

Texte de la 192^{ème} conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 10 juillet 2000

**Généalogie céleste de la matière
par Michel Cassé**

Matière lumineuse, précieuse et céleste

La matière se divise en deux camps : baryonique (nucléaire) et non baryonique (non nucléaire). Les deux formes émanent du big-bang. La première est sensible à la lumière – et donc à l'interaction électromagnétique structurante - et la seconde est neutre et indifférente. La matière nucléaire se structure en objets (étoiles, nuages, hommes), l'autre, reste à l'état de particules éparses, n'engageant que des relations de pure gravitation.

À l'échelle universelle, la matière (noire) non baryonique constitue 30 % environ de l'univers, alors que la matière nucléaire n'atteint que 2 ou 3 %, le reste est dans la « quintessence » substance à vertu répulsive qui accélère l'expansion de l'univers, au dire de la cosmologie *new look*.

À l'échelle de la Voie Lactée, la matière nucléaire ne constitue qu'une portion congrue (10 % environ). Le halo galactique est largement dominé par la matière noire, essentiellement non baryonique constitué de particules lourdes et indifférentes aux interactions forte et électromagnétique, encore hypothétiques, appelés *neutralinos*.

La matière ordinaire et banale, celle des pierres et des arbres, des fleurs et des torrents, du vin et des papillons, du sang et des larmes, mérite d'être qualifiée de précieuse, lumineuse et céleste car elle est rare, photosensible et vient du ciel. Nous ne retiendrons que les préceptes simples de la matière nucléaire :

Ce qui est chaud brille. Ce qui ne brille pas absorbe de la lumière. Ce qui émet ou confisque des notes de lumière se laisse analyser chimiquement.

La matière atomique chaude brille, froide elle absorbe la lumière. Il n'en faut pas plus pour que fleurisse toute une astronomie de l'ombre et de la lumière, des nuages et des étoiles. Aussi est-on en mesure de mesurer la composition de toute une variété de milieux astrophysiques, stellaires ou nuageux. Les avancées spectaculaires des spectrographes au cours des dernières années, associés à des télescopes de grande envergure (HST, VLT, Keck), ont permis un saut qualitatif dans les mesures de composition d'une grande variété d'étoiles et de nuages interstellaires et même extragalactiques. L'échantillon de mesure a été considérablement élargi. Notamment des mesures précises d'abondance ont été effectuées dans l'atmosphère d'étoiles beaucoup plus vieilles que le Soleil, appartenant au halo galactique et dans les nuages extragalactiques lointains (donc reculés dans le temps) qui absorbent la lumière des quasars. On peut comparer ces compositions avec celle du système solaire et en déduire quelques tendances évolutives.

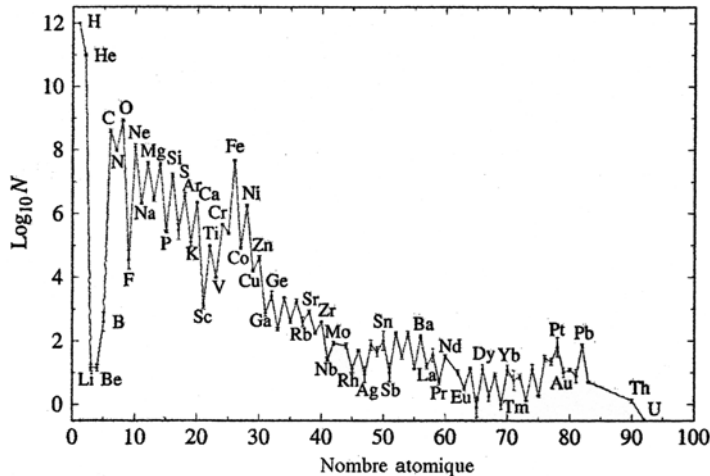


Figure 1 : Table d'abondance des éléments dans le Système Solaire. Parmi les traits saillants de la distribution des abondances, notons :

- La cime de l'hydrogène ($Z = 1$) et le sommet de l'hélium (2) ;
- La gorge profonde qui sépare l'hélium et le carbone (6) ;
- La croissance continue depuis la région carbone/oxygène (6-8) jusqu'au calcium (20) ;
- La vallée du scandium (21) suivie du pic du fer (26) ;
- Le paysage en dent de scie qui descend en pente douce vers les petites collines du platine (78) et du plomb (82) ;
- Le plat pays du thorium (90) et de l'uranium (92).

Le Soleil constitue, par sa masse, la plus grande partie du Système Solaire, et, en tant que tel, il est plus représentatif que les planètes qui ont été le siège de fractionnements chimiques intensifs. La composition de la photosphère solaire peut donc être comparée à celle des météorites, pierres qui tombent du ciel, seconde source d'information sur la composition du nuage protosolaire, ceci à condition d'exclure les éléments volatils (hydrogène, hélium, carbone, azote, oxygène et néon) qui se sont en partie échappés des météorites depuis leur formation.

Les chondrites carbonées, qui représentant une fraction infime de la matière du Système Solaire, préservent cependant en leur sein sa composition originelle, car, si on exclut les éléments volatils, elles n'ont été que très peu affectées par le métamorphisme.

L'accord entre les deux sources de données est excellent, et de plus l'analyse des météorites au laboratoire permet de déterminer la composition isotopique de la matière constitutive du Système Solaire, donnée inestimable pour celui qui veut comprendre l'origine et l'évolution des noyaux d'atomes.

Le bilan de composition du nuage ancestral duquel s'est extrait le Système Solaire s'établit ainsi : dans un gramme de matière on compte 0,72 g d'hydrogène, 0,26 g d'hélium, 0,02 g d'éléments lourds. En dépit de sa superbe, le Soleil et son nuage père sont singulièrement pauvres en métaux, puisqu'ils ne constituent que 2 % de sa matière, mais c'est une fortune comparé aux étoiles antiques du halo galactique que l'on pourrait en l'occurrence taxer de déminéralisation.

L'Astrophysique Nucléaire se donne pour but la détermination des mécanismes détaillés qui président à l'édification de chaque espèce nucléaire qui compose la nature depuis le deutérium (2 nucléons) jusqu'à l'uranium (238 nucléons), de leur site astrophysique, et de l'enchaînement des phénomènes nucléaires qui façonnent la

complexification de la matière atomique dans les galaxies. Plus précisément, elle vise à expliquer la composition du système solaire, les grandes tendances de l'évolution chimique de la galaxie (enrichissement progressif en métaux, proportions relatives des éléments).

D'hydrogène en uranium, les sources des noyaux d'atomes sont soigneusement établies. Ces sources sont le Big bang (hydrogène, hélium et une pincée de lithium 7), le rayonnement cosmique (lithium béryllium, bore) et par dessous tout les étoiles.

Évolution stellaire et nucléosynthèse

Les étoiles brillent parce qu'elles transmutent les éléments. Les réactions nucléaires constituent la source d'énergie des étoiles. Les proportions relatives des différents isotopes dans la nature, entre le carbone et l'uranium sont le résultat de la nucléosynthèse des étoiles. Nous sondons les reins et les cœurs de ces ouvrières en simulant leur existence au moyen de modèles physico-mathématiques.

Le jeu des particules qui entrent dans les réactions nucléaire se limite à p, n, g, e⁺, e⁻, n. Celles-ci sont organisées par les quatre forces conventionnelles de la physique (forte, faible, électromagnétique et gravitationnelle). L'étoile simulée n'est pas l'étoile vrai mais elle partage avec elle les principaux attributs. Les modèles de structure et d'évolution stellaires sont fondés sur des principes généraux d'équilibre mécanique et énergétique. Une étoile théorique se réduit à quelques équations d'équilibre, mais celles-ci ne sont pas indépendantes. Les réactions nucléaires sont suivies pas par pas, ainsi que la composition qui en résulte. Le composition chimique de départ est prise comme celle du milieu interstellaire où a pris naissance l'étoile considérée.

La résolution des équations différentielles couplées se fait au moyen de codes numériques perfectionnés. À la sortie on lit sur un listing les différentes caractéristiques à toutes les profondeurs de l'étoile (température, densité, composition et autres paramètres afférents) et ceci tout au long du temps.

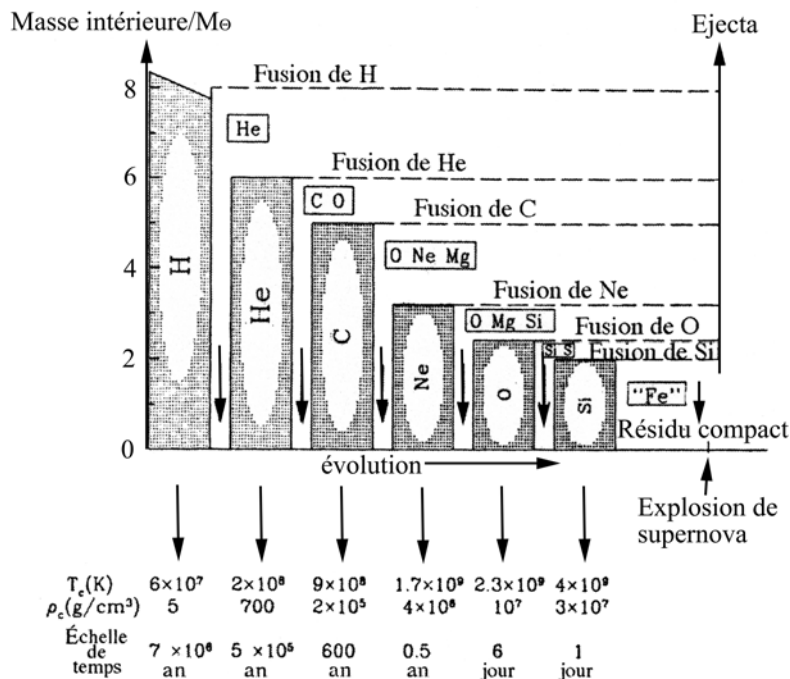


Figure 2 : Évolution schématisée de la structure interne d'une étoile de 25 masses solaires. (d'après Marcel Arnould de l'Université Libre de Bruxelles).

On peut discerner, en grisé, les différentes phases de combustion ainsi que leur principaux produits. Entre deux phases de combustion, le cœur stellaire se contracte et la température central s'élève. Les phases de combustion sont de plus en plus courtes. Avant l'explosion, l'étoile épouse une structure étagée. Le centre est occupé par le fer et la périphérie par l'hydrogène, l'entre-deux par les éléments intermédiaires.

L'effondrement puis la détente (rebond) du cœur engendre une onde de choc qui rallume les réactions nucléaires dans les profondeurs et propulse dans l'espace les couches qu'elle traverse. Le cœur effondré se refroidit par émission de neutrinos pour devenir étoile à neutrons (voire trou noir). La plus grande partie de l'énergie gravitationnelle dégagée par l'implosion du cœur (10^{53} erg) est libérée en 10 secondes environ sous forme de neutrinos.

Les phase finales de l'évolution stellaires (qui sont également les plus complexes) sont suivies avec un soin particulier dans la mesure où elles se soldent par une éjection d'une partie de la matière travaillée par l'étoile.

Par exemple dans l'explosion d'une supernova massive, la température atteint des sommets (5 milliards de degrés dans la couche riche en silicium) et les réactions nucléaires opèrent avec une rapidité si extrême que l'interaction faible (et lente) n'a pas le temps de se manifester. La conversion de protons en neutrons ne s'effectue pratiquement pas, si bien que l'espèce nucléaire la plus abondamment synthétisée est le nickel-56 (pauvre en neutrons). Celui-ci éjecté dans l'espace, transformera, en son sein un proton en neutron puis un autre, pour parfaire sa structure nucléaire. La première transmutation prend 7 jours en moyenne, et la seconde 77. Le noyau résultant n'est autre que le fer-56.

Au cours de la dernière désintégration des rayons gamma d'énergie très spécifique seront émis (847 keV). Cette prédiction théorique attendait confirmation, car soudain, en hiver 1987 une supernova honora de sa présence le Grand Nuage de Magellan.

Supernovae

On distingue deux variétés de supernovae : Les premières provenant de l'effondrement du cœur des étoiles massives, forment des étoiles à neutrons, (et des trous noirs, peut-être) qui, pour se refroidir, émettent des flux intenses de neutrinos et la seconde qui ne laisse subsister aucun astre compact et n'émet nul neutrino, mais qui en revanche requiert une naine blanche et un compagnon pour lui donner la mort. Celles-ci forment la classe des supernovae gravitationnelles, celles- là, la classe des supernovae thermonucléaires.

Cette classification est vouée à remplacer la classification spectroscopique en type II et type I selon que le spectre arbore ou non les raies de l'hydrogène, devenue ambiguë. On conserve cependant la dénomination SNIa pour qualifier les éblouissantes supernovae dont la courbe de lumière a des inflexions particulière et où l'hydrogène brille par son absence.

Les supernovae classées Ib et Ic sont en réalité des supernovae dont le mode d'explosion est semblable à celui des type II.

SN 1987a, la supernova du siècle, et même des temps modernes fut résolument une supernova de ce type : son géniteur (20 Mo) n'était pas très différent de Rigel, la belle étoile bleue de la constellation d'Orion, ceci nous le savons pour l'avoir photographié avant sa mort.

Une opportunité unique s'offrait de mettre à l'épreuve la théorie de l'explosion des étoiles et de la nucléosynthèse qui s'ensuit. Celle-ci prédisait que les isotopes de masse 44, 56 et 57 proviennent de la greffe soudaine, explosive, de particules alpha (ou noyau d'hélium) et de protons sur les noyaux silicium, forgés au coeur de l'étoile -mère peu de temps avant son explosion. Etant synthétisés sous la forme de leur géniteur radioactif (Nickel-56, Nickel-57 et Titane-44), les noyaux épars dans les débris de la supernova, au terme de désintégrations en chaîne, devaient retrouver leur forme stable (Fer-56, Fer-57 et Calcium-44). Cette radioactivité ne pouvait rester inaperçue.

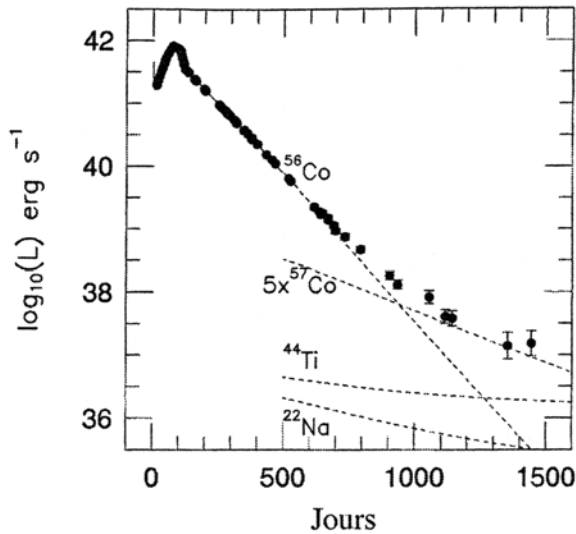


Figure 3 : Déclin de l'éclat de SN 1987A.

Le 23 février 1987 ; Shelton et Jones annoncèrent la découverte d'une supernova dans le Grand Nuage de Magellan. Ce fut la plus brillante qu'on ait pu observer depuis le temps de Kepler (1604), et la première que l'on ait pu examiner dans toutes les bandes du spectre électromagnétique, et la première, encore, à être détectée par son flux de neutrinos. Sa distance relativement proche (170 000 années-lumières) offrit une opportunité unique d'observer une supernova en grand détail, ceci avec une variété de techniques de détection différentes.

Le déclin de la courbe de lumière de la supernova, passé 200 jours, suit la décroissance radioactive du ^{56}Co (de demi-vie égale à 77 jours), père du ^{56}Fe et fils du ^{56}Ni . La lumière de la supernova est ensuite entretenue par la décroissance du ^{57}Co et ^{44}Ti de plus longues périodes, ce qui en fait un objet purement radioactif.

L'énergie déposée par les radionucléides (pointillé) correspond à des quantités initiales de ^{56}Ni , ^{57}Ni et ^{44}Ti de 0,075, 0,009 et 0,0001 M_{\odot} respectivement.

Ainsi le message de la supernova magellanique, retardé de 170 000 années par la distance de l'objet, arrivait au bon moment : celui où les hommes s'étaient donné des modèles physiques et des ordinateurs capables de restituer par le calcul l'évolution des étoiles. Message différé certes, mais message exact : les neutrinos arrivèrent avec quelques heures d'avance sur la lumière, comme prévu, et en nombre attendu.

Les supernovae thermonucléaires, quant à elles se rapprochent, par leur fonctionnement, des bombes du même nom. Leur physique, brutale et complexe impliquant des échanges de matière entre deux étoiles, échanges régis par la gravitation.

Ce dont on est assuré, par contre, c'est de l'identité de l'astre explosif : une naine blanche. Les naines blanches gavées de matière dépassent la masse critique de 1,4 M_{\odot} , et elles explosent comme des bombes, sans laisser aucune trace sinon un violent signal lumineux et un nuage en expansion (vestige de supernova). L'explosion est le résultat de la combustion nucléaire catastrophique du carbone dans le corps des naines blanches.

Une caractéristique frappante des SNIa est qu'elles exhibent un remarquable degré de similitude, bien plus que toute autre classe de supernovae, et que leur évolution spectrale est reproductible. Si l'on écarte quelque brebis galeuse, les courbes de lumière montrent une impressionnante homogénéité. La dispersion des magnitudes absolues est de 0,2 magnitude, environ, sur tout l'échantillon analysé, est très inférieures à celle des SN des autres types.

Aussi les SNIa sont considérées comme des étalons de luminosité, ou si l'on préfère, pour reprendre le terme usité en cosmologie, des chandelles standard.

Les supernovae, sans distinction de classe, figurent parmi les plus beaux fleurons de l'astronomie. Ce sont les moteurs de l'évolution galactique. Elles ne sont chiches ni en énergie (10^{51} erg), ni en matière ouvragée. (2 Mo d'oxygène et 0,6 Mo de fer, respectivement pour les deux types).

Les deux variétés de supernovae ne produisent pas les éléments dans les mêmes proportions, ni n'explorent au même rythme (1 thermonucléaire pour cinq gravitationnelles).

Les supernovae gravitationnelles produisent efficacement quantités d'éléments entre le carbone et le calcium, l'oxygène étant le plus abondant, alors que leurs consœurs thermonucléaires ne lésinent pas sur le fer et les éléments voisins. Selon les estimations, environ 50 % du fer viendrait des SNIa.

*Figure 4 : Obole d' étoiles exprimées en masse solaire
Les quantités de fer éjectées sont incertaines faute de pouvoir définir avec précision la frontière entre la matière qui s'envole et celle qui reste prisonnière de l'étoile à neutron.*

Élément	13Mo	15Mo	20Mo	25Mo
C	0.060	0.083	0.115	0.148
O	0.218	0.433	1.480	3.000
Ne	0.028	0.039	0.257	0.631
Mg	0.012	0.046	0.182	0.219
Si	0.047	0.071	0.095	0.116
S	0.026	0.023	0.025	0.040
Ar	0.0055	0.0040	0.0045	0.0072
Ca	0.0053	0.0033	0.0037	0.0062
Fe	0.150 ?	0.120 ?	0.075	0.050 ?

La richesse en neutrons de la matière qui échappe tout juste à l'emprise gravitationnelle de l'étoile à neutrons est un site prometteur pour le processus r qui élabore les noyaux les plus lourds de la nature (jusqu'à l'uranium) par capture rapide de neutrons. Un cocktail bien dosé des deux semble expliquer, du moins qualitativement, les abondances du système solaire. Les SNIa fournissent tous les éléments entre oxygène et calcium, les SNIa apportent une dernière touche au pic du fer.

Évolution chimique de la Galaxie

Jeu subtil, mais encore incertain, l'évolution galactique est promise à un grand avenir, car elle seule permet d'expliquer la marche de l'histoire de la matière dans les différentes régions du cosmos.

La galaxie est un système structuré et évolutif, constitué d'un disque et d'un halo, de composition et d'histoire différentes. Les populations stellaires du halo se caractérisent, premièrement par des mouvements (vitesses et orbites) particuliers, et deuxièmement, par une grande pauvreté en métaux,

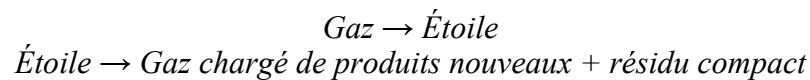
Le halo est le royaume de la matière noire et des étoiles antiques. (rassemblées dans les amas globulaires ou étoiles éparses). Toute formation d'étoiles y a cessé, et les astres désargentés (pauvres en métaux), en orbite au tour de la galaxie, poursuivent leur course inlassable. La matière y a gardé une forme très primitive.

Dans le disque, les nuages accouchent de lignées d'étoiles. Les étoiles synthétisent la variété complète des noyaux d'atomes à l'exception des plus légers.

Elles laissent derrière elles des résidus compacts, naines blanches, étoiles à neutrons et trous noirs. De générations en générations d'étoiles le milieu interstellaire s'enrichit en éléments complexes, propices à la vie. Les noyaux d'atomes, expulsés par les étoiles s'entourent d'électrons et s'enchaînent en molécules dans le froid des nuages et naît toute une chimie.

Dans l'exercice que constitue la modélisation de l'évolution chimique de la galaxie (et de toutes les galaxies) on se donne quelques règles ainsi que des conditions initiales.

La composition initiale est celle qui sort du big-bang : 76 % d'hydrogène et 24 % d'hélium. Cette matière originelle sert d'aliment aux cycles de transformation suivants :



Chaque étoile travaille à la constitution et à la perfection des métaux et amasse en ses tréfonds les bons oxygène, silicium, fer. La contribution de chaque étoile est versée à la caisse galactique. L'obole est constituée d'un certain nombre d'atomes de chaque type, dont on fait le décompte. Chacune verse selon sa masse. Les plus grosses sont les plus généreuses et versent le plus rapidement. Le décompte, étoile par étoile, s'établit comme l'indique le barème donné plus bas.

Les étoiles massives, par supernovae interposées et les étoiles de masse intermédiaires, mères des nébuleuses planétaires sont les plus généreuses. Ce sont les véritables moteurs de l'évolution chimique de la galaxie. Les étoiles de faible masse ($< 1 \text{ Mo}$) brillent à l'économie et leur évolution est si lente qu'on attend encore leur pleine floraison. Si les étoiles de masse supérieures à celle du Soleil jouent dans l'économie générale de l'univers le rôle d'artisans consciencieux, les astres noirs et petites étoiles jouent celui de boulets.

Progressivement, le gaz galactique se transforme en étoile, lesquelles restituent une partie de leur substance à leur milieu nourricier et originel, mais une partie seulement. A ce jeu, le gaz est perdant, il finit par s'épuiser. A terme cessera la formation d'étoiles. Les supernovae se feront toujours plus rares, la composition de la galaxie ne changera plus.

Cette description de l'évolution chimique de la Voie Lactée est conforme aux observations. Ainsi la teneur en fer des étoiles plafonne depuis plusieurs milliards d'années, ce qui montre un ralentissement évident de l'évolution nucléaire.

Pourtant le fer, roi de la création nucléaire, possède le noyau le plus solide. A supposer que la forme la plus résistante est vouée à dominer, on conclurait que les étoiles préparent son avènement. Pourtant il ne règnera pas, et l'épouvantable vision d'un univers métallique s'efface.

Il y a à ceci plusieurs raisons. La première tient à une faiblesse (fondatrice) de la chaîne nucléaire qui relie l'hydrogène (élément premier) au fer au niveau des noyaux de masse 5 et 8 (instables). La nucléosynthèse du big-bang avorte au nombre 7. L'expansion a été trop rapide pour que le carbone se constitue. L'instabilité malade des fils de l'hélium en est la cause.

La seconde est que la production de fer est amoindrie par le fait que la partie centrale des étoiles massives, ou le fer prolifère implose et est transformée en étoile à neutrons ou pire encore, en trou noir. La troisième est que les supernovae de type Ia (fruit de la vie en couple de certaines étoiles) sont rares. Et la quatrième est celle que nous venons de voir : La Galaxie brille de ses derniers feux et son évolution chimique touche à sa fin.

Conclusion : Astrophysique explosive

Supernova ! explosion d'étoiles suivie de désintégrations de noyaux radioactifs : la physique cataclysmique est celle que porte au cœur toute une génération d'astrophysiciens on

ne peut plus doux et pacifiques, par ailleurs. Ces somptueux évènements font dorénavant l'objet d'une telle attention qu'on pourrait dire que l'humanité est rentrée dans l'ère des supernovae.

Références

- Arnould, M. & Takahashi, K. 1999, Nuclear Astrophysics, Reports on Progress in Physics, 62, 393.
- Arnett, D. 1996, Supernovae and Nucleosynthesis, Princeton University Press.
- Audouze, J. Musset, P. & Paty, M. , 1990 (coordonateurs). Les particules et l'univers, Nouvelle Encyclopédie Diderot, PUF.
- Cassé, M. Généalogie de la matière, Odile Jacob à paraître (Septembre 2000).
- D.D Clayton, 1983, Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, 1983, The University of Chicago Press.
- Lehoucq, R. et Cassé M. " in "Supernovae", Les Houches 1990, North Holland, p. 589.
- Prantzos, N. & Montmerle, T.1998, Naissance, vie et mort des étoiles, Que sais-je, PUF.
- Rolfs C. & Rodney W.S. 1988, Cauldrons in the Cosmos,, The University of Chicago Press.
- Valentin, L, 1982, ,Physique subatomique : noyaux et particules, vol I et II, Collection enseignement des sciences.
- Slezal E. & Thévenin, F. ,Nucléosynthèse et abondance dans l'univers, 1998, Cépaduès Editions.