

Alchimie et la vie d'une étoile

Stephen N. Lyle

February 8, 2025

Il y aura deux sujets ici: le premier, c'est l'alchimie et la deuxième, les étoiles. J'expliquerai le lien entre ces deux choses, mais l'objectif principal sera de décrire deux très grandes découvertes de l'humanité. Et bien sûr, vous apprendrez comment fabriquer de l'or en abondance!

J'ai mis le mot 'alchimie' dans le titre. Par contre, il ne faut pas imaginer qu'il s'agit ici de plonger dans le monde de l'ésotérisme. Regardez ce qu'à dit Abu Mūsā Jābir ibn Hayyān, un polymathe d'origine persane du huitième siècle, aussi connu par la latinisation Geber (voir Fig. 1):¹



Figure 1: Geber (721–815 ApJ). Alchimiste arabe, célèbre pour son enseignement sur la transmutation des métaux. Portrait du douzième siècle, Codici Ashburnhamiani 1166, Biblioteca Medicea Laurenziana, Florence. Image domaine public

J'ai vu que certaines qui essayaient de produire par synthèse de l'argent et de l'or travaillaient dans l'ignorance, en utilisant des fausses méthodes. Ils se divisaient en deux groupes, les dupeurs et les dupés. Je les plaignais tous.

Et nous aussi, nous pouvons les plaindre car ils n'avaient aucune chance d'y réussir, comme nous allons voir. De plus, Geber a mis son doigt sur un problème de taille: l'ignorance! Car c'est quoi l'alchimie? La transmutation des éléments.

¹See www.wdl.org/fr/item/10675/

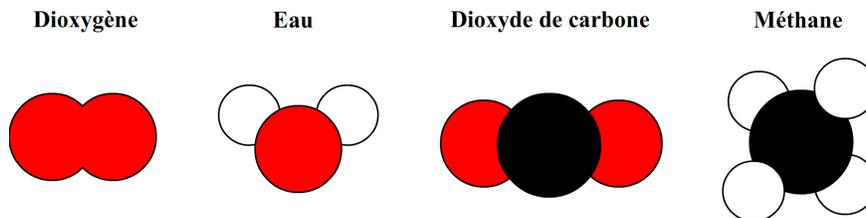


Figure 2: De gauche à droite: (1) l'oxygène que nous respirons, association de deux atomes d'oxygène, (2) l'eau, deux atomes d'hydrogène attachés à un atome d'oxygène, (3) le gaz carbonique, surnois car invisible, deux atomes d'oxygène attachés à un atome de carbone, et (4) le méthane que nous brûlons (voir plus loin), quatre atomes d'hydrogène attachés à un atome de carbone. Image sur le site web physique-chimie-college.fr/definitions-fiches-science/ sous le rubrique 'les molécules'

Par exemple, la transmutation du plomb en or. Mais comment transmuter le plomb en or quand on ne sait même pas ce que c'est au fond le plomb? Et quand on ne sait pas ce que c'est au fond l'or?

Pour commencer, posons donc la question: qu'est-ce qu'un élément? Aujourd'hui nous parlons d'éléments chimiques, et notre premier objectif ici sera de présenter en termes plutôt qualitatifs la conception moderne de la matière. Commençons donc avec les molécules. Quelques molécules simples sont illustrées sur la Fig. 2. D'autres molécules sont plus grandes et plus complexes, comme les protéines, éléments de base du fonctionnement de la cellule, et l'ADN, notre patrimoine génétique.

En tous les cas, une molécule est une association d'atomes. Et chaque atome est un élément chimique de base, représenté par une case sur le tableau périodique (voir Fig. 3). Regardez bien! C'est la première grande découverte que je voulais décrire. Car aujourd'hui nous connaissons tous les éléments qui puissent exister, et encore d'autres qui n'existent pas naturellement. Ici représentés sont 111 éléments. Nous connaissons aussi (en principe) toutes leurs propriétés, car nous avons une théorie qui nous donne cela: c'est la théorie quantique, la théorie de l'atome.

Dans la première partie de cette présentation, mon objectif sera d'expliquer un peu comment les éléments sont organisés dans ce tableau, et d'expliquer en quoi exactement il est périodique. Le point de départ ici c'est donc l'atome, et qui dit 'atome' pense tout de suite à Démocrite, un autre polymathe, mais grecque cette fois, qui a vécu entre 460 et 370 avant notre ère. Regardez ce qu'il a dit (cité par de multiples sources):

Convention que le doux, convention que l'amer, convention que le chaud, convention que le froid, convention que la couleur, en réalité il n'y a que les atomes et le vide.

Tableau périodique des éléments

Le tableau périodique des éléments est présenté avec une légende explicative pour l'élément Carbone (C) :

- Numéro atomique:** 6
- Symbole de l'élément:** C
- Principaux nombres d'oxydation:** -4, -2, 0, +2, +4 (le plus fréquent est en gras)
- Masses atomiques:** 12,011 (Carbone), 14,007 (Azote), 15,999 (Oxygène), 18,998 (Fluor), 20,18 (Neon)
- Nom:** Carbone
- Classification:** (Dc) deux électrons valentaux, (Dp) trois paires d'électrons

Le tableau inclut également des légendes pour les groupes (I A à VIII A) et les périodes (1 à 7), ainsi qu'une légende pour les métaux de transition, les métaux et les non-métaux, et les gaz rares et métalloïdes.

Figure 3: Le tableau périodique des éléments. Tous les éléments qui puissent exister, et encore certains qui ne puissent pas exister naturellement. Image sur le site web www.alloprof.qc.ca/BV/pages/os1118.aspx

C'est une idée vraiment révolutionnaire! Aujourd'hui nous appelons cela le réductionnisme. C'est l'idée que tout se réduit en fin de compte à certains blocs de construction, très simples, tout petits. L'idée du réductionnisme est très puissante et elle a longtemps motivée la science. D'ailleurs, elle reste au cœur de sa réussite dans beaucoup de domaines aujourd'hui.

En prenant cette traduction au pied de la lettre, même les sensations que nous révèlent nos sens pourraient se réduire aux atomes et le vide. On croirait presque entendre Démocrite chuchoter "Convention que l'humain"! C'est un sujet qui fait toujours débat. Dans une interprétation moins ambitieuse, la notion de goût est aujourd'hui expliquée par une interaction entre les molécules et certaines cellules sur la langue, et puis des signaux amenés par les nerfs dans notre cerveau. Egalement, si nous comprenons par 'chaud' une température élevée, nous l'expliquons par une agitation plus ou moins grande des particules composant l'objet en question. Et la couleur, c'est une histoire de longueurs d'onde de la lumière.

Aujourd'hui nous parlons plus que jamais des atomes, et ils jouent un rôle très semblable à celui imaginé par Démocrite. Mais à une différence près: notre atome est divisible. Et il est divisible de deux manières différentes, une facile et l'autre difficile, voire très difficile. Car l'atome a deux niveaux de structure. C'est ce que nous allons voir.

Au premier niveau de structure, un atome est un noyau avec des électrons qui

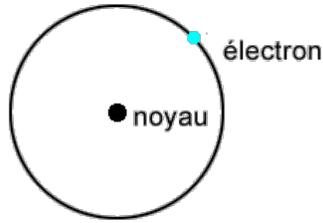


Figure 4: L'atome d'hydrogène est l'atome le plus simple, car il n'y a qu'un électron

tournent autour. Regardez l'atome d'hydrogène dans le Fig. 4. C'est l'atome le plus simple, car il n'y a qu'un électron qui tourne autour du noyau. Du moins, on imagine les choses comme ça pour simplifier. Alors, on peut demander pourquoi l'électron reste là, à tourner autour du noyau.

Une planète fait un peu la même chose. Elle tourne autour de son étoile. C'est parce qu'il y a une force d'attraction entre ces deux entités, la force de gravitation. Et c'est pareil dans l'atome. Il y a une force d'attraction, mais cette fois c'est une force électrique. Le noyau porte une charge électrique positive et les électrons portent chacun une charge électrique négative. Et la règle pour la force électrique c'est que, quand une particule porte une charge électrique positive et l'autre une charge électrique négative, les deux particules s'attirent. Voilà pourquoi l'électron reste à proximité du noyau.

Et puisqu'on parle de la force électrique, il y a une autre chose qui sera très importante pour la suite. Quand deux particules portent des charges électriques du *même signe*, ces deux particules vont se repousser. De plus, la force de répulsion va augmenter au fur et à mesure que les deux particules s'approchent l'une de l'autre, pour devenir très grande quand elles sont vraiment proches. C'est le cas pour deux noyaux d'atomes, puisque tous les deux portent une charge électrique positive, ou bien pour deux électrons, mais c'est pour le cas de deux noyaux que ça va nous intéresser tout à l'heure.

Continuons un peu sur cette voie parce que les détails, même si un peu laborieux, sont de toute importance. Il faut savoir aussi qu'un atome est électriquement neutre, c'est-à-dire que la charge électrique totale sur un atome est zéro. Par exemple, la charge sur le noyau d'un atome d'hydrogène est $+1$ et la charge sur l'électron est -1 , donc la charge totale est $1 - 1 = 0$. Le deuxième atome le plus simple est l'atome de l'hélium. Dans cet atome, il y a deux électrons et la charge sur le noyau est $+2$, donc la charge totale est $2 - 2 = 0$. Le troisième atome, c'est le lithium, charge électrique sur le noyau $+3$, donc trois électrons. Et ainsi de suite. Vous aurez compris que les propriétés chimiques d'un élément proviennent du nombre d'électrons dans son atome. Quand il y en a 6, c'est du carbone, avec une charge $+6$ sur le noyau. Avec 8 électrons, c'est de l'oxygène. Je reviendrai sur cette idée ci-dessous.

Mais considérons un instant la taille de ces objets. Première chose, un atome, c'est petit. En moyenne, un atome mesure à peu près 10^{-10} m, c'est-à-dire qu'il

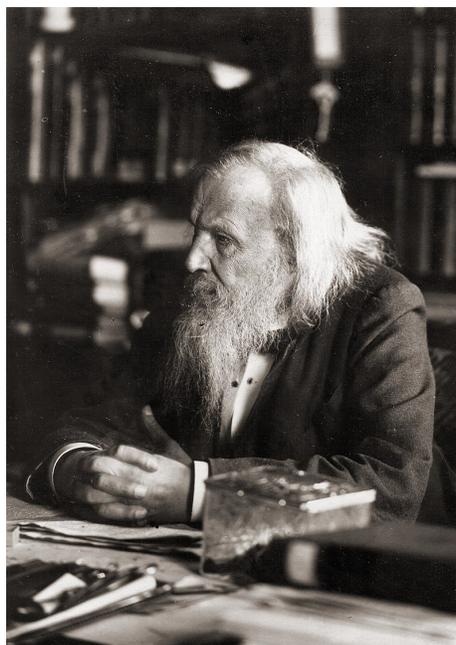


Figure 5: Dmitri Mendeleïev, une des personnes qui a contribué à la découverte dont nous sommes en train de parler. Image domaine public

en faudrait dix milliards côte-à-côte sur une ligne pour en faire un mètre de long. Mais le noyau est encore beaucoup plus petit. Il mesure 10^{-15} m, c'est-à-dire cent mille fois plus petit que l'atome, ce qui fait un millionième de milliardème de mètre. Pour comprendre cela, imaginez que je représente le noyau par une balle de golf, de rayon une dizaine de centimètres. Alors, l'électron peut se balader sur un rayon de dix kilomètres! Et entre les deux, il n'y a rien. Sauf, bien sûr, le champ de force électrique. Et l'électron est tellement petit que nous ne connaissons pas encore sa taille, mais c'est au moins mille fois plus petit encore que le noyau.

Revenons donc à notre tableau périodique des éléments. On l'appelle souvent le tableau de Mendeleïev. Dmitri Mendeleïev est né à Tobolsk en Sibérie en 1834, et il a vécu jusqu'en 1907 (voir Fig. 5). Avant de continuer, une pensée pour sa mère, car on dit qu'il était le dix-septième enfant! Son père était principal du lycée à Tobolsk, mais il est mort jeune. Apparemment c'était sa mère qui l'a emmené à Moscou pour l'inscrire à l'université quand il avait quinze ans. Mais à Moscou, on l'a pas voulu. Tant pis pour Moscou! Alors elle l'a emmené à Saint-Pétersbourg, où il a été accepté. On peut dire que la maman de Mendeleïev a aussi contribué à la découverte de cet célèbre tableau!

De Saint-Pétersbourg, Mendeleïev va à Heidelberg en Allemagne pour travailler avec Bunsen et Kirchhoff. C'était le siècle de la nouvelle science de la chimie, depuis certains grands chimistes des lumières comme Lavoisier en

France. Le travail à cette époque consistait à isoler et identifier de nouvelles substances, de nouveaux éléments. Alors, Bunsen et Kirchhoff brulaient ces éléments et regardaient de très près la lumière qu'ils émettaient. Car cette lumière contient comme une empreinte digitale, et c'est bien ça qui permet aux astronomes d'identifier quels éléments sont présents loin de nous dans l'espace, autour des étoiles, par exemple. On appelle cela la spectroscopie.

En 1863, on connaissait 56 éléments. Ça fait la moitié de ceux qui apparaissent dans le tableau périodique de la Fig. 3. Et chaque année en moyenne on trouvait un autre élément. Regardez maintenant ce que nous dit Mendeleïev:

Dans un rêve, j'ai vu un tableau où tous les éléments se mettaient en place selon leurs caractéristiques. Quand je me suis réveillé, je l'ai immédiatement écrit sur un bout de papier.

On dirait que c'est facile, la science! Mais pour faire un rêve comme celui-là, il faut d'abord se casser la tête contre le problème pendant des mois, voire des années!

Voyons un peu ce que Mendeleïev a vu dans son rêve. La première chose c'était d'arranger tous les éléments connus sur une ligne, de gauche à droite, en ordre de masse atomique croissante. Donc le premier était l'hydrogène, le plus léger. Le deuxième aurait été l'hélium, mais on ne l'avait pas encore trouvé: c'était découvert en 1868. Le troisième était le lithium, découvert en 1817, et puis le béryllium, découvert en 1798, le bore, découvert en 1808, et ainsi de suite. Seulement, de temps en temps il a fait un retour à la ligne, comme s'il a voulu écrire sa liste sur une page un peu étroite. Mais ce retour à la ligne, il ne l'a pas fait n'importe comment! Il l'a fait de telle manière que, dans chaque colonne, tous les éléments qui apparaissent dans cette colonne ont des propriétés chimiques similaires. C'est en cela que le tableau des éléments est périodique. Regardez à nouveau la Fig. 3 pour voir un exemple. Les éléments lithium, sodium, et potassium dans la première colonne réagissent de manière similaire avec d'autres éléments chimiques.

Mais pour faire en sorte que ça marche comme il veut, Mendeleïev a fallu laisser quelques cases vides. Et son idée était qu'ils devaient y avoir des éléments dans ces cases. En 1860, Mendeleïev a donc prédit l'existence de huit éléments jusqu'alors inconnus. De plus, vu la position de chaque case vide, il a pu estimer la masse atomique de l'élément et même ces tendances à interagir avec d'autres éléments, ce qui était utile pour ceux qui essayaient de les identifier. Et bien sûr, plus tard, on commençait à trouver ces éléments manquants.

Ce qu'a fait Mendeleïev a été très important dans cette découverte. Mais il ne faut pas oublier le rôle de tous les autres, les Lavoisiers, les Bunsens, et les Kirchhoffs. La science est dans tous les cas un travail collectif. Et c'est intéressant de noter que, selon un article publié récemment dans un journal scientifique,² l'auteur a trouvé sept personnes qui auraient eu à peu près la même idée, de manière indépendante, à plus ou moins le même moment. C'est quelque chose qui arrive souvent. Cette idée était dans l'air du temps.

²E. Scerri: The discovery of the periodic table as a case of simultaneous discovery. *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **373**, 2097 (2015).

C'est très important de rappeler que Mendeleïev et les autres à cette époque ne savaient rien des électrons et les noyaux. Ces travaux étaient entièrement empirique. Il n'y avait pas encore de théorie de la structure de l'atome. L'électron a été découvert par J.J. Thomson à Cambridge en 1899 et le noyau par E. Rutherford, aussi à Cambridge, en 1910. Le premier modèle de l'atome a été formulé par N. Bohr, de passage à Cambridge, en 1911. C'était le premier modèle quantique d'un atome, et concerné l'atome le plus simple, c'est-à-dire l'atome d'hydrogène. Bohr a donné la première explication de certaines observations de la lumière émise ou absorbée par la matière, le genre d'observation fait par Bunsen et Kirchhoff au dix-neuvième siècle.

Revenons donc à notre tableau périodique (Fig. 3). En haut à gauche, on voit cet atome le plus simple, l'hydrogène, avec un électron. La charge électrique sur le noyau est +1. Le deuxième élément se trouve en haut à droite. C'est l'hélium, avec deux électrons. La charge électrique sur le noyau est +2. La charge électrique sur le noyau a un nom: c'est le *numéro atomique*. Ces deux atomes constituent la première ligne du tableau, et puis on fait un retour à la ligne pour trouver le troisième élément, le lithium, numéro atomique +3, donc trois électrons. Comme on a dit plus haut, l'identité de l'élément, et donc ses propriétés chimiques, provient du nombre d'électrons dans l'atome. Les atomes sont effectivement numérotés par leur numéro atomique.

La charge électrique sur le noyau, qui détermine le nombre d'électrons, est égale au nombre de protons qu'il contient. Et maintenant on est en train de parler de ce qu'il y a à l'intérieur du noyau. Car si l'atome est divisible dans le sens qu'on peut lui enlever ses électrons, le noyau, lui aussi, est divisible. Il est composé de protons et neutrons. Chaque proton porte une charge électrique +1 et chaque neutron est électriquement neutre, c'est-à-dire qu'il porte une charge électrique 0. Cela veut dire que le numéro atomique d'un atome, la charge électrique sur le noyau donc, est égale au nombre de protons qui s'y trouvent.

Bon, vous voyez tout de suite le problème! On avait dit que le noyau est vraiment très petit. Un millionième de milliardième de mètre. Et on veut y mettre des particules, des protons, qui portent une charge électrique du même signe, si près les unes des autres. Mais elles vont se repousser, et très fortement, car on veut les rapprocher de très près. Si on essaie de faire rapprocher deux protons, ils se repoussent de plus en plus fortement au fur et à mesure qu'ils se rapprochent, et si on les relâche, ils vont se séparer en accélérant. Mais si on a beaucoup de force, et donc beaucoup d'énergie, et si on arrive à les rapprocher à moins de un millionième de milliardième de mètre l'un de l'autre, on va pouvoir les accrocher. Car il existe une autre force dans la nature, qui est de très courte portée, certes, mais qui est vraiment très forte. Elle est tellement forte qu'on l'appelle, avec beaucoup d'imagination, la *force forte*!

Cette force est une des quatre forces fondamentales de la nature, avec la force électromagnétique, la force de gravitation, et une autre force que je ne veux pas considérer ici, la force faible. Et c'est bien la force forte qui gère ce qui se passe à l'intérieur du noyau, à ces petites échelles de distance. Donc, pour résumer, on peut dire que, si on arrive à rapprocher quelques protons suffisamment près les uns des autres, ils vont pouvoir rester ensemble, avec l'aide de quelques

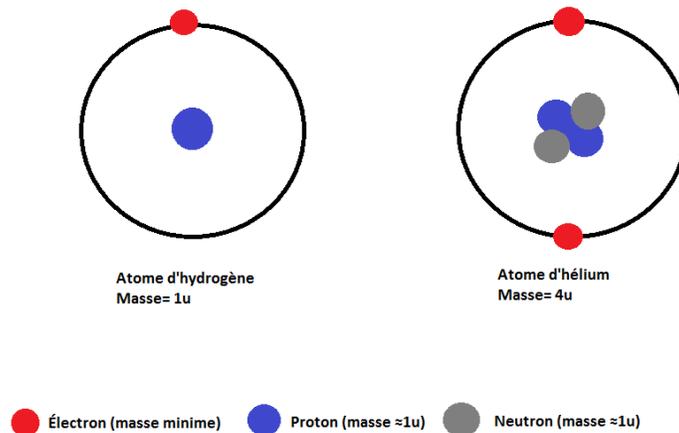


Figure 6: Les deux atomes les plus simples, l'hydrogène et l'hélium. Source: fr.wikipedia.org/wiki/Noyau_solaire

neutrons, qui eux aussi sont concernés par cette force forte, même s'ils ne sont pas affectés par la force électrique. Effectivement, les neutrons jouent le rôle de stabiliser le tout. Et enfin, comme chaque atome est électriquement neutre, pour chaque proton dans le noyau, il y a un électron qui tourne autour.

Regardez les exemples dans la Fig. 6. À gauche, nous avons effectivement la même image que dans la Fig. 4, sauf que nous avons un peu plus de détail sur le noyau. Et bien, le noyau est lui aussi très simple. Il ne contient qu'une particule! Un proton. Et puis nous avons un électron qui tourne autour. L'hélium est un peu plus intéressant, car il y a deux protons dans le noyau, et donc il faut un ou deux neutrons pour le stabiliser. Ici représenté nous avons l'hélium-4 (noté ${}^4\text{He}$), avec deux neutrons. Le numéro 4 mentionné ici s'appelle la *masse atomique*. Il existe une autre forme d'hélium avec seulement un neutron dans le noyau, qui s'appelle donc l'hélium 3 (noté ${}^3\text{He}$). Notez bien qu'il y a toujours deux protons dans l'hélium 3, autrement ce ne serait pas de l'hélium! C'est bien le nombre de protons, le *numéro atomique*, qui détermine la nature de l'élément.

La masse atomique est le nombre total de protons et neutrons dans un noyau. Pour donner un autre exemple, dans le cas du carbone, ils existent trois différents noyaux possibles. Pour que ce soit du carbone, il faudrait qu'il y ait 6 protons dans le noyau. Le numéro atomique est 6, et il y aura 6 électrons. Mais il peut y avoir 6, 7, ou 8 neutrons selon le cas. Quand il y en a 6, nous avons la forme la plus courante, le carbone 12 (noté ${}^{12}\text{C}$). Les autres formes sont donc le carbone 13 (noté ${}^{13}\text{C}$) et le carbone 14 (noté ${}^{14}\text{C}$). Ce dernier est en fait légèrement instable, ce qui permet aux archéologues de l'utiliser pour la datation.

Arrêtons nous un instant pour poser la question: qu'est-ce que la chimie? Qu'est-ce que fait un chimiste? En fait, il casse et réassemble des molécules. Le chimiste ne casse jamais les noyaux des atomes. Regardez l'exemple dans

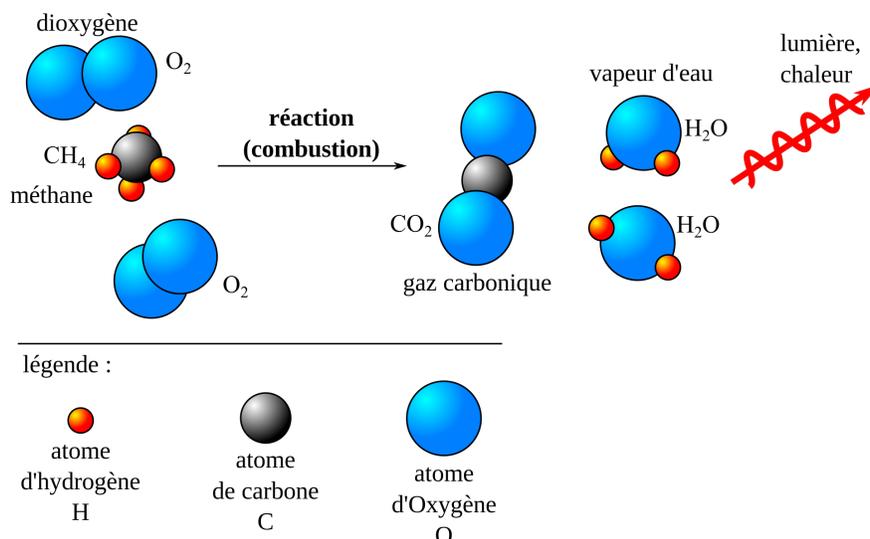


Figure 7: La combustion de méthane dans le dioxygène. Source: fr.wikipedia.org/wiki/Équation_chimique

la Fig. 7. Ici on voit une molécule de méthane CH_4 qui interagit avec deux molécules de dioxygène O_2 . C'est bien ça la combustion: l'interaction d'une substance avec du dioxygène dans l'air. Bien sûr, il faut déclencher cette interaction en apportant un tout petit peu d'énergie, en forme d'une étincelle, par exemple. Mais une fois démarrée, elle va livrer de l'énergie, comme on voit à droite du schéma, en forme de lumière ou de chaleur. La réaction donne aussi d'autres molécules, différentes molécules: une molécule de dioxyde de carbone CO_2 et deux molécules d'eau H_2O .

Qu'est-ce qu'on peut en conclure ici? La première chose, pas directement pertinente pour notre propos, mais intéressant quand même, c'est qu'il n'y a pas de fumée! Ce qu'on voit quand on brûle du méthane, c'est de la vapeur d'eau. Et puis il y a ce gaz surnois, invisible, le gaz carbonique. Mais ce qui est important pour notre question à présent, c'est de compter les différents atomes avant et après la réaction. A gauche, on voit un atome de carbone (la boule noire), et à droite aussi. A gauche, quatre atomes d'hydrogène (les boules rouges), et à droite aussi. A gauche, quatre atomes d'oxygène (les boules bleues), et à droite aussi. Aucun atome n'a été détruit, ni créé. Ils ont simplement été réorganisés pour former d'autres molécules.

Et maintenant on va demander: qu'est-ce que l'alchimie? L'alchimie, c'est transmuter un élément en un autre. C'est donc casser et réassembler des *noyaux* d'atomes. On peut maintenant demander comment il faudrait faire pour transmuter le plomb en or. Parce que maintenant, on sait ce que c'est le plomb,

et on sait ce que c'est l'or. Regardez le contenu de leurs noyaux respectifs:

^{208}Pb	82 protons et 126 neutrons
^{197}Au	79 protons et 118 neutrons

Il faudrait donc enlever 3 protons et 8 neutrons de chaque noyau du plomb. Même si on savait le faire, ça requerrait beaucoup plus d'énergie que de casser et réassembler des molécules. Ceci est dû, bien sûr, à la force forte qui gère ce qui se passe à l'intérieure de ces noyaux. Les alchimistes étaient effectivement des chimistes, et une réaction chimique est une interaction entre éléments *sans changer* les éléments. Les alchimistes n'ont jamais réussi à faire de l'alchimie, et ils n'avaient aucune chance d'y arriver.

Dans un certain sens, le premier alchimiste était le Big Bang, qui a produit de l'hydrogène (H) et de l'hélium (He), et quelques autres petites quantités d'autres éléments. Le Big Bang est notre modèle cosmologique préféré. En effet, une des raisons pour lesquelles nous l'aimons, c'est qu'il prévoit la formation de ces deux éléments dans des proportions qui correspondent très bien à ce qui est observé dans l'univers par les astronomes, c'est-à-dire 75% hydrogène et 25% hélium par masse. La matière est composée principalement de H et He. Tous les autres éléments ne constituent que 1% de la masse de toute la matière visible dans les étoiles et les galaxies.

Mais ça soulève une question: d'où viennent le plomb et l'or? Ou bien le fer, qui est si courant ici sur terre? Pour l'anecdote, lorsque Cortès demanda aux Aztèques d'où venait le fer de leurs poignards, ils lui montrèrent le ciel, et ils avaient raison! Evidemment, ils ne savaient pas vraiment pourquoi, mais vous, vous pouvez déjà deviner d'après ce que nous avons dit ci-dessus. Peut-être qu'ils pensaient à leurs dieux, ou bien ils avaient parfois trouvé des météorites de fer qui tombaient du ciel de temps en temps.

Cependant, en regardant l'univers comme nous le connaissons aujourd'hui, et sachant ce qui est dit ci-dessus dans cette présentation, il est clair qu'il n'y a que des étoiles qui peuvent fournir les conditions nécessaires pour trafiquer des noyaux d'atomes. Parce qu'il faut des températures et pressions très élevées, telles qu'on peut facilement les imaginer au cœur des étoiles. Nous arrivons donc à la deuxième partie de cette présentation: la découverte de l'origine des éléments chimiques. Et évidemment, nous commençons avec une question: qu'est-ce qu'une étoile?

Quand on regarde le ciel la nuit, la plupart des points de lumière que l'on voit sont des étoiles les proches de nous dans notre galaxie. Il y a aussi quelques planètes, satellites artificiels, et parfois des comètes. La lumière diffuse qui apparaît quand il n'y a pas de source de lumière terrestre pour le noyer, qui traverse toute la voûte céleste, et qui est communément appelée la Voie Lactée, est en fait des milliards d'étoiles dans notre galaxie qui sont trop loin pour être distinguées par nos yeux. Il y a cent milliard d'étoiles dans notre galaxie.

On constate assez facilement que les étoiles ont différentes brillances et différentes couleurs. Simplifiant un peu, la clé pour comprendre ces différences est la masse de l'étoile. C'est ce que nous allons voir. La masse du soleil est

énorme, bien entendu, de l'ordre de mille milliard de milliard de milliard de kilos. Les astronomes utilisent le symbole M_{\odot} pour la noter. Et puis quand on veut parler de la masse d'une autre étoile, on ne la donne pas en kilos, mais comme un multiple de la masse du soleil. Deux fois la masse du soleil, ou dix fois, ou la moitié, par exemple. La masse de l'étoile Sirius est donc $2M_{\odot}$.

Les étoiles peuvent avoir des luminosités très différentes. Il est important de comprendre que la luminosité est une quantité absolue associée à l'étoile, à la différence de la brillance, qui dépende aussi de la distance de l'étoile. La luminosité est l'énergie émise par l'étoile en forme de lumière chaque seconde. Autrement dit, c'est la puissance émise. La luminosité du soleil est de l'ordre de cent million de milliard de milliard de watts. Bien plus qu'une ampoule à la maison! Les astronomes utilisent le symbole L_{\odot} pour la noter. Et puis quand on veut parler de la luminosité d'une autre étoile, on ne la donne pas en watts, mais comme un multiple de la luminosité du soleil. Deux fois la luminosité du soleil, ou dix fois, ou la moitié, par exemple. La luminosité de l'étoile Sirius est donc $25L_{\odot}$.

Il se trouve que le soleil est plus lumineux que 90% des étoiles dans notre galaxie. Des 140 étoiles les plus proches, seulement 6 ont $L > L_{\odot}$, alors que 119 ont $L < 0,1L_{\odot}$ (moins d'un dixième de la luminosité du soleil), et 102 ont $L < 0,01L_{\odot}$ (moins d'un centième de la luminosité du soleil). Une étoile avec une masse de moins d'un dixième de la masse du soleil s'appelle une *naine brune*. Quand la masse tombe entre un dixième et la moitié de la masse du soleil, elle s'appelle une *naine rouge*. On ne peut pas les voir à l'œil nu, tellement elles sont peu lumineuses. La première naine rouge a été observée en 1917, avec un télescope, bien sûr, et la première naine brune en 1995! Notez que les naines brunes sont moins lumineuses que les naines rouges parce qu'elles sont moins massives. On verra dans un instant pourquoi les étoiles si peu massives sont si peu lumineuses.

Les étoiles ont donc des masses différentes. Cette masse peut évoluer pendant la vie de l'étoile, mais il y a aussi une masse de départ, avec laquelle l'étoile commence sa vie. Et ça soulève une question: comment se sont-elles formées, les étoiles? Pour y répondre, revenons au Big Bang et la formation des premières étoiles.

Le Big Bang aurait produit à peu près 75% H et 25% He par rapport de masse. Mais cette matière n'était pas distribuée de manière parfaitement uniformément dans l'espace. Imaginez donc un endroit où la densité est un peu plus élevée. Cette petite concentration de matière va attirer d'autre matière aux alentours, par l'attraction gravitationnelle. Sa densité va donc augmenter, et elle va attirer encore plus de matière, et ainsi de suite. On appelle cela l'effondrement gravitationnel. En certain cas, ça peut nettoyer toute une zone autour de la petite concentration de départ.

Il faut penser que la matière tombe sur cet endroit. Elle est accélérée par la force de gravitation. Elle va donc de plus en plus vite et il y aura de plus en plus de collisions. La matière devient agitée, donc chaude! La pression augmente aussi, sous le poids de la matière. Pour le dire autrement, c'est la conversion d'énergie potentielle gravitationnelle en énergie de mouvement, aussi appelée

énergie cinétique, et puis en chaleur. A un moment donné on pourrait atteindre les conditions nécessaires pour que quelque chose se passe qui changera à tout jamais l'avenir de l'étoile. Et c'est quelque chose qui peut arrêter l'effondrement, du moins pendant un certain temps.

Si jamais la température arrive à 10 ou 20 millions de degrés et la densité arrive à 100 g/cm^3 , ce qui est possible seulement si la masse de départ de l'étoile est suffisamment élevée, l'hydrogène commence à être transformé en hélium. Voici la réaction:



C'est très lent, ce qui est une bonne chose pour nous, comme on verra dans un instant, mais ça produit de l'énergie! Regardons un peu cette réaction pour comprendre ce que ça signifie. A gauche, nous avons quatre noyaux d'hydrogène. (On va oublier les électrons pour l'instant. Ils sont toujours dans l'étoile, mais ne tournent plus autour des noyaux, à cause des multiples collisions entre les particules qui y circulent.) Ça veut dire donc quatre protons, puisque le noyau d'hydrogène ne contient qu'un proton. Si on fournit suffisamment d'énergie et suffisamment de pression, deux de ces protons peuvent se convertir en neutrons et on va pouvoir écraser le tout suffisamment près les un des autres pour qu'ils soient collés ensemble par la force forte. Et cette configuration de deux protons et deux neutrons constitue un noyau d'hélium-4, comme on a vu tout à l'heure.

Il faut fournir de l'énergie pour déclencher cette réaction, mais une fois en marche, ça produit de l'énergie. Pourquoi? Il se trouve que la masse de quatre noyaux d'hydrogène (quatre protons) est légèrement plus grande que la masse d'un noyau d'hélium-4, et la différence de masse Δm est convertie en énergie selon la célèbre formule d'Einstein

$$E = \Delta m c^2,$$

où c est la vitesse de la lumière. Ça donne beaucoup d'énergie!

C'est ce qui se passe au cœur de notre étoile en ce moment. C'est la fusion nucléaire, et c'est déjà de l'alchimie, car il s'agit de la transmutation d'un élément en un autre, en particulier d'hydrogène en hélium. On l'appelle aussi la *nucléosynthèse*, c'est à dire la synthèse des noyaux d'éléments chimiques. (En anglais, 'nucleus' veut dire 'noyau', et la physique nucléaire est l'étude des noyaux d'atomes.) On peut dire que 'nucléosynthèse' est le nom moderne pour l'alchimie. Une étoile est effectivement un réacteur nucléaire à confinement gravitationnel, puisque c'est la force gravitationnelle qui retient le tout ensemble.

Le cœur de l'étoile s'échauffe et ça contrebalance l'effondrement. A condition de continuer toujours à produire la réaction nucléaire, notre soleil reste dans une sorte d'équilibre. Et c'est là que nous avons de la chance que cette réaction soit assez lente. Ça fait déjà 4,5 milliard d'années que le soleil brille comme ça, et sa luminosité a juste augmenté un petit peu, de l'ordre de 30%. De plus, il peut continuer à brûler de la même manière pendant encore 4 ou 5 milliard d'années. Par contre, quand tout le H dans le cœur est brûlé, le cœur s'effondrera à

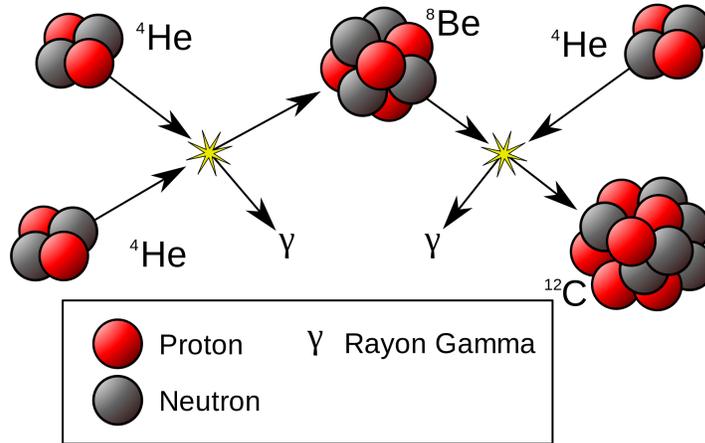


Figure 8: La fusion de He en C et O à une température de cent millions de degrés et une densité de cent mille fois la densité de l'eau. Réaction aussi connue sous le nom de réaction triple alpha, puisque le noyau d'hélium s'appellait autrefois une particule alpha, avant de savoir ce que c'était! Source: fr.wikipedia.org/wiki/Réaction_triple_alpha

nouveau parce qu'il n'y aura plus aucune source de chaleur pour résister à la gravitation.

La première règle de vie de l'évolution stellaire, c'est que l'étoile essaie de se faire la plus petite possible. La gravité est une force implacable, comme le savent tous les petits enfants quand ils apprennent à marcher: elle est toujours là, rien ne peut la bloquer ni l'éteindre, elle les attend au tournant, ces petits, la moindre erreur qu'ils fassent! Et c'est pareil pour l'étoile, quand elle ne peut plus se rebiffer en produisant de la chaleur dans son cœur, la gravité reprend le dessus. L'étoile va se contracter jusqu'à ce que la pression interne suffit pour soutenir tout son poids! Car bien sûr la pression interne, tout comme la température interne, augmente au fur et à mesure que l'étoile se contracte.

Jusqu'ici ce que nous disons pourrait aller pour n'importe quelle étoile de masse suffisante à déclencher cette première réaction nucléaire. Mais c'est très généralement vrai aussi que la vie d'une étoile dépend pour une grande partie de sa masse de départ. Il y a notamment une sorte de masse critique de huit fois la masse du soleil, c'est à dire $8M_{\odot}$. Le parcours de vie d'une étoile de masse moins de $8M_{\odot}$, comme le soleil, sera très différent du parcours de vie d'une étoile de masse plus grande que $8M_{\odot}$. Commençons donc avec les premières, et puis on finira par décrire la vie d'une étoile massive.

Notons d'abord que les étoiles que j'avais appelées naines brunes et naines rouges sont trop peu massives pour atteindre les conditions nécessaires pour briller franchement. Mais pour une étoile comme le soleil ou plus massive, pas

seulement l'hydrogène peut se transmuter en hélium comme nous avons vu ci-dessus, mais le cœur peut arriver à une température de cent millions de degrés et une densité de cent mille g/cm^3 (cent mille fois la densité de l'eau), et dans ces conditions, He peut fusionner en C et O dans le cœur. La fusion de He en C est illustrée dans la Fig. 8. Regardons d'un peu plus près. Le noyau de carbone contient 6 protons, autrement ce n'est pas du carbone. Dans le carbone 12, il y a aussi 6 neutrons. Donc il faut en tout trois noyaux d'hélium-4 pour fabriquer un noyau de carbone, parce que ça fait 3×2 protons et 3×2 neutrons. Il y a deux problèmes:

- Il faut beaucoup de force pour amener autant de protons ensemble dans une si petite espace, et c'est pour cela que la température et pression doivent être si élevées.
- Il faudrait une collision quasi-simultanée de ces trois noyaux d'hélium. Pourquoi? La collision de deux noyaux d'hélium donne un noyau avec 4 protons et 4 neutrons. C'est le béryllium 8. Mais le problème avec le ^8Be est que c'est hautement instable. Ce noyau va se désintégrer spontanément en moyenne après seulement un dixième de millionième de milliardième de second. Donc le troisième noyau d'hélium doit arriver plutôt vite!

La possibilité et les détails de cette réaction posaient donc quelques problèmes aux chercheurs quand ils travaillaient sur ces questions de nucléosynthèse dans les années cinquantes, et c'est Fred Hoyle, un astrophysicien du Yorkshire, travaillant à Cambridge, qui a trouvé la solution (voir la Fig. 9).

Fred Hoyle a aussi étudié la cosmologie, c'est à dire l'étude de l'univers tout entier en tant qu'entité. C'est bien lui qui a donné le nom 'Big Bang' à notre théorie cosmologique préférée, mais surtout pour s'en moquer, car il n'avait jamais vraiment aimé l'idée que l'univers soit si asymétrique dans le temps. Avec deux autres astronomes, Thomas Gold et Hermann Bondi, il avait proposé la théorie de l'état stationnaire, qui voulait que l'univers soit toujours le même à tout moment, malgré le fait qu'il soit en expansion. Pour cela, il fallait que de la matière soit créée en permanence et partout. Vu ses concepteurs, la théorie a été prise au sérieux, mais a fini par être falsifiée par observation. Par exemple, il n'explique pas le fond cosmologique, un rayonnement de fond qui remplit l'univers et qui existe depuis presque toute l'histoire de l'univers à partir du Big Bang.

Pourquoi cette appellation est une moquerie? Parce que ça fait penser à une explosion, et une explosion est quelque chose qui a lieu dans l'espace et le temps. Mais au début de notre univers il n'y avait ni espace ni temps. En effet, l'espace-temps a été créé à cet instant. Comme disait le Saint Augustin, l'univers n'a pas été créé *dans* l'espace et le temps, mais *avec* l'espace et le temps. Et en fait, c'est bien cela que raconte notre théorie cosmologique préférée.

Revenons à notre étoile. J'avais dit que l'hélium pourrait aussi fusionner en oxygène à ce stade, la température et pression étant suffisantes. Regardez à nouveau la Fig. 8. A droite il y a un noyau de carbone 12 avec ses 6 protons et 6 neutrons. Si un autre noyau d'hélium se rajoute, ça donne un noyau avec



Figure 9: Fred Hoyle, l'homme qui a résolu le problème de la production de carbone à partir de l'hélium, et qui est célèbre pour d'autres raisons! Source: www.amazon.com/-/es/dp/B00TO7LMUW

8 protons et 8 neutrons. C'est l'oxygène 16. Et le carbone 12 est très stable, donc il peut attendre l'arrivée de ce quatrième noyau d'hélium.

Qu'est-ce que nous avons maintenant? Après un certain temps, en commençant au milieu et allant vers la surface de l'étoile:

- Un dense cœur de C/O.
- Une couche où C et He fusionnent pour former O.
- Une couche où He se transforme en C.
- Une couche externe où H se transforme en He.

C'est comme un oignon! Pourquoi ces couches? En fait, au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre, la température et la pression diminuent, et donc on retrouve les réactions précédentes.

En même temps, toute l'enveloppe de l'étoile plus loin du centre que cette dernière couche, où la température et pression n'ont jamais été assez élevées pour déclencher une réaction nucléaire, est essuyée par le vent stellaire, c'est à dire un vent de particules haute énergie produit par les réactions nucléaires à l'intérieur, comme des neutrons libres, mais aussi des photons, particules de lumière, et d'autres particules. Cette enveloppe est donc poussée loin de l'étoile. Elle gonfle! Et en même temps la partie externe de l'étoile refroidit, devenant de plus en plus rouge. L'étoile devient une géante rouge.

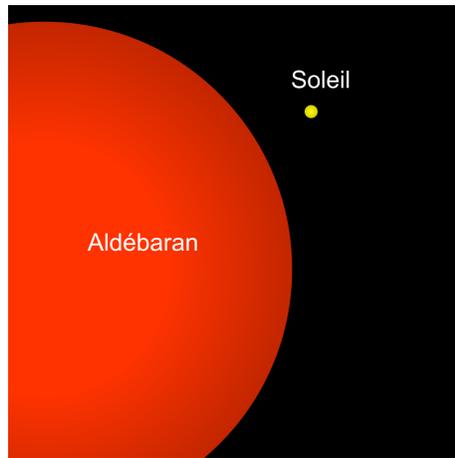


Figure 10: La géante rouge Aldébaran, comparée avec le soleil. Mais un jour, le soleil sera aussi gros! Source: fr.wikipedia.org/wiki/Géante_rouge

La Fig. 10 montre une géante rouge pour comparaison avec la taille du soleil. Mais notre étoile va devenir une géante rouge dans 4 ou 5 milliards d'années. Il va donc gonfler. D'abord il va englober l'orbite de la première planète de notre système solaire, Mercure. Par la suite, il va gonfler jusqu'à l'orbite de la deuxième planète, Vénus. Et puis . . . Mais ne vous inquiétez pas, ce sera dans quelques milliards d'années. L'étoile montrée pour comparaison s'appelle Aldébaran. Elle se trouve dans la constellation du Taureau, non loin d'Orion. Elle est facile à repérer. Elle est assez brillante et un peu rougeâtre.

Les géantes rouges ne vivent pas très longtemps. Dans le cas du soleil, cette étape ne durera que 100 millions d'années. A un moment donné, tout le He sera brûlé. Le cœur sera alors composé principalement de C et O. Le cœur s'effondre encore, sous l'effet de l'implacable gravitation. Quand le rayon atteint 20 000 km, tout juste 3% du rayon du soleil aujourd'hui et à peu près trois fois le rayon de la Terre, la *pression quantique* arrête l'effondrement, expliquée superficiellement dans un instant.

Mais d'abord, je voulais juste dire que c'est ici qu'il y a une différence avec la vie des étoiles massives ($> 8M_{\odot}$). Nous verrons cela plus bas, mais l'effondrement d'une étoile massive est plus rapide et atteint des températures et pressions suffisantes pour déclencher d'autres réactions nucléaires. Pour les autres étoiles, telles que le soleil, avec des masses moins de $8M_{\odot}$, il n'y aura plus de fusion nucléaire directe.

Qu'est-ce que la pression quantique? J'avais dit tout à l'heure que les électrons ne tournent plus autour de leurs noyaux d'origine, étant donné les conditions de haute température et pression. Mais ils sont toujours présents dans le cœur de l'étoile. Ils se déplacent comme ils peuvent entre les noyaux. Et ces particules sont sujet à la *loi d'exclusion* de Wolfgang Pauli, un physicien autrichien

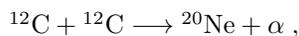
qui a beaucoup contribué au développement de la théorie quantique. Ce principe dit que deux de telles particules n'ont pas le droit d'entrer dans le même état quantique. Effectivement, dans la situation présente, où l'effondrement tend à les comprimer de plus en plus ensemble, il arrive un moment où les électrons sont obligés à se rebiffer. C'est bien l'origine de cette pression quantique qui s'oppose à l'effondrement. Et le cœur de l'étoile dans cet état de dégénérescence quantique est en effet une *naine blanche*.

Entretiens, toute l'enveloppe aura été poussée loin de la naine blanche, ce cœur de carbone et oxygène. Le résultat est une nébuleuse, comme les deux exemples montrés dans la Fig. 11. Ces nébuleuses jouent un rôle crucial dans l'enrichissement de notre univers. L'hydrogène primordial est transformé en éléments plus lourds et ces nouveaux éléments sont expulsés dans le milieu inter-stellaire. Qui plus est, le vent stellaire bombarde toute cette matière de neutrons, et les noyaux dans l'enveloppe peuvent capturer ces neutrons pour former des noyaux plus lourds. Encore une source d'autres éléments. Je reviendrai sur ce point plus loin.

Avant de quitter ces étoiles comme le notre, je dois vous dire que petit à petit la naine blanche rayonne toute son énergie et fane. Il n'y a plus aucune source d'énergie à l'intérieure. Tous ce qu'elle peut faire est de se refroidir, lentement mais sûrement.

Et maintenant, les étoiles massives. Que se passe-t-il quand la masse initiale d'une étoile dépasse $8M_{\odot}$? Les choses se passent comme avant mais beaucoup plus vite! C'est facile à comprendre. Il y a plus de matière à tomber et plus de matière pour l'attirer, et donc avec une force gravitationnelle plus grande. En conséquence il y a plus d'accélération dans la chute! Pour le dire autrement, c'est la conversion d'énergie potentielle gravitationnelle en énergie de mouvement, ou énergie cinétique, et puis en chaleur. Et il y a beaucoup plus d'énergie gravitationnelle maintenant. Pour une étoile qui commence à $20M_{\odot}$, l'hydrogène dans le cœur est transformé en hélium en seulement dix millions d'années. Comparez avec dix milliards d'années pour le soleil! L'hélium dans le cœur se transforme en carbone et oxygène en seulement un million d'années. Comparez avec 100 millions d'années pour le soleil!

On finit par avoir un cœur de C/O, entouré d'une couche où $\text{He} \rightarrow \text{C}$, entourée d'une couche où $\text{H} \rightarrow \text{He}$. C'est exactement comme avant. Le cœur continue à s'effondrer. Mais une étoile massive brûle à si haute température qu'elle atteint les conditions de fusion de carbone avant que le cœur ne devienne dégénéré. En effet, quand on arrive à six cent millions de degrés, d'autres réactions de fusion nucléaire peuvent avoir lieu. Les voici:



où α est une abréviation pour le noyau de l'hélium-4. Dans la première, deux noyaux de carbone fusionnent pour donner un noyau de néon. C'est le gaz fluorescent utilisé pour l'éclairage! C'est déjà pas mal comme alchimie! On prend du charbon et on produit un gaz fluorescent! Dans la deuxième réaction, deux

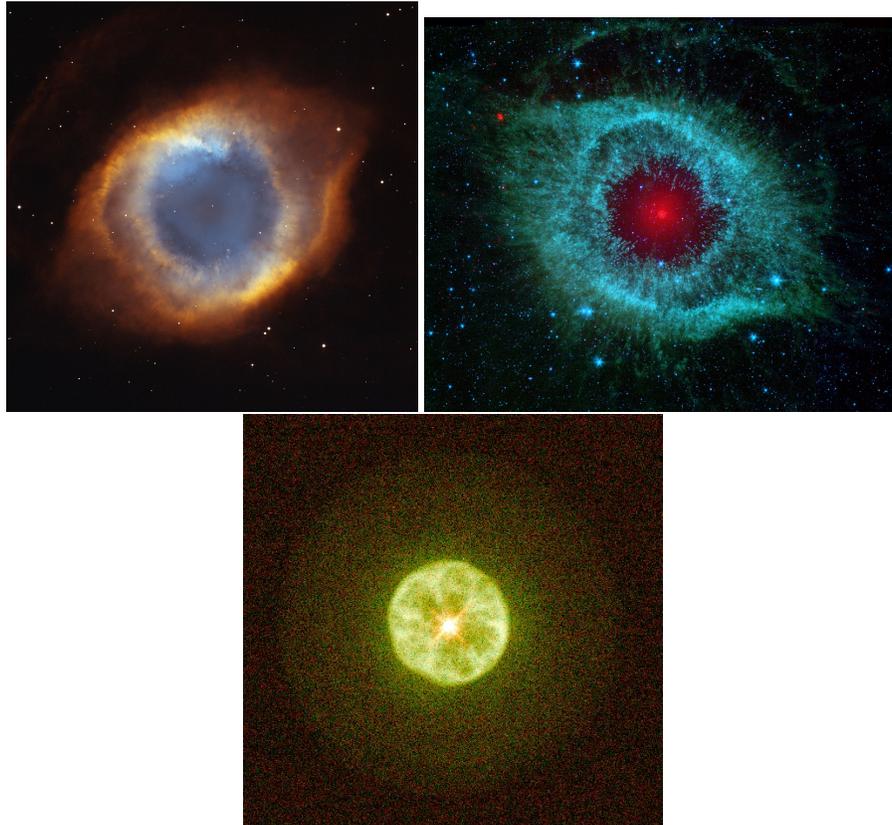


Figure 11: *En haut*: Deux vues de NGC 7293, la nébuleuse de l'Hélice, une nébuleuse dite planétaire située dans la constellation du Verseau. Notez que le mot 'planétaire' n'a rien à faire ici, c'est encore un vestige de l'époque où on ne savait pas ce que c'était, ce genre d'objet. Surnommé l'œil de Dieu! A gauche, vue mixant des images du télescope spatial Hubble et de l'observatoire de Kitt Peak. A droite, image capturée en infrarouge par le télescope spatial Spitzer. Source: fr.wikipedia.org/wiki/Nébuleuse_planétaire. *En bas*: Surnommée la nébuleuse de la tranche de citron, IC 3568 est une nébuleuse planétaire dans la constellation de la Girafe. Source: fr.wikipedia.org/wiki/IC.3568. Dans les deux cas, la naine blanche sera un minuscule point de lumière au centre

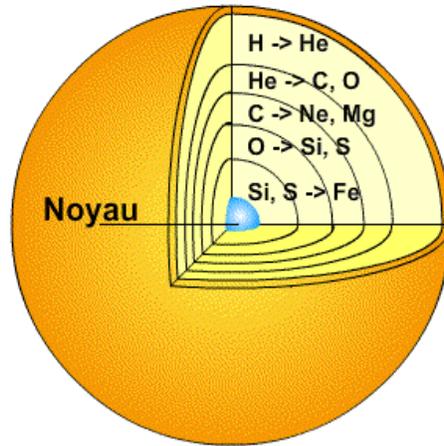
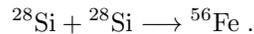


Figure 12: Une étoile massive au moment où le cœur a été complètement transformé en fer. Source: media4.obspm.fr/public/ressources.lu/pages_vie-mort/bb-massives.html

noyaux de oxygène fusionnent pour donner un noyau de silicium, l'ingrédient principal du sable. Donc c'est comme si on avait pris l'air que nous respirons pour fabriquer du sable!

La première réaction est déjà terminée après seulement 300 ans. C'est à dire qu'il n'y aura plus de carbone dans le cœur du cœur. Et la deuxième? Après tout juste 200 jours, plus d'oxygène dans le cœur du cœur. L'évolution s'accélère et le rendement énergétique diminue. Ce dernier, c'est parce qu'en effet les produits des réactions sont de plus en plus stables. Et l'effondrement se poursuit avec d'autres réactions nucléaires pour arriver enfin au noyau le plus stable! C'est le fer ^{56}Fe , avec 26 protons et 30 neutrons dans son noyau. A mille milliards de degrés et un million de fois la densité de l'eau, on peut voir la réaction



Ce dernier processus ne dure que deux jours!

Qu'est-ce que nous avons maintenant dans notre étoile? Eh bien, elle est devenue un peu comme un oignon (voir la Fig. 12). Au centre, le noyau central du cœur est composé de fer. Autour, il y a une couche dans laquelle le silicium est toujours en train de se transmuter en fer. Plus loin, où il fait un peu moins chaud et la pression est un peu moindre, il y a une couche dans laquelle l'oxygène est toujours en train de se transmuter en silicium. Et ainsi de suite. Notez que d'autres réactions sont indiquées que nous n'avons pas mentionnées.

Ce qu'il faut noter aussi, c'est que la fusion directe ne peut pas aller plus loin, malgré l'existence de dizaines d'éléments au-delà du Fe dans le tableau périodique. C'est parce que cela prendrait de l'énergie sans pouvoir en rendre, dû au fait que le fer est plus stable que tous les éléments plus loins. Le cœur de Fe



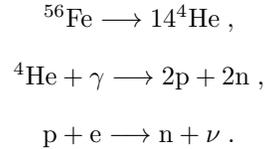
Figure 13: Subrahmanyan Chandrasekhar (1910–1995) était un astrophysicien et un mathématicien d’origine indienne. Il a été lauréat du prix Nobel de physique de 1983. Source: www.sciencesetavenir.fr/espace/univers/un-doodle-en-hommage-au-physicien-subrahmanyan-chandrasekhar_117526

s’effondre très rapidement et une partie croissante atteint l’état dégénéré, c’est à dire maintenue par la pression quantique. Encore des électrons qui refusent de se laisser écrasés à cause du principe d’exclusion de Pauli (voir ci-dessus). Pourquoi une partie croissante? C’est parce qu’il y a ces couches autour dans lesquelles les réactions de fusion se poursuivent, produisant toujours plus de fer.

Et c’est ici qu’arrive Subrahmanyan Chandrasekhar dans un bateau de l’Inde (voir la Fig. 13), en route pour étudier à Cambridge. Une de ses premières réussites a été de calculer la masse maximale d’un cœur de fer dans l’état dégénéré. J’ai lu quelque part qu’il avait même fait ce calcul dans le bateau! Bon, à l’époque on avait le temps! Il n’était pas le premier à avoir fait ce calcul, mais il l’avait fait plus soigneusement, en prenant en compte plus de facteurs, et il a trouvé la valeur de 1,44 fois la masse du soleil. Et bien sûr il a utilisé beaucoup de connaissances déjà accumulées par d’autres. La science est toujours un travail collectif, même si on se rappelle seulement de certains noms!

Revenons donc à notre étoile. Quand la partie dégénérée atteint une masse égale à 1,44 fois la masse du soleil—c’est la limite de Chandrasekhar—il se met à s’effondrer encore plus vite. Dans une fraction de second, il s’effondre de la taille de la planète Mars pour devenir un sphère de diamètre 10 km. Les noyaux de Fe sont instantanément détruits. Le résultat? Une étoile à neutrons de masse $1,44M_{\odot}$. En effet, ce sphère ne contient que des neutrons, suite à un processus quasi-instantané de photodésintégration induite par rayons gamma de

haute énergie:



Peu importe les détails ici, c'est juste pour donner une idée du cataclysme que c'est! Dans la dernière réaction, les protons et les électrons se combinent pour produire des neutrons et des neutrinos (ν), toutes petites particules, presque sans masse. Les neutrinos, c'est aussi une autre histoire! Ce nouvel objet est *très* dense! On aime dire qu'une cuillerée pèserait un milliard de tonnes. On ne mettrait pas ça dans son thé!

Et pourquoi cette boule de neutrons ne continue pas à s'effondrer? Pourquoi son effondrement est stoppé nette? C'est encore cet effet quantique, un état dégénéré, mais cette fois ce sont les neutrons et non pas les électrons qui sont récalcitrants! Parce qu'il n'y a que des neutrons, et les neutrons comme les électrons sont sujet au principe d'exclusion de Pauli.³

Et maintenant, n'oublions pas le reste de l'étoile qui est laissé suspendu dans le vide, pour ainsi dire. Naturellement, le reste de l'étoile tombe, en chute libre, et quand il arrive sur l'étoile à neutrons qui vient de se former à l'intérieure, il est facile d'imaginer les conséquences, car cet objet est très dense, donc dur comme le fer! Sauf qu'il n'y a plus de fer! Et en fait, il est beaucoup plus dur que le fer! Il est dur comme une étoile à neutrons. Toute la matière qui arrive dessus va rebondir à très grande vitesse. C'est la supernova!

La Fig. 14 montre ce qui s'ensuit. C'est l'exemple de la nébuleuse du Crabe, appelée aussi SN 1054, à une distance de 6523 années-lumière. C'est à dire que ce que nous voyons dans cette image date déjà de 6523 années. Mais la supernova concernée a été observée par les astronomes chinois en 1054. Donc ce que nous voyons est bien le résultat de la supernova après à peu près mille ans! On voit que toute la matière de l'étoile—c'est à dire toutes les couches de réactions nucléaires et toute l'enveloppe de l'étoile dans laquelle il n'y a jamais eu de réaction nucléaire—a été soufflée loin de la toute petite étoile à neutrons, ici trop petite pour être discernée.

Comme dans le cas des nébuleuses dites planétaires, ce qui se passe ici joue un rôle crucial dans l'enrichissement de notre univers. L'hydrogène primordial a été transformé en éléments plus lourds et ces nouveaux éléments ont été expulsés dans le milieu interstellaire. Qui plus est, dans ce cas, le flux de particules haute énergie produit par la supernova bombarde toute cette matière de grand nombre de neutrons libres, et les noyaux dans l'enveloppe peuvent capturer ces neutrons pour former noyaux plus lourds, comme j'avais indiqué plus haut. On appelle cela la *capture neutronique* et c'est encore une source d'autres éléments.

Entretemps, tout le fer a été détruit! Alors, comment ça se fait qu'il y a du fer dans l'univers? On pense aujourd'hui que, pour la plupart, le fer est fabriqué

³Si le cœur de fer est trop massif, même la pression quantique des neutrons ne suffira pas pour stopper l'effondrement et le résultat sera un trou noir.

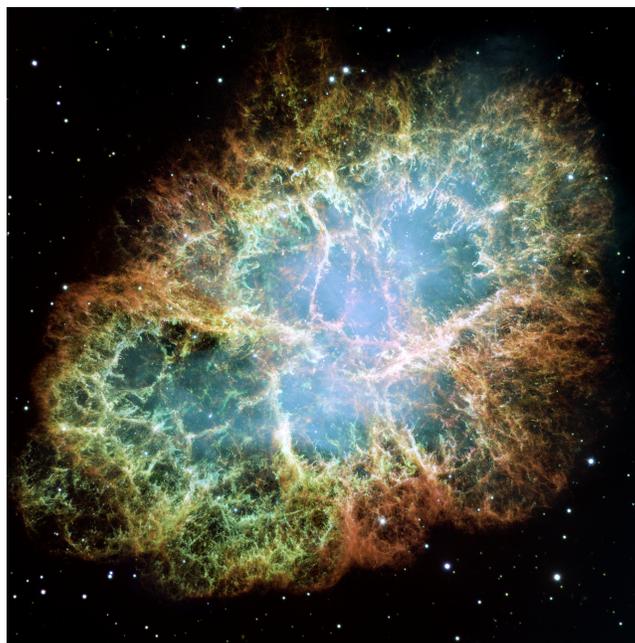


Figure 14: La nébuleuse du Crabe. Source: en.wikipedia.org/wiki/Crab_Nebula

dans un autre type de supernova, mais c'est une autre histoire. La fusion directe produit C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti, Cr, et Fe, et ces éléments constituent presque toute la masse de la Terre (> 96%). Mais on trouve aussi des éléments plus lourds sur terre et ailleurs dans l'univers. L'hypothèse privilégié aujourd'hui est bien la capture neutronique. C'est de la recherche en cours. Dans son livre *Généalogie de la matière*, l'astrophysicien français Michel Cassé dit qu'on peut fabriquer un noyau d'or à partir d'un noyau de fer, en le bombardant de 141 neutrons, et sans pause, parce que même une hésitation d'un dix millième de seconde entre les arrivées des neutrons serait suffisante pour que les noyaux intermédiaires si instables se cassent en morceaux.

On pourrait s'étonner de cette recette, qui semble si peu probable. Mais en même temps, l'or est rare! Sur la terre, il y a 4 g d'or pour chaque 1000 tonnes de roche! Par contre on vient de découvrir une situation où il y a neutrons en abondance, et de plus, on peut observer la production d'or en live! En 2017 et encore en 2019, nos détecteurs d'ondes gravitationnelles ont observé deux collisions d'étoiles à neutrons.⁴ Et maintenant vous savez ce que c'est une étoile à neutrons—effectivement une boule de neutrons. Après une telle collision, il y aura des neutrons libres partout, conditions parfaites pour produire des éléments lourds comme l'or, ou bien le platine. En effet, quand nous regardons le site

⁴www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-nouvelle-collision-etoiles-neutrons-productrice-or-ete-observee-33381/

repéré d'une de ces collisions avec les télescopes 'normaux' qui détecte les ondes électromagnétiques (la lumière!), nous voyons bien 'l'empreinte digitale' de l'or et du platine (résultat du travail de chercheurs comme Bunsen et Kirchhoff, mentionnés plus haut, qui ont inventé la spectroscopie).⁵

Notez que j'ai beaucoup simplifié la discussion de la nucléosynthèse stellaire dans l'idée de donner un point de vue global, même si je pense qu'il y a suffisamment de détail pour comprendre les grandes lignes. De plus, c'est toujours un domaine de recherche très actif et ils restent énormément d'autres détails à établir pour corroborer la théorie. Néanmoins, cette grande découverte est maintenant claire: les éléments chimiques ont été créés dans le Big Bang ou bien synthétisés plus tard dans les étoiles. Et désormais vous savez ce que les alchimistes n'ont jamais su: comment produire de l'or en abondance. Bien sûr, il faut avoir deux étoiles à neutrons sous la main . . . ce qui aurait peut-être dissuadé les alchimistes les plus ardents!

N'hésitez pas à me contacter sur stephen.lyle@trinity.cantab.net si vous avez commentaires ou questions.

⁵Un excellent lien qui parle des lieux de synthèse des éléments et la manière dont ils sont produits est en.wikipedia.org/wiki/S-process, bien qu'il focalise surtout sur la capture neutronique lente, appelée le processus s (et c'est en anglais).