



L'épopée du nickel

ROLAND LEHOUCQ • ROBERT MOCHKOVITCH

*Les tribulations d'un atome de nickel
à travers l'espace et le temps :
de l'étoile à la pièce de un franc.*

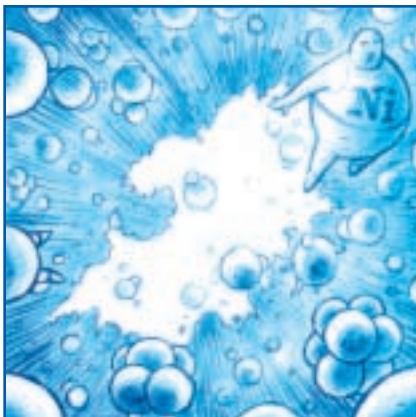
Le héros de cette aventure est un atome de nickel. Remonté des profondeurs de la Terre à la faveur de grands mouvements tectoniques, il était déjà présent il y a 4,5 milliards d'années dans la nébuleuse dont est issu le Système solaire. Bien avant, il a longtemps dérivé dans notre Galaxie, initialement mû par la formidable impulsion communiquée lors de l'explosion d'une supernova. Finalement, comme tous les autres éléments, c'est dans les étoiles que le nickel a été créé.

Quelques minutes après le Big Bang, il y a 15 milliards d'années.

Il fait effroyablement chaud, si chaud que les briques élémentaires des noyaux atomiques, protons et neutrons, ne peuvent s'assembler. Cependant, l'expansion de l'Univers refroidit la soupe cosmique. Pendant environ trois minutes, de petites constructions à deux protons et deux neutrons apparaissent. Ce sont des noyaux d'hélium. À mesure du refroidissement, les réactions nucléaires entre protons et neutrons deviennent impossibles. Aucun noyau plus lourd ne peut se former. L'Univers n'est alors composé que d'hydrogène (un proton) et d'hélium. Il est vide de nickel, mais aussi de tous les autres éléments.

Formation de notre Galaxie, il y a 13 milliards d'années.

Dans notre Galaxie, formée à partir d'un gigantesque nuage d'hydrogène et d'hélium, les premières étoiles s'allument.



Bruno Vacaro

1. Supernova.

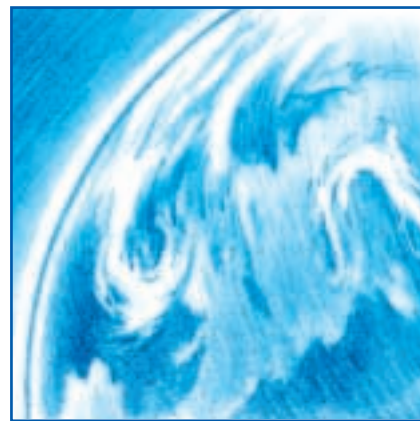
Leur propre gravité engendre en leur centre des températures capables de faire fusionner les éléments primordiaux, hydrogène et hélium. Ces réactions nucléaires produisent des éléments plus lourds et l'énergie qui fera briller les étoiles légères plusieurs milliards d'années durant. La genèse des éléments, qui s'était arrêtée trois minutes après le Big Bang, reprend dans le cœur des étoiles. L'hélium est synthétisé à partir de quatre noyaux d'hydrogène. La fusion crée également de nouveaux noyaux plus lourds, comme le carbone, l'azote et l'oxygène. Les étoiles les plus massives vivront moins longtemps que les plus légères et finiront leur vie en une gigantesque explosion : une supernova.



2. Formation du Système solaire.

Quelque part dans la Galaxie, il y a dix milliards d'années.

Une étoile quinze fois plus massive que le Soleil termine son évolution. Lors des étapes de fusion thermonucléaire, qui produisent de l'énergie, tous les éléments plus légers que le fer ont été créés. Le cœur de l'étoile est en fer, le plus stable des éléments : la fusion ou la fission du fer requiert de l'énergie et les réactions nucléaires s'arrêtent. Incapable de fusionner plus avant, le cœur de fer se contracte. La contraction chauffe le cœur qui atteint une température telle que l'énergie des photons environnants est suffisante pour briser les noyaux de fer en éléments

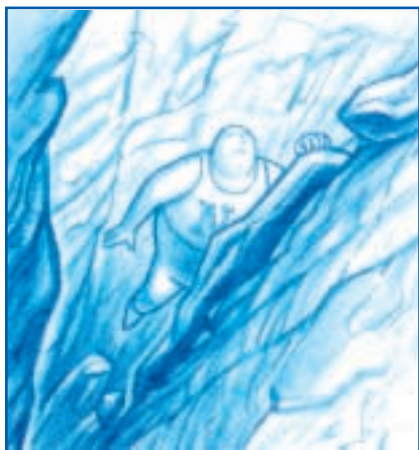


3. Le nickel est dans le manteau terrestre...

plus légers, ce qui coûte de l'énergie. Cette déperdition d'énergie précipite la contraction. Au sein des noyaux légers, les protons capturent des électrons et se transforment en neutrons. Ces réactions s'accompagnent d'une importante émission de neutrinos lesquels emportent plus de 99 pour cent de l'énergie gravitationnelle disponible.

Cette formidable hémorragie d'énergie précipite l'implosion gravitationnelle du cœur. En quelques dizaines de millisecondes, le cœur stellaire devient un gigantesque amas de neutrons, prémices d'une étoile à neutrons. Le reste de l'étoile en effondrement s'écrase sur la surface rigide de neutrons. La compression violente qui en résulte inverse le mouvement de chute : une onde de choc se propage de l'intérieur de l'étoile et la fait exploser.

Cet instant marque la mort d'une étoile massive sous la forme d'une supernova. Une partie des noyaux synthétisés par l'étoile au cours de sa vie sont éjectés dans l'espace, enrichissant le milieu interstellaire en éléments nouveaux. L'onde de choc chauffe tant l'enveloppe de l'étoile (plusieurs milliards de degrés) que de nouvelles réactions thermonucléaires se déclenchent. C'est ainsi que naquit le nickel, synthétisé uniquement lors de ces épisodes dramatiques de nucléosynthèse explosive. Le nickel créé est ensuite emporté avec les gaz éjectés par l'explosion.



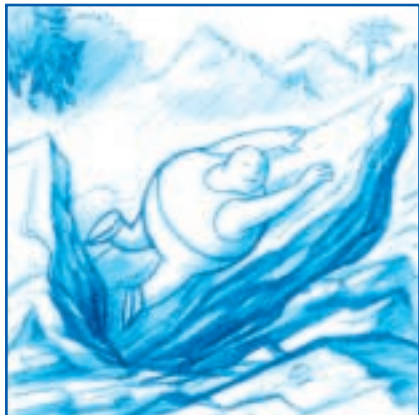
4. ... Il remonte vers la surface.

À mesure de l'expansion, les gaz éjectés se refroidissent. Le nickel se fixe, sous forme d'oxydes, sur des grains de poussières condensés. Ces poussières dérivent longtemps dans la Galaxie. Perdues entre les étoiles, leur température descend jusqu'à une trentaine de kelvins (-243 degrés Celsius environ).

Système solaire, il y a 4,5 milliards d'années

Sous l'effet de sa propre gravité, un nuage de gaz et de poussières interstellaires se condense et s'effondre sur lui-même. Presque toute la matière s'accumule au centre : l'embryon du Soleil est né. La contraction chauffe les régions centrales jusqu'à ce que les réactions nucléaires s'y déclenchent. La contraction est alors stoppée puisque l'énergie dégagée par les réactions de fusion compense l'énergie rayonnée. Tout autour du Soleil, le reste de gaz et de poussières s'organise, sous l'effet de sa rotation, en un disque plat.

Le nickel est là, fixé sur les poussières. En quelques centaines de millions d'années, le disque se refroidit et les grains des matériaux les plus réfractaires se condensent. En s'agglutinant, ils forment des corps de

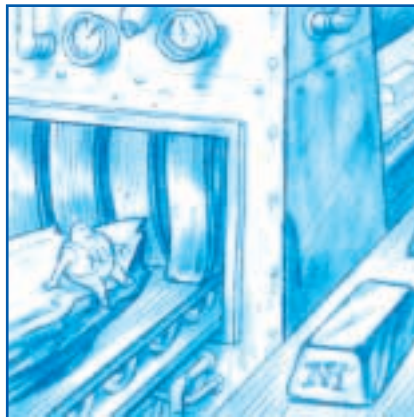


5. Nouvelle Calédonie.

plus en plus gros, qui donnent naissance aux planètes.

Planète Terre, il y a 3,8 milliards d'années

La Terre termine sa formation en capturant des milliers de corps de taille diverses qui tombent à sa surface. Dans le même temps, les éléments chimiques les plus lourds, dont le nickel, s'enfoncent lentement sous la surface. En quelques centaines de millions d'années, l'essentiel du nickel est concentré au cœur de la Terre. Il en reste un peu dans le manteau externe, mais quasiment plus dans la croûte terrestre.



6. Transformation en lingot.

Terre, il y a 40 millions d'années

La superposition de deux plaques tectoniques engendre la remontée en surface de matériaux du manteau terrestre. Dans certaines régions, telle la Nouvelle-Calédonie, de gigantesques poches de péridotites, riches en fer et en magnésium mais contenant assez peu de nickel, affluent.

Sous l'action du climat tropical humide, les minéraux sont attaqués. Comme le nickel est moins soluble que le magnésium, il reste dans les minéraux, tandis que le magnésium est dissous. Cet enrichissement relatif aboutit à des minéraux argileux qui contiennent jusqu'à vingt pour cent de nickel. Ce mécanisme a donné naissance au gisement exploité aujourd'hui en Nouvelle-Calédonie.

Montagnes de Saxe, il y a 300 ans

Des mineurs saxons, déçus de ne rien pouvoir tirer d'un minerai rougeâtre qu'ils viennent d'extraire le baptisent «Kupfer-nickel», le cuivre du Diable. Le nickel métal est isolé de ce minerai (la pentlandite) en 1751 par le chimiste suédois Axel Cronstedt. Il est obtenu sous une forme plus pure en 1804 et ses propriétés physiques sont alors déterminées.

Nouvelle-Calédonie, il y a 136 ans.

En 1863, en Nouvelle-Calédonie, l'ingénieur français Jules Garnier découvre des minéraux d'une belle couleur tur-

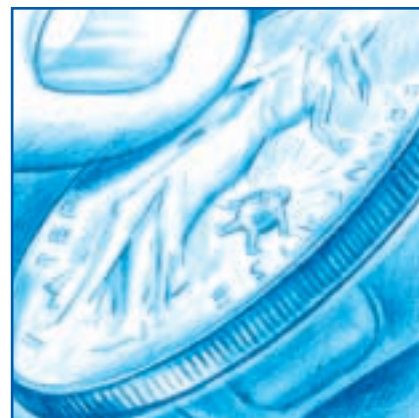
quoise, que l'on nomma garniérite. La garniérite peut être constituée de différents minéraux argileux contenant du nickel, tel le talc. Quinze ans plus tard, il fonde, avec l'anglais John Higinson, la *Société le nickel* pour exploiter ce gisement.

Mine de Nouvelle-Calédonie, il y a 3 ans

Une pelleteuse prélève par tonnes le minerai du sol. Celui-ci rejoint Doniambo, dans la rade de Nouméa, où il subit une première transformation en mattes qui contiennent 75 pour cent de sulfure de nickel et 25 pour cent de nickel pur. Embarquées sur un cargo, les mattes partent pour Le Havre où elles sont raffinées.

Pessac, il y a 2 ans

Le nickel pur à 99 pour cent arrive à l'usine de Pessac, en Gironde, en provenance de la raffinerie du Havre. Fondu, laminé, découpé puis enfin frappé il devient pièce de un franc au rythme de 250 pièces par minute.



7. Pièce de un franc.

Votre poche, maintenant

La pièce de un franc, faite de nickel pur, s'use peu. Elle a longtemps voyagé, de main en main, de poche en poche pour finalement se retrouver dans la vôtre. Sur près de deux milliards de pièces de un franc frappées depuis l'avènement du nouveau franc, cinq cent millions de pièces seulement seraient en circulation, le reste étant perdu ou oublié au fond d'un tiroir...

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **Robert MOCHKOVITCH** est astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris.

J. AUDOUZE et **J.-P. CHIÈZE**, *Enquête sur l'Univers*, Nathan, 1990.

Ph. SCHAFF et **L. CHEVALIER**, *L'or vert*, Éditions de La Martinière, 1996.



Graphes et chorégraphes

IAN STEWART

Construire des polyèdres avec de la ficelle.

Le jeu de la ficelle intéresse les amateurs de jeux mathématiques, parce qu'il conduit à de remarquables figures géométriques : on passe autour des poignets une boucle de ficelle qu'on manipule ensuite avec les poignets, les doigts ou les dents, afin de reproduire un motif ; parfois on raconte une histoire dont les épisodes sont illustrés par les motifs de la ficelle.

Une théorie mathématique de ces figures est-elle possible ? Plusieurs formalisations des figures réalisées ont été proposées, mais des chorégraphes américains ont fait mieux : ils ont trouvé une relation inattendue entre figures de ficelle, mathématiques et... danse.

Les arts ont souvent recours, implicitement ou explicitement, aux mathématiques : la perspective, en peinture, n'est autre que de la géométrie, tout comme la réalisation de pavages ; la sculpture a

fait usage de rapports entre nombres ; les gammes musicales résultent de divisions astucieuses des intervalles sonores, et les sonneries de cloches font usage des mathématiques combinatoires. Toutefois, à ma connaissance, les mathématiques n'avaient été appliquées à la danse que par mon collègue Christopher Budd, de l'Université de Bath, pour analyser les danses folkloriques anglaises.

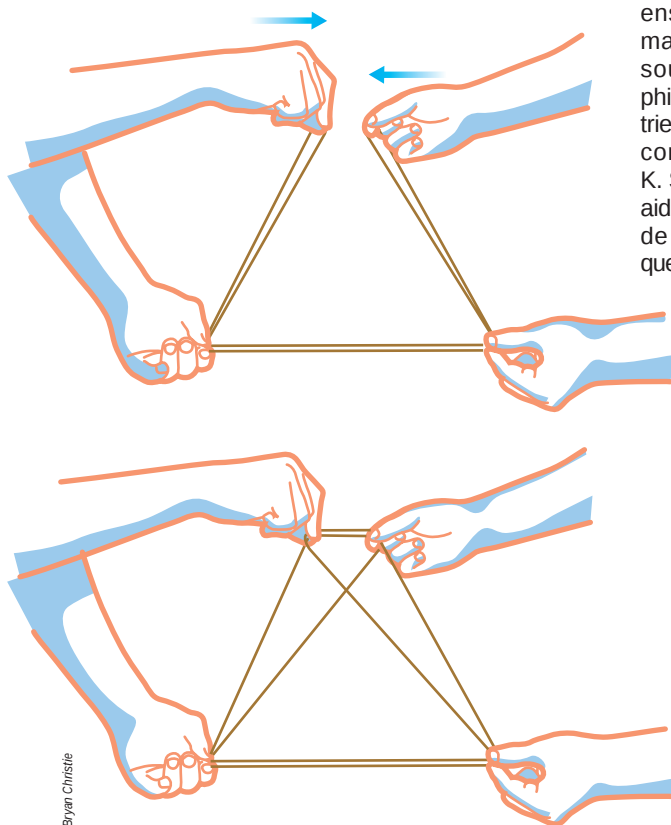
Karl Schaffer, cofondateur d'un ensemble chorégraphique de Santa Cruz, utilise les mathématiques pour créer des danses. Plusieurs de ses spectacles sont fondés sur l'utilisation de boucles de ficelle, avec lesquelles il organise la construction des polyèdres réguliers et d'autres figures mathématiques.

Avec son ami Scott Kim, il s'est initialement intéressé aux figures de ficelle polyédriques, alors qu'ils concevaient un spectacle nommé *Dans la boucle*, à la quête du carré parfait. Cet ensemble de cinq « danses mathématiques » présente, sous une forme chorégraphique, des idées de géométrie et de symétrie. Lors de la conception du spectacle, K. Schaffer et S. Kim se firent aider d'un amateur des figures de ficelle qui leur enseigna quelques danses traditionnelles

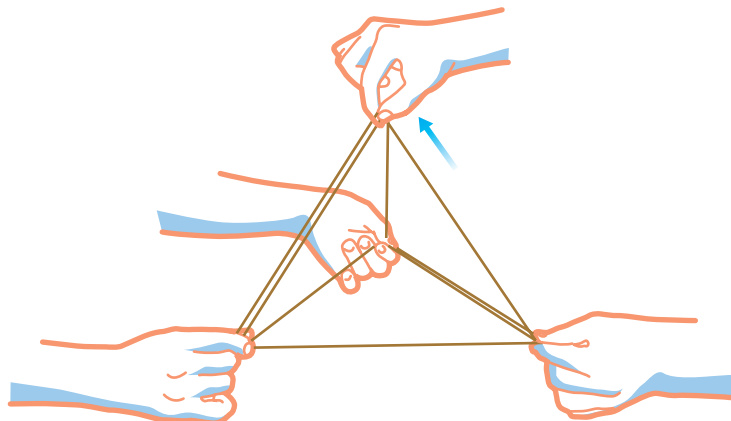
avec figures de ficelle pour deux danseurs. Puis K. Schaffer et S. Kim inventèrent de nouvelles danses fondées sur des structures à trois dimensions, tels les polyèdres.

La figure 1 montre comment deux danseurs peuvent réaliser un tétraèdre, à partir d'une seule boucle de ficelle. Le danseur 1, à gauche, et le danseur 2, à droite, tiennent initialement chacun la boucle en un point, de la main droite, de sorte que leurs mains droites soient reliées par deux brins parallèles. De la main gauche, ils prennent alors les deux brins à une vingtaine de centimètres de la main droite. Simultanément le danseur 1 avance la main droite vers le danseur 2, en la remontant, et le danseur 2 fait un mouvement symétrique. Puis les deux danseurs rassemblent leurs mains droites jusqu'à ce qu'elles se touchent. Chacun utilise alors sa main droite pour prendre un brin de la partie tenue par l'autre danseur, tout en conservant un brin. Le danseur 1 fait alors glisser sa main selon le double brin qu'il tient, prenant la position de la troisième image, et le danseur 2 lève la main droite. Ils obtiennent ainsi un tétraèdre régulier, avec deux arêtes composées de deux brins de ficelle.

De même, six danseurs tenant six boucles de ficelle ou de caoutchouc peuvent former le cubo-octaèdre, un polyèdre semi-régulier à six faces carrées et



Byron Christie



1. La construction à quatre mains d'un tétraèdre de ficelle.