

Les étoiles

La vie des étoiles

Au début du XX^{ème} siècle les astronomes étaient conscients qu'il leur manquait une théorie de l'évolution stellaire. C'était à ce point un mystère que les astronomes pensaient par exemple que les étoiles étaient constituées de charbon, seul élément capable à l'époque de soi-disant chauffer une étoile jusqu'à l'incandescence. Ne parlons pas des supernovae et d'autres entités dont l'évolution était alors un mystère.

C'est l'astronome anglais Arthur Eddington qui comprit le premier l'importance de la masse dans la vie d'une étoile. Baptisé le père de l'astrophysique solaire, Arthur Eddington publie en 1926 un livre intitulé *La Constitution Interne des Etoiles*, un ouvrage de 400 pages que la Presse de l'Université de Cambridge continue d'éditer. Il démontre que le Soleil est une immense boule de gaz au centre de laquelle les noyaux d'hydrogène sont convertis en hélium, phénomène à la source de son rayonnement, seule réaction capable de l'illuminer durant des milliards d'années.



Arthur Eddington

Grâce à cette idée géniale les astrophysiciens ont compris que la masse d'une étoile détermine sa vie qui est une lutte entre deux forces opposées : d'une part l'étoile tend à se contracter sous l'effet de sa gravitation, d'autre part la libération de l'énergie tend à la désintégrer.

Grâce à la loi de la gravitation définie par Newton, nous savons que tous les corps, des plus gros aux plus petits s'attirent mutuellement avec une force d'autant plus élevée que les corps sont rapprochés (inversement proportionnelle au carré des distances). Ainsi, autour de jeunes étoiles en gestation, un nuage dense d'hydrogène et d'hélium envahi de poussières est-il en train de se contracter, exerçant une attraction sur toute la matière.

Sous l'effet de leur propre gravité, les particules se rapprochent lentement, provoquant une augmentation de la densité du nuage protostellaire et une contraction plus importante de la région centrale.

Au début le nuage se contracte rapidement car il est encore froid et l'énergie des particules est libérée immédiatement. Les zones extérieures se regroupent en fonction de leur densité et des poches de gaz commencent localement à se contracter. Le nuage grandit et devient suffisamment dense pour être opaque à son propre rayonnement.

Lentement, à mesure que la gravitation se renforce sa partie centrale devient un globule de Bok, un petit nodule sombre et dense de 10 à 15 K. A cette température le nuage de poussières et de molécules mesure environ 600 fois la distance qui nous sépare du Soleil.

Sans interrompre le rythme de sa contraction le globule s'échauffe. Les noyaux atomiques se rapprochant les uns des autres, la gravité s'accroît et le nuage s'effondre sur lui-même en produisant sans cesse de la chaleur qui se dissipe dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. Le disque atteint maintenant une température de 40 K et ne mesure plus que 150 Unité Astronomique.

Le nuage porté à 40 K peut s'étendre sur près de 3000 UA ou 0.05 années-lumière mais il peut être cinq fois plus étendu. Parfois il atteint la démesure et s'étend sur plusieurs années-lumière ! Dans ce cas on ne parle plus de système stellaire en gestation bien que ce type de nuage contienne une nurserie de jeunes étoiles mais plutôt de nuages moléculaires géants.



A mesure que le temps s'écoule, sous l'effet de la force centrifuge, le système se met en rotation, donnant au nuage une forme de disque. La dimension de ces disques protoplanétaires varie entre 2 et 10 fois celle du système solaire. La plupart des disques confirmés entourent des étoiles âgées de 1 à 500 millions d'années seulement et contiennent suffisamment de matière pour former chacun entre 5 et 10 planètes de la taille de la Terre.

Nous pouvons observer des proto-étoiles non éclairées en train de se contracter dans les nuages proches des bras spiralés de la Voie Lactée : elles apparaissent comme de sombres globules de Bok et de proplydes, abréviation anglaise de "disque protoplanétaire", dans les régions brillantes de gaz et de poussières qui les entourent. Les plus représentatifs ont été découverts dans la région centrale de la nébuleuse d'Orion M42, au sein de la nébuleuse M16 de l'Aigle, de la Rosette, de la nébuleuse du Trèfle M20 dans le Sagittaire, autour de Fomalhaut dans le Cygne, HL Tauri et β Pictoris. En fait l'hydrogène dessine les bras de la Voie Lactée et d'une grande majorité des objets du ciel profond, des nébuleuses, des galaxies et d'autres entités plus étranges encore.

Grâce aux satellites IRAS, ISO et surtout Hubble dont la résolution est mille fois supérieure, c'est une véritable nurserie d'étoiles que nous découvrons lorsqu'on sonde les régions brillantes de notre Galaxie dans l'infrarouge lointain.

L'âge de la maturité

Durant son lent effondrement, si le nuage atteint une masse d'au moins 8% de celle du Soleil, sa masse critique lui permet d'entretenir des réactions thermonucléaires, c'est-à-dire

que son noyau est suffisamment dense et chaud pour assurer la fusion des noyaux atomiques de façon spontanée. Comment une étoile peut-elle y parvenir ?

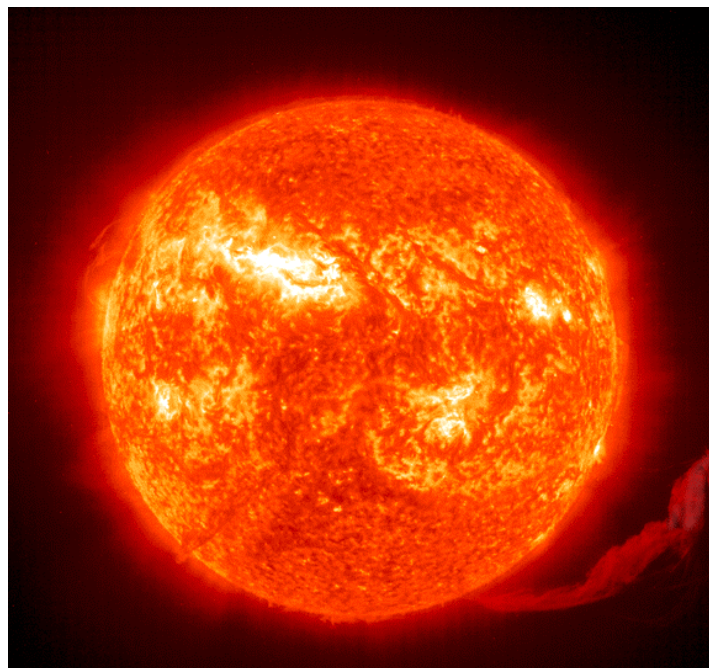
Pendant le cycle de contractions, le noyau de la future étoile entre dans une fournaise nucléaire. Echauffés par la libération de la chaleur, les atomes du noyau entrent mutuellement en collision et éjectent leurs électrons. Le noyau stellaire ne contient plus d'atomes mais des noyaux atomiques et des électrons libres. La matière est à l'état de plasma et le coeur de la future étoile atteint une température supérieure à 600000 degrés.

Sous la pression exercée par les couches extérieures de la proto-étoile, le taux de collisions augmente, provoquant la compression du noyau. Le noyau stellaire devient ainsi bien plus dense que l'acier. Bientôt l'effondrement de la proto-étoile est stoppé par la pression de radiation du noyau.

En peu de temps, l'énergie dissipée produit une élévation substantielle de la température interne de la future étoile. En vertu de la loi des gaz parfaits, sous la pression engendrée par le noyau, les zones les plus éloignées bouillent follement et s'étendent. L'énergie rayonne vers la surface, l'étoile grossit et sa luminosité augmente. Les zones marginales, loin des foyers nucléaires se refroidissent et l'étoile apparaît d'un éclat rouge terne et froid dans l'espace, entourée de nuages gazeux résidus du nuage protostellaire. Réellement froide car la température de sa surface n'atteint même pas 1600 K. A mesure que l'activité nucléaire s'emballe sa température superficielle dépasse bientôt 3000 K et l'étoile rayonne à cet instant cent fois plus d'énergie que le Soleil actuel ! L'étoile est maintenant formée et entame son évolution sur la séquence principale du diagramme Hertzsprung-Russel.

Durant cette période l'étoile brûlera le combustible de son noyau, en commençant par l'hydrogène, comme le fait le Soleil actuellement. Les étoiles plus massives brûlent plus rapidement et sont plus chaudes que le Soleil.

Chaque réaction libère peu d'énergie, mais distribuée dans tout le noyau d'une étoile et plus tard dans ses couches périphériques, l'astre est capable de produire son propre rayonnement et de l'entretenir durant 10 milliards d'années si nous prenons l'exemple du Soleil.



Notre Soleil est installé sur la séquence principale depuis 5 milliards d'années. Son noyau présente une densité centrale de quelque 145.7 g/cm^3 et une température de 15.43 millions de degrés. Cette température est en principe insuffisante pour que l'hydrogène commence à se transformer en hélium. Mais avec un petit coup de pouce de l'effet tunnel de la physique quantique les premières fusions thermonucléaires peuvent débuter. Pour maintenir le bilan énergétique, durant cette réaction une faible partie de la masse des noyaux est convertie en énergie pour assurer la cohésion des particules. Chaque seconde le Soleil convertit ainsi environ 500 millions de tonnes d'hydrogène en hélium. C'est ce "défaut de masse" ou cette énergie - merci Einstein - qui graduellement monte vers la surface, se transforme et se dissipe dans l'espace : l'étoile brille et rayonne de chaleur.

Arrivée à maturité, une étoile comme le Soleil est presque constituée de vide; la moitié de sa masse est réunie dans son noyau et occupe un volume cent fois plus petit que son volume total. A la fin de chaque cycle de fusion nucléaire il se retrouve avec quatre fois moins de particules qu'au départ et devient à chaque fois un peu moins dense, un peu plus chaud et un peu plus brillant.

Mais certaines étoiles n'atteignent jamais la maturité. A partir de 1980 en effet, on découvrit autour de plusieurs étoiles doubles des compagnons massifs, dont la masse était comprise entre 1 et 80 fois celle de la planète Jupiter. Des analyses minutieuses effectuées aux moyens de détecteurs infrarouges (CFHT d'Hawaii, Palomar, IRAS, HST) révélèrent qu'il s'agissait d'étoiles n'ayant pas la masse suffisante pour amorcer les réactions thermonucléaires. Elles émettaient en fait un rayonnement provoqué par la contraction de leur noyau. Leur masse, inférieure aux $0.08 M_{\odot}$ requises pour créer les plus petites étoiles, leur permettait seulement d'émettre un peu de chaleur. La température de leur surface oscillait entre 750 et 1400 K. L'astronome américaine Jill Tarter dénomma ces étoiles ratées des naines brunes. C'est ainsi que plusieurs équipes d'astronomes découvrirent indirectement plusieurs naines brunes : Gliese 229B, Gliese 623, Gliese 570D, ZZ Piscis (GC 29-38), l'étoile Van Biesbroek 8B, etc. Toutes gravitent autour d'étoiles naines, blanches ou rouges. D'autres naines brunes existeraient également dans l'amas des Hyades. Ce sont ces indices indirects qui incitèrent les astronomes à rechercher des systèmes planétaires autour des sources infrarouges et de se demander si finalement la plus grande partie de la masse cachée de l'univers n'était pas constituée d'astres obscurs semblables à ceux-ci. La recherche se poursuit et fait l'objet d'âpres discussions dans le petit monde de la cosmologie qui touche à l'infiniment grand tout en manipulant des entités appartenant au monde de l'infiniment petit.

Pendant la combustion de l'hydrogène, l'étoile produit des noyaux d'hélium et de carbone : l'union de trois particules alpha (hélium) forme du carbone, qui lui-même se transformera en azote puis en oxygène. C'est le cycle CNO mais il est très difficile à amorcer dans une étoile de la taille du Soleil car son noyau devrait atteindre une température d'au moins 20 millions de degrés. Les étoiles plus massives y arrivent car vu leur température interne elles parviennent à s'affranchir des forces de répulsions nucléaires qui mettent parfois en jeu des noyaux constitués de huit charges électriques.

La phase d'étoile géante

Dans les étoiles ordinaires, d'une à trois masses solaires, à mesure que l'énergie est consommée, les noyaux atomiques utilisés dans le processus de nucléosynthèse deviennent incapables de réagir, ce sont des "cendres" nucléaires et elles s'accumulent dans le noyau. Elles ne peuvent plus synthétiser d'éléments et produire de l'énergie sans une augmentation de la température ou de la pression. Comme tout système produisant du travail, la fin des

réserve d'hydrogène entraîne un manque d'énergie pour l'étoile. L'équilibre entre la force gravitationnelle et la pression de radiation entretenue par ce feu nucléaire étant rompu, l'étoile ne peut plus retenir la force de gravité, ce qui déclenche immédiatement une contraction de son noyau.

Si nous prenons l'exemple du Soleil, dans 5 milliards d'années notre étoile aura une réaction surprenante : en accord avec la loi des gaz parfaits, la contraction du noyau va provoquer une élévation substantielle de la température et de la pression. Ce phénomène va déclencher la fusion de l'hydrogène dans les couches supérieures du Soleil jusque là épargnées. Cette chaleur qui se dégage en périphérie va engendrer une dilatation démesurée de son enveloppe et sa luminosité va croître rapidement. L'étoile qui était jusque là de magnitude constante deviendra une étoile variable. Ce processus transforme physiquement l'étoile, sa taille pouvant devenir jusqu'à 50 fois plus volumineuse. Comme l'étoile s'étend, elle se refroidit et sa surface devient rouge sombre. A ce stade l'étoile quitte la séquence principale et, selon sa masse se transforme soit en géante rouge (0.3 à $7 M_{\odot}$), soit en supergéante rouge. Malgré une température superficielle ne dépassant plus 3000 K , ces étoiles géantes sont tellement volumineuses qu'elles illuminent le ciel pour citer Bételgeuse, Aldébaran ou Antarès : ce sont toutes des étoiles de premières grandeurs.

Toutes les étoiles connaissent cette évolution, prémices de l'épuisement des réserves d'hydrogène. Pour les étoiles peu massives à l'image du Soleil, ayant entre 0.3 et $7 M_{\odot}$, durant cette phase instable l'atmosphère supérieure étant très éloignée de l'influence des forces gravitationnelles, le milieu se raréfie et se dissipe dans l'espace. L'étoile géante s'entoure alors d'un halo riche en éléments enrichis par la transformation de l'hydrogène et de l'hélium en éléments plus lourds.

Au bout d'un milliard d'années, les effondrements successifs ont provoqué une augmentation de la pression et de la température du cœur de l'étoile. La température centrale atteint à présent 100 millions de degrés et là où l'Univers primordial n'avait pu franchir la fusion de l'hélium, l'étoile a réussi. Il est vrai que cet astre dispose de millions d'années pour réunir par hasard les hélions alors que l'on n'accorda pas plus de trois minutes à l'Univers primordial, l'expansion de l'Univers ayant éparpillé tous ses enfants endéans ce temps. Tout cela n'est-il pas poétique...

A ce stade, une nouvelle réaction thermonucléaire peut s'amorcer. Dans les petites étoiles à l'image du Soleil, la fusion thermonucléaire ayant raréfié l'hydrogène, l'étoile se voit contrainte de brûler l'hélium qui se transformera en oxygène puis en carbone. L'énergie libérée va transformer les atomes d'hydrogène non encore employés dans les couches superficielles de l'atmosphère stellaire, provoquant une réinitialisation de l'étoile. La fusion de l'hélium est tellement rapide qu'on l'a baptisée le "flash de l'hélium". Cette réaction a rendu l'étoile instable il lui faudra 160 millions d'années pour retrouver son calme. Cette phase "éclair" pourra se répéter plusieurs fois. Le Soleil devrait connaître 5 flashes de l'hélium successifs après lesquels il tentera de se stabiliser, provoquant une nouvelle contraction du noyau pour éviter d'exploser.

Si l'étoile est massive, entre 7 et $40 M_{\odot}$ le noyau devient si chaud qu'il fusionne de plus en plus rapidement, le plasma atteignant 30 à 500 millions de degrés. Cette phase d'étoile bleue est une étape critique car l'étoile est devenue tellement dense que les réactions nucléaires peuvent faire exploser le noyau. Les étoiles géantes bleues de 20 à $30 M_{\odot}$ sont à ce point chaudes et rayonnent des photons si intenses qu'elles perdent leur atmosphère tout au long de leur vie.

Si l'étoile a une masse supérieure à $40 M_{\odot}$, la nucléosynthèse finit par produire une réaction instable, car avec une masse aussi importante la gravitation arrive difficilement à équilibrer l'énergie cinétique des particules. Le comportement de cette étoile devient fort complexe. En général, il se caractérise par une séquence de contractions et de fusions nucléaires. Cette phase de combustion est très courte mais très intense. Dans les étoiles hypermassives la température du noyau dépasse 700 millions de degrés.

A l'heure actuelle les astronomes ont découvert très peu d'étoiles de ce type; citons η Carina dont la fin est proche et la dénommée Pistol découverte dans la constellation du Sagittaire en 1997, dont la masse serait d'environ $100 M_{\odot}$ et qui brille comme 10 millions de soleils !

Lorsque le Soleil sera 10% plus chaud, les animaux ne pourront plus supporter la chaleur et disparaîtront à leur tour. Lorsque le Soleil sera 15% plus chaud, les fleuves et l'eau des océans vont s'évaporer, libérant d'énormes quantités de vapeur dans l'atmosphère. La couverture nuageuse retenant la chaleur, la Terre deviendra invivable, la température au sol dépassant largement les 400°C .

A ce stade, certains scénarii prédisent que l'enveloppe du Soleil s'étendra jusqu'à l'orbite de Vénus, faisant monter la température sur Terre à 1200°C . Le Soleil sera devenu 2000 fois plus chaud et sa taille pourrait atteindre 180 à 200 fois sa taille actuelle ! A cette époque le Soleil brillera 2349 fois plus fort qu'aujourd'hui à la magnitude -35 et soutiendra un angle de 69° à la surface de la Terre !

Finalement la Terre sera engloutie dans l'atmosphère solaire et telle une roche en fusion, elle finira dans son noyau dans un long mouvement spiralé. D'autres scénarii, plus optimistes mais minoritaires pensent qu'à ce stade le Soleil aura perdu quelque 28% de sa masse, ce qui fait que Vénus ne connaîtra vraisemblablement pas les affres de l'enfer. La Terre, 38% plus éloignée du Soleil qu'aujourd'hui sera mécaniquement sauvagée.

Quoi qu'il en soit, après cette époque dantesque, le Soleil terminera sa vie environ 50 millions d'années plus tard. Son enveloppe se dégonflera, son noyau se contractera pour devenir une naine blanche toute auréolée de gaz, ceux-ci formant une nébuleuse planétaire qui accrochera le regard d'éventuels observateurs. L'étoile centrale portée à une température d'environ 10000 K se refroidira graduellement pour finalement disparaître et devenir un corps inerte.



Pour les étoiles de plus de $7 M_{\odot}$ la phase supergéante rouge porte le coeur de l'étoile à environ 800 millions de degrés. Les noyaux de carbone se transforment en silicium,

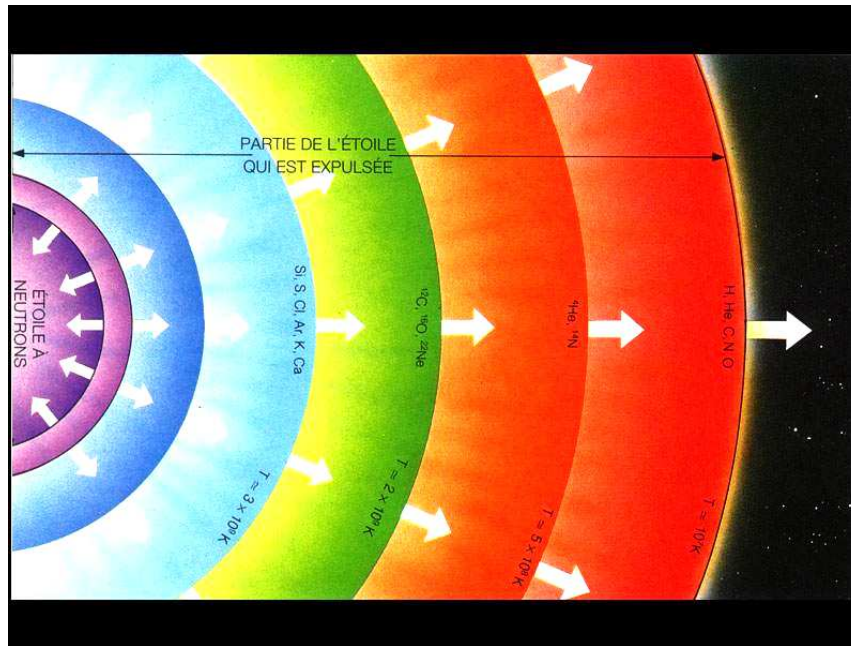
phosphore, soufre et en leurs produits de décomposition, tels le magnésium et l'aluminium. Chaque fois que le combustible vient à manquer le noyau en profite pour se contracter, favorisant la formation de nouveaux éléments. Bientôt la nucléosynthèse stellaire produira une bonne partie des éléments du tableau de Mendéléev. Ces réactions ne durent que quelques dizaines d'années et épuisent l'étoile car elles libèrent continuellement de l'énergie et des gaz de sa surface.

Si la masse finale du coeur de l'étoile ne dépasse pas $2 M_{\odot}$, environ $25 M_{\odot}$ sur la Séquence principale, les réactions thermonucléaires s'arrêtent ici et le coeur s'effondre jusqu'au stade d'étoile à neutrons. Au-delà la force de gravité s'amplifie suite à des effets relativistes et brise les forces de résistances intra-atomiques. L'implosion se poursuit pour déboucher sur la formation d'un trou noir. Au-delà de $3 M_{\odot}$ les réactions en chaîne peuvent s'emballer, la température du noyau montant jusqu'à 1 milliard de degrés. Le coeur se transforme en fer et un instant plus tard l'étoile explose en supernova. Son noyau atteint durant un instant 150 milliards de degrés et dans un bouquet final libère toute son énergie dans l'espace. Son coeur s'effondre sur lui-même, et s'il atteint le rayon de Schwarzschild, la gravitation ne peut pas contrecarrer les forces cinétiques qui règnent dans le noyau et l'étoile implose littéralement. Elle devient un trou noir.

Une structure en pelure d'oignon

Curieusement, à la veille de sa mort l'intérieur d'une étoile prend l'aspect d'une "pelure d'oignon". En effet, à mesure que le noyau d'une étoile massive devient plus dense et plus chaud il devient de moins en moins homogène. Composé d'hydrogène en surface, une étoile massive est constituée d'éléments de plus en plus lourds à mesure que l'on se rapproche du centre. Ces enveloppes concentriques sont créées aux différentes étapes de la combustion thermonucléaire et suivent des seuils bien précis de température et de pression au-delà desquels les réactions s'emballent.

La plupart des étoiles naines blanches entre 0.3 et $7 M_{\odot}$ ont un noyau constitué de carbone et d'oxygène. Inerte et sans enveloppe le coeur de l'étoile se refroidit rapidement et devient une naine noire. Si l'étoile fait plus de $7 M_{\odot}$ sur la Séquence principale, à 100 millions de degrés le noyau d'hélium se transforme en carbone puis en oxygène. Vers 7 ou 800 millions de degrés, les noyaux de carbone et d'oxygène se transforment en néon puis en sodium. Au-delà de 1 milliard de degrés, le coeur d'une étoile de $15 M_{\odot}$ se transforme en silicium puis en nickel et se désintègre en fer. Cette transformation physique est rapide et d'autant plus que la masse de l'étoile est importante.



Dans les étoiles géantes massives arrivées au stade terminal, le noyau métallique est ainsi recouvert successivement d'une enveloppe de silicium, de néon, d'oxygène, de carbone, d'hélium et d'hydrogène. Tous les éléments plus lourds que le fer sont synthétisés pendant l'explosion de la supernova.

C'est donc la masse totale de l'étoile - sa masse sur la Séquence principale - qui détermine jusqu'à quelle phase son noyau se transformera et à quel stade de la combustion thermonucléaire la fusion s'arrêtera dans son noyau. En effet, le processus thermonucléaire s'arrête avec la formation du fer. La réaction qui prévalait jusqu'à présent était exothermique, c'est la réaction qui libérait de l'énergie. A partir du fer, chaque nouvelle combinaison exige un apport d'énergie; le système est endothermique. Mais l'étoile ne peut satisfaire cette exigence. Son rayonnement s'arrête et marque la mort de l'étoile.

En général, la pression de radiation de l'étoile résiste aux forces de la gravitation. Mais si l'étoile n'y parvient pas en raison de sa masse trop élevée, son noyau de masse M peut se réduire à une sphère de rayon $R_s = \frac{2GM}{c^2}$, c'est le *rayon de Schwarzschild*. Il mesure environ 3 km pour une masse équivalente à celle du Soleil.

Dans ces conditions l'effondrement est inévitable car ni la force des électrons (l'interaction électromagnétique) ni la force des neutrons (l'interaction forte) ne pourront s'opposer à cette force universelle. Ainsi un objet dépassant 2.5 à $3 M_{\odot}$ en fin de vie franchit ce qu'on appelle la "limite de Landau-Oppenheimer" et s'il atteint le rayon de Schwarzschild, il disparaît définitivement du firmament, et devient un trou noir.

Source : <http://astrosurf.com/lombry>