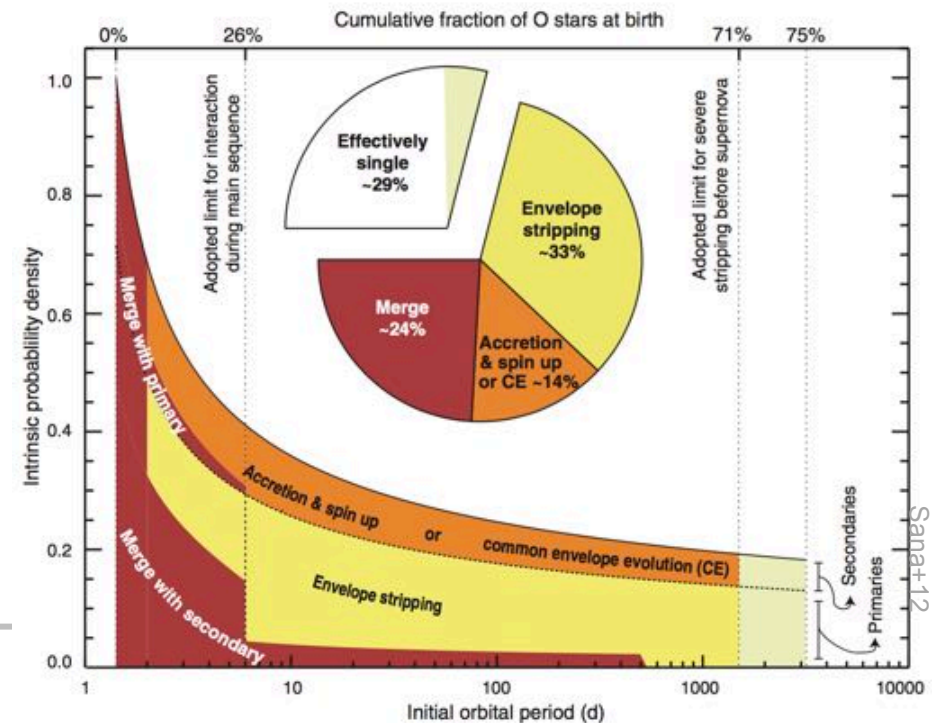
-la structure du cœur est une fonction complexe de la masse de l'étoile à sa naissance (Ugliano+12, Ertl+16)

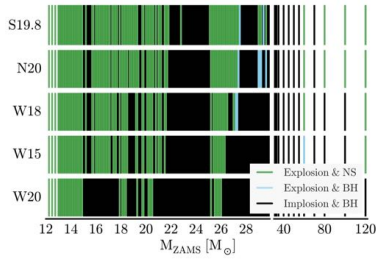
-70% des étoiles massives ont eu une interaction binaire

(Sana+12 Science)

-le progéniteur d'une supernovae peut être le fruit de coalescences

-le profil de moment cinétique peut être modifié par l'interaction binaire





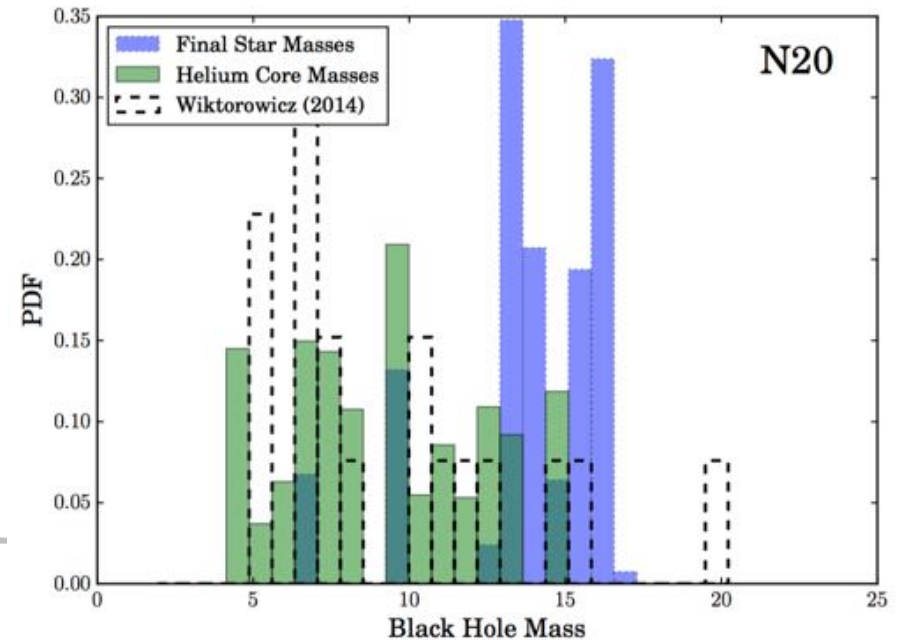
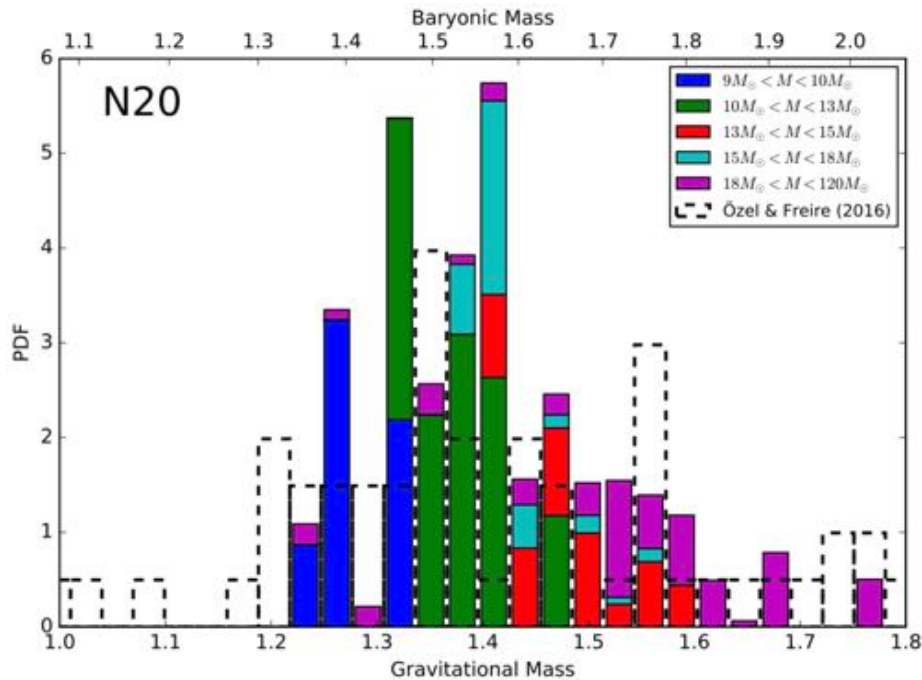
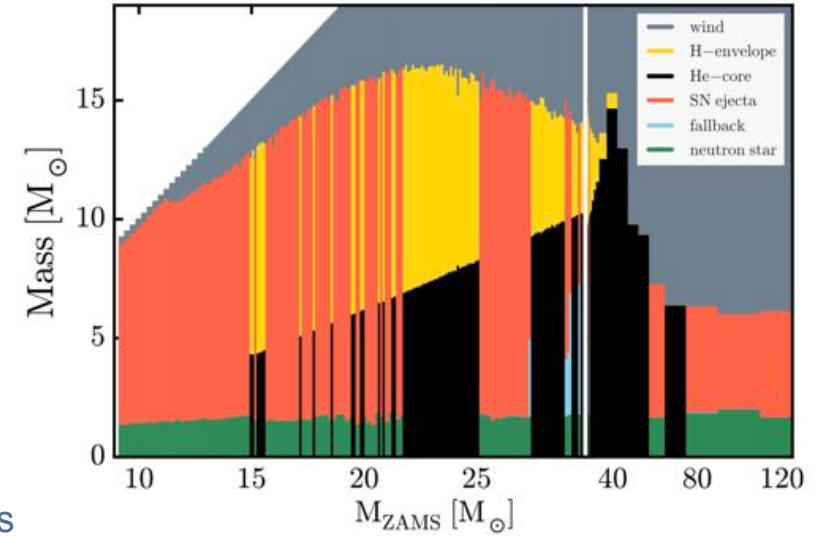
« Des îlots d'explosabilité dans une mer de formation de trous noirs »

Sukhbold+16

-modèles 1-D calibrés avec SN1987A (~18M_{sol}) et le Crabe (~10M_{sol})

- évolution stellaire isolée: binarité ignorée
- pas de rotation
- SN1987A était particulière

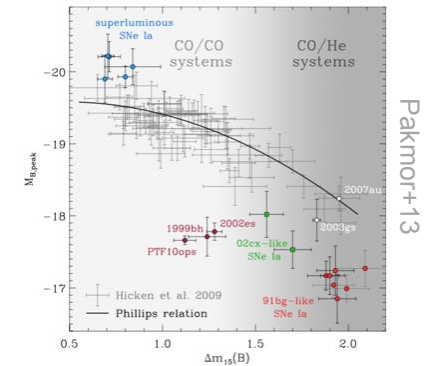
distribution de masses des étoiles à neutrons et trous noirs



Conclusions

SN thermonucléaires

- diversité des scénarios théoriques
- vers une maîtrise de la dispersion des chandelles standards ?



SN gravitationnelles

- mécanisme d'explosion par absorption de neutrinos + instabilités hydrodynamiques
- convergence numérique limitée par le transport des neutrinos 3D
- incertitudes de la structure stellaire:
 - inhomogénéités, rotation, champ magnétique, interaction binaire
- explosion pas assez énergétique: physique nucléaire ??

