

La planète Krypton

*« J'avais ainsi appris une seconde chose très importante :
c'est que sa planète d'origine était à peine plus grande qu'une maison ! »*
Le petit Prince, Antoine de Saint Exupéry (1943)

Pour commencer, intéressons-nous aux origines de Superman, et plus particulièrement à sa planète de naissance. Il s'agit d'un problème d'importance car, d'après les textes, c'est dans la différence de gravité entre Krypton et la Terre que réside la source des pouvoirs de l'Homme d'Acier. Quelles sont les caractéristiques de Krypton ? Sa taille ? Sa masse ? En chiffrant les performances physiques de notre héros, les auteurs nous livrent des indices précieux. On l'a vu, les capacités du Superman des origines étaient plutôt « modestes » : ses bonds atteignaient plus de 200 mètres (un huitième de mile précisent les textes) et ses sauts lui permettaient de passer par-dessus des immeubles de 20 étages (soit environ 60 mètres de hauteur). Un soupçon de physique va nous permettre de résoudre notre énigme. Voyons comment.

Reculer pour mieux sauter

La hauteur ou la longueur d'un saut dépend de deux facteurs. Le premier, celui qui tombe sous le sens, est l'impulsion initiale. Il s'agit là de la force avec laquelle l'athlète, prenant appui sur le sol,

se projette pour sauter : on comprend aisément que plus cette force est grande, plus le saut sera haut ou long. C'est ainsi que les athlètes subissent de longues préparations physiques visant à muscler leurs cuisses pour améliorer leurs performances. Le second paramètre est nettement moins évident, car son omniprésence nous le fait facilement oublier. Il s'agit de la force de gravité qui nous retient à la surface de la Terre. Il faut bien reconnaître que l'on n'a pas tous les jours l'occasion de changer de planète. Pourtant, souvenons-nous des bonds que faisaient les cosmonautes sur la Lune, alors qu'ils portaient un scaphandre si énorme (plus de 100 kilogrammes !) que leur mobilité terrestre s'en trouvait très réduite. C'est que la gravité de la Lune, c'est-à-dire la force avec laquelle la Lune attire les masses, est 6 fois moins importante que celle de la Terre. Du coup, tout paraît clair ! Un cosmonaute, dont la masse avec scaphandre est de l'ordre de 180 kilogrammes, est retenu à la surface de la Lune avec une force équivalente à celle subie, sur la Terre, par une masse de seulement 30 kilogrammes. Il lui est aisé de faire des bonds de cabri ! La performance, hauteur ou longueur du saut, est en pratique inversement proportionnelle à l'intensité de la pesanteur. Toutes choses égales par ailleurs, un saut sera donc d'autant plus long que l'intensité de la pesanteur est faible. Autrement dit, un sauteur franchissant 2 mètres en hauteur sur la Terre, franchira, sans scaphandre bien sûr, 12 mètres de hauteur sur la Lune ! Je vous laisse imaginer les performances d'un sauteur à la perche...

On aura compris où je veux en venir. Supposons que, sur Krypton, Superman ait eu des performances proches de celles d'un athlète humain sur la Terre. Ses capacités physiques lui permettaient donc de franchir environ 7 mètres en longueur et 2 mètres en hauteur. Ses performances terrestres seront nettement plus impressionnantes, d'un facteur égal au rapport entre la gravité kryptonienne et la gravité terrestre. Comme une distance de 200 mètres est environ égale à 30 fois 7 mètres et qu'une hauteur de 60 mètres est égale à 30 fois 2 mètres, la conclusion s'impose : l'intensité de la

pesanteur à la surface de **Krypton** est à peu près 30 fois supérieure à celle de la Terre. Cette valeur est extrêmement élevée, puisqu'elle excède celle qui règne à la surface du Soleil, égale à 28 fois celle de la Terre. Un être humain transporté sur **Krypton** aurait l'impression de peser comme un rhinocéros sur la Terre. Ces chiffres sont à comparer à l'accélération qui, au décollage d'une fusée, écrase les cosmonautes dans leur siège avec une force équivalente à 10 fois la gravité terrestre. Un organisme humain entraîné ne peut supporter une telle contrainte que pendant quelques secondes... Cette première information sur la planète **Krypton** va nous servir de point d'attaque pour en savoir un peu plus.

Une planète peu ordinaire

Au XVII^e siècle, Isaac Newton a découvert que deux corps massifs s'attirent avec une force proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Cette loi universelle de la gravitation régit le mouvement des planètes et explique pourquoi la Terre nous retient à sa surface. En effet, notre sensation de pesanteur est la conséquence de la force gravitationnelle que la Terre exerce sur notre corps. Si la Terre était plus massive, cette sensation serait plus forte. Plus précisément, la gravité à la surface de la Terre est fixée par le rapport entre sa masse et le carré de son rayon, en vertu de la fameuse loi de Newton. Sur la Lune, dont la masse est 81 fois inférieure à celle de la Terre et le rayon 3,67 fois plus petit, la gravité est bien $81/3,67^2 = 6$ fois moins grande. En réalité, masse et rayon de la planète sont liés. Si l'on suppose que la matière de la planète est répartie uniformément dans tout son volume (ce qui n'est pas rigoureusement vrai pour la Terre), sa masse, égale au produit de sa densité par son volume, est proportionnelle au cube de son rayon. Du coup, la gravité de surface varie proportionnellement au rayon de la planète. En supposant que **Krypton** ait une densité comparable à celle de la Terre, alors son rayon doit être environ 30 fois supérieur à celui de la Terre, à peu

près égal à 3 fois celui de Jupiter. **Krypton** se voit donc dotée d'une masse considérable, égale à un douzième de la masse du Soleil.

Les caractéristiques de **Krypton** sont extrêmes au regard de celles de la Terre. Une telle planète est-elle envisageable ? Finalement, qu'est-ce qu'une planète ? Chacun s'accordera pour dire qu'une planète est une sphère de matière en orbite autour d'une étoile. Si cette définition est juste, elle n'en est pas pour autant satisfaisante. Après tout, les étoiles sont tout autant sphériques que les planètes. Quant aux astéroïdes, en forme de patates, ils sont eux aussi en orbite autour du Soleil.

Partons du principe que la spécificité d'une planète, le trait qui lui réserve une place particulière dans notre imaginaire, est la possibilité qu'elle puisse abriter des êtres vivants. Cette caractéristique exclut d'emblée les planètes mortes, comme Mars ou Vénus (bien qu'en ce qui concerne Mars, la possibilité d'une vie très ancienne est encore l'objet de recherches actives), et les planètes géantes, comme Jupiter et Saturne. Elle va pourtant nous permettre d'échafauder un raisonnement astucieux dû au physicien Jean-Marc Lévy-Leblond. Ainsi, répondre à la question « Qu'est-ce qu'une planète ? », revient à se demander « Qu'est-ce que la vie ? », une planète devant alors, par définition, un système autonome capable d'abriter la vie. Cette seconde question apparaît bien plus vaste que la première. Nous ne tenterons pas d'y répondre ici mais, plus modestement, intéressons-nous aux conditions propices au développement de la vie telle que nous la connaissons sur la Terre.

Pour survivre, un être vivant doit pouvoir échanger de la matière avec son environnement, à la fois sous forme solide et liquide (pour son alimentation, sa croissance ou sa reproduction par exemple), mais aussi sous forme gazeuse (notamment pour sa respiration). On notera que le point de vue adopté ici est plutôt conservateur, puisqu'il ne prend pas en compte la possible existence de formes de vie exotiques rencontrées dans certains ouvrages de science-fiction, tels que les cristaux conscients (voir *Cristal qui*

songe de Théodore Sturgeon) ou les nuages interstellaires pensants (voir *Le Nuage noir* de l'astrophysicien Fred Hoyle). Pourtant, comme nous allons le voir, cette simple exigence exerce sur notre hypothétique planète une contrainte sévère qui ira jusqu'à déterminer l'ordre de grandeur de sa taille et de sa masse.

Matière à cohésion

En premier lieu, réfléchissons à ce qui fait la cohésion de la matière d'une planète, à la raison physique qui l'empêche de s'éparpiller bêtement dans l'espace. Une planète exerce un champ de gravitation qui attire chaque particule de matière vers toutes les autres, avec une force d'autant plus grande que la distance entre elles est faible. La matière a d'autres voies d'interaction. Tout d'abord, la force électrostatique, qui se manifeste entre particules chargées et qui lie les électrons au sein des atomes. Restent encore deux interactions fondamentales : les forces nucléaires forte et faible. Comme leur nom l'indique, elles règnent sur le noyau de l'atome mais ont une portée réduite – de l'ordre de la taille du noyau, soit environ un millionième de milliardième de mètre (10^{-15} mètre) – qui les disqualifie pour jouer un rôle à l'échelle d'une planète. Aussi, finalement, il est possible d'affirmer que la structure d'une planète est le résultat du jeu entre la force de gravitation et la force électrostatique. Le point important du raisonnement réside dans une simple remarque : si on part du principe qu'il est essentiel que les formes de vie puissent échanger de la matière avec la planète qui les abrite, pour s'alimenter par exemple, alors la cohésion de la matière planétaire est principalement assurée par la force électrostatique. Courage ! Une aspirine et hop ! Entrons dans les détails...

Atomes crochus

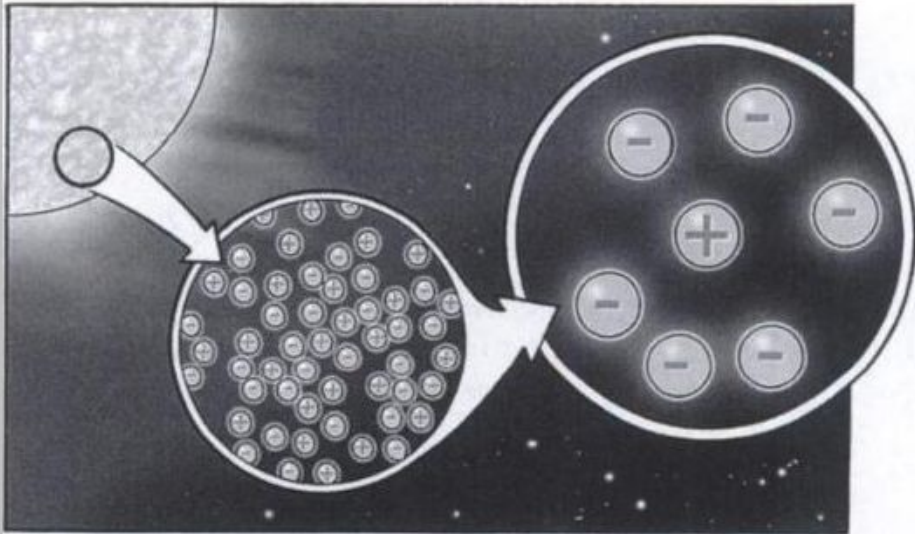
Pour extraire un morceau d'un bloc de matière, il faut dépenser une énergie supérieure à celle qui le liait à ce bloc. Dans le cas d'une seule liaison électrostatique, cette énergie est de l'ordre de

quelques électronvolts, unité d'énergie commode à l'échelle des atomes et des molécules. Par définition, c'est l'énergie acquise par un électron accéléré sous une différence de potentiel d'un volt. Dans une télévision, les électrons du faisceau qui frappe l'écran ont une énergie de quelques milliers d'électronvolts. En comparaison, les particules qui circulent dans les accélérateurs modernes, comme celui du CERN, à Genève, atteignent des énergies supérieures à mille milliards d'électronvolts.

Dans le cas de la force électrostatique, le coût énergétique de la rupture d'un morceau de matière ne dépend que des liaisons atomiques ou moléculaires rompues le long de la surface de rupture, et non pas du volume du bloc auquel on l'arrache. Autrement dit, on dépense à peu près la même énergie pour creuser le flanc d'une colline que pour creuser le flanc d'une montagne, pour boire dans une flaque que pour boire dans un lac.

La force électrostatique possède cette propriété particulière, dite de saturation, selon laquelle l'énergie de liaison électrostatique d'un système varie en proportion du nombre des particules qui le composent. L'énergie de liaison par particule est ainsi indépendante de la taille du système, toujours de l'ordre de quelques électronvolts par liaison, ce qui explique qu'il soit aussi facile d'extraire une particule du système que d'en extraire mille ou un million. Comme la matière est globalement neutre (le nombre de charges positives est égal au nombre de charges négatives), cette propriété résulte essentiellement du jeu des subtiles compensations entre les attractions électrostatiques (qui se produisent entre charges de signe opposé, comme un proton et un électron) et les répulsions électrostatiques (qui se produisent entre charges de même signe, comme deux électrons). Les particules ayant des charges de signe opposé se répartissent donc à peu près uniformément, toute accumulation de charges d'un signe qui ne serait pas compensée par d'autres charges du signe opposé conduisant à une répulsion locale. Ainsi, une particule de charge positive attire à elle des particules de charge négative.

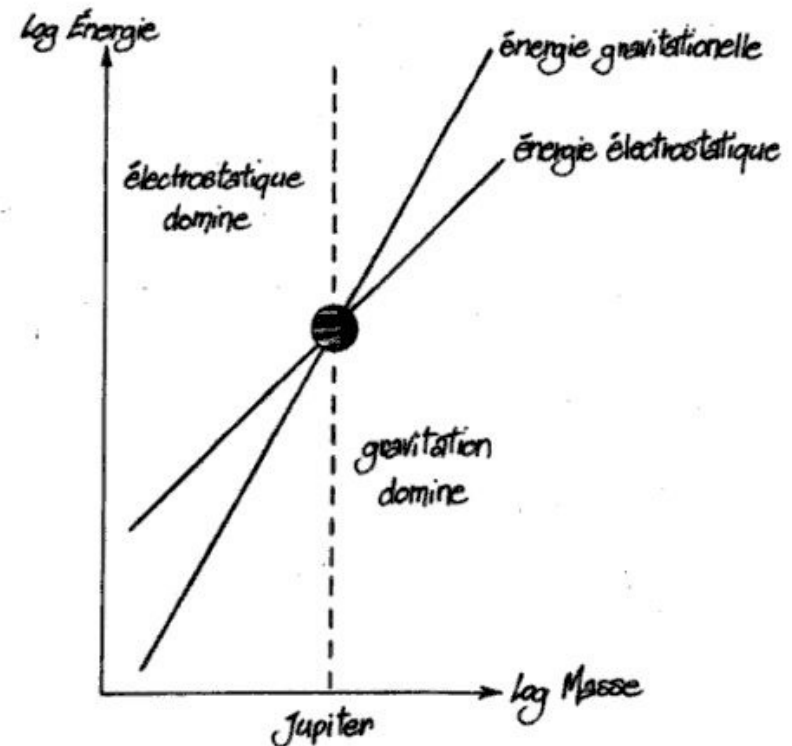
tive qui en retour la masquent ; il en va de même pour une particule de charge négative. Cette attirance entre charges de signe opposé donne naissance à un effet d'écran mutuel qui transforme la force électrostatique, dont la portée théorique est infinie, en une force saturée dont la portée pratique est beaucoup plus courte, de l'ordre de quelques diamètres atomiques (voir la figure 1). Tout se passe donc comme si chaque atome n'interagissait qu'avec ses plus proches voisins. L'énergie de liaison totale d'un système se réduit à la somme des énergies de liaison de chaque atome avec ses voisins immédiats puisqu'il est aveugle à ceux qui sont plus lointains : il est heureusement facile du point de vue énergétique de couper du bois pour faire une cabane, de cueillir des fruits pour les manger et de puiser de l'eau pour la boire...



1. La matière qui constitue le **Soleil** (dénommée plasma) apparaît neutre à grande échelle : il y a autant de particules de charge positive que de particules de charge négative. À l'échelle des particules, une charge positive attire à elle des charges négatives qui, en retour, la masquent. Ce phénomène d'écrantage est à l'origine de la saturation de la force électrostatique dont la portée effective est finie.

Gravité sans légèreté

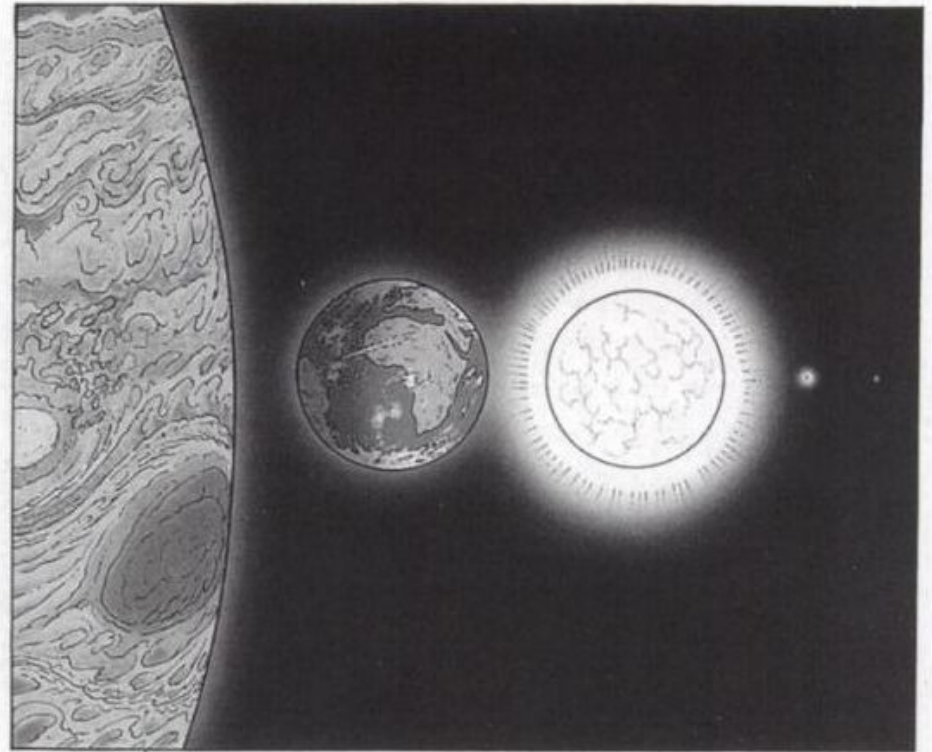
Il en va tout autrement de la force de gravitation. D'abord, elle est beaucoup plus faible que la force électrostatique exercée par une charge électrique sur une autre. À titre d'exemple, la force de gravitation entre un proton et un électron dans un atome d'hydrogène est 10^{36} (un milliard de milliards de milliards de milliards) fois plus faible que la force électrostatique qui les lie. Elle est aussi beaucoup plus têtue car elle est universellement attractive dans la mesure où toutes les masses sont positives : contrairement aux charges électriques, il n'existe



2. L'énergie totale d'un corps macroscopique est la somme de son énergie de liaison gravitationnelle et de son énergie de liaison électrostatique. Pour des corps de taille ordinaire, la première est nettement plus faible que la seconde mais elle augmente plus vite avec la masse. Ainsi les petits corps peuvent adopter une forme quelconque alors que les plus gros sont quasiment sphériques car dominés par la gravitation. Ce changement de comportement a lieu, en ordre de grandeur, pour une masse voisine de celle de Jupiter.

pas de « masses négatives ». Aucune compensation ne peut donc jouer, et l'énergie de liaison gravitationnelle d'un système de particules est égale à la somme des énergies de tous les couples de particules. Ces couples sont en quantité considérable, de l'ordre du carré du nombre de particules. D'autre part, l'énergie gravitationnelle entre deux particules est proportionnelle à l'inverse de la distance qui les sépare (toujours la fameuse loi de Newton). Pour deux particules prises au hasard, cette distance est, en moyenne, du même ordre de grandeur que le rayon de la planète. On montre alors que l'énergie de liaison gravitationnelle d'une planète varie comme la puissance $5/3$ du nombre des particules qui la constituent. Cet exposant $5/3$ indique que la force de gravitation, contrairement à la force électromagnétique, n'est pas saturée, auquel cas l'exposant serait égal à 1 (voir la figure 2). L'énergie de liaison par particule (obtenue en divisant l'énergie de liaison de la planète par le nombre de particules qui la constituent) croît ainsi comme la puissance $2/3$ du nombre de particules, relation que l'on pourrait résumer ainsi : « Il est plus facile de réduire en poussière un petit corps céleste qu'un gros. » Cette dépendance explique pourquoi les systèmes « froids » (c'est-à-dire dépourvus de source interne d'énergie – les étoiles sont donc exclues), où la gravitation domine la force électrostatique, sont d'autant plus compacts qu'ils sont lourds. Jupiter, étoile ratée, est plus grande qu'une naine blanche, reste d'étoile en refroidissement ; une naine blanche est plus grande qu'une étoile à neutrons, cadavre stellaire, elle-même plus grande qu'un trou noir (voir la figure 3). Les systèmes dominés par la gravitation ont un intérêt énergétique majeur à rester liés et ne se laissent pas mettre en pièces facilement : il ne serait guère facile de creuser un trou à la surface d'une étoile à neutrons...

La conclusion de cette discussion est qu'une planète ne permettra à sa matière de s'organiser en structures séparées complexes et mobiles, échangeant des atomes sans une dépense d'énergie prohibitive, que si sa cohésion est essentiellement d'origine électromagnétique, la force de gravitation ne jouant qu'un rôle secondaire. La



3. Un corps froid (c'est-à-dire dont on peut négliger toute source interne d'énergie) et dominé par la gravitation est d'autant plus petit qu'il est massif. Jupiter est plus grosse qu'une naine blanche, elle-même plus grosse qu'un trou noir. La Terre n'est représentée que pour indiquer l'échelle.

comparaison des deux énergies de liaison mises en jeu permet d'affirmer qu'une planète ne peut pas être trop grosse, que son nombre d'atomes doit rester inférieur à un nombre critique à peu près égal à la puissance $3/2$ du rapport entre l'intensité de la force électromagnétique et de la force de gravitation dans un atome. Cela revient à affirmer qu'aucune planète, telle que nous l'avons définie, ne peut compter plus de 10^{54} atomes. Au-delà, la gravitation domine définitivement l'électromagnétisme.

Le lecteur avisé aura remarqué que dans le raisonnement qui précède, quelques « petits » détails ont été écartés, à commencer par la rotation planétaire. Celle-ci peut avoir un effet bénéfique,

puisque la force centrifuge diminue la gravité ressentie en surface. Quand elle est assez rapide, la rotation planétaire permet d'imaginer des planètes sensiblement plus massives qu'évoqué plus haut. Alors, la planète n'est plus parfaitement sphérique mais aplatie aux pôles sous l'effet de la rotation – la force centrifuge étant maximale à l'équateur et nulle aux pôles. C'est la solution qu'adopte l'écrivain de science-fiction américain Hal Clement dans son roman *Mission gravité*. Il y décrit le sauvetage d'une sonde d'exploration échouée sur une planète dont la gravité polaire est 700 fois plus grande que celle de la Terre, et dont la rotation est si rapide (un tour en 85 minutes !) que la gravité à l'équateur n'est « que » de trois gravités terrestres. Il s'agit là d'un cas extrême, taillé sur mesure pour une histoire très particulière.

Atmosphère planétaire

Peut-on fixer une taille minimale à une planète ? Gardons à l'esprit que notre postulat de départ exige que les êtres vivants de la planète en question puissent échanger des gaz avec son atmosphère. Pour cela, il faut d'abord qu'elle existe, cette atmosphère ! Voilà une condition qui semble aller de soit. Elle n'est pourtant pas si facile à remplir car un gaz occupe tout le volume mis à sa disposition, et dans le cas d'une planète, ce volume représente la zone d'espace située au-dessus de sa surface, c'est-à-dire l'Univers tout entier ! Pour que des molécules gazeuses restent confinées au voisinage de la surface planétaire, il faut que le champ de gravité soit suffisamment intense pour les retenir. Autrement dit, la vitesse de libération de la planète, celle que doit dépasser un projectile pour échapper à son attraction gravitationnelle, doit être supérieure à la vitesse moyenne des molécules atmosphériques. Or, celle-ci est déterminée par la température de l'atmosphère. Bilan : pour retenir une atmosphère, il vaut mieux un corps qui soit gros et froid plutôt que léger et chaud. Voyez ce qui est arrivé à Mercure et Mars... Cela n'est pas suffisant : pour pouvoir s'échapper, une particule doit avoir un libre parcours moyen (la

distance qui sépare deux chocs successifs) supérieur à l'épaisseur atmosphérique qui la surplombe. D'autres mécanismes limitent encore l'échappement de molécules, par exemple le piégeage par un éventuel champ magnétique. On remarquera aussi que certains petits corps célestes, tels Io, satellite de Jupiter, et Titan, satellite de Saturne, ont une atmosphère. Dans ces cas précis, l'atmosphère est alimentée en continu par dégazage des roches soumises à la force de marée colossale de la planète géante autour de laquelle ils orbitent. Pour simplifier le raisonnement, oublions ces raffinements particuliers.

Nos constatations permettent ainsi d'affirmer que, pour mériter le nom de planète, un corps céleste doit pouvoir retenir des molécules gazeuses au voisinage immédiat de sa surface pendant un temps suffisamment long, ce qui lui impose d'être assez massif. Traduit en équation, cela conduit à écrire une deuxième relation, exacte réciproque de la précédente : le nombre d'atomes d'une planète doit être assez grand, supérieur au nombre critique précédemment évoqué, soit environ 10^{54} atomes.

L'heure du bilan

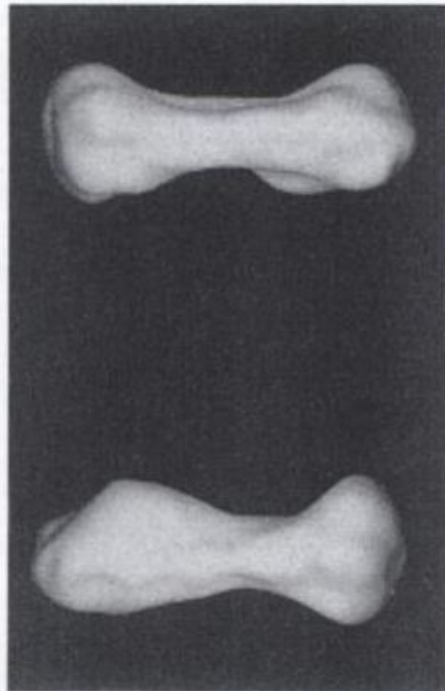
Notre petite étude peut, à la manière de l'histoire de Boucle d'Or, se résumer comme suit : une planète susceptible d'abriter des êtres vivants ne doit être ni trop petite, ni trop grosse, mais juste de la bonne taille. Trop lourde, sa forte gravité rend prohibitif le coût énergétique des échanges de matière. Trop légère, elle est incapable de retenir une atmosphère durablement. En pratique, il faut que son énergie potentielle gravitationnelle soit comparable à son énergie de liaison électrostatique. Finalement, pour que la vie telle que nous la connaissons puisse s'y développer, une planète doit avoir un nombre d'atomes voisin de 10^{54} . Cet ordre de grandeur est tout à fait raisonnable puisqu'il correspond à une grosse planète, dont la masse est comprise entre celle de la Terre et celle de Jupiter.

Un truc pour savoir si la planète a la bonne taille : trop grosse, elle a une atmosphère dense, énorme, et évoque une géante gazeuse

du type Jupiter ou Saturne ; trop petite, elle a de bonnes chances de ne pas être sphérique et de ressembler à un caillou. Dans ce dernier cas, la gravité est si faible que des excroissances de taille comparable à celle du corps céleste sont possibles : les montagnes sont très hautes par rapport à la planète ! Les astéroïdes sont souvent en forme de gros caillou, la palme revenant à Kleopatra, qui adopte la forme d'un os dont les dimensions sont de 217 kilomètres de long pour 94 kilomètres de large (voir la figure 4).

La planète Krypton peut-elle exister ?

Grâce à sa gravité de surface, nous avons déjà obtenu une approximation raisonnable du rayon de Krypton, trois fois celui de Jupiter, et de sa masse, un douzième de celle du Soleil, bien supérieure à celle de Jupiter. Avec une telle masse, la cohésion de l'astre est essentiellement due à la force gravitationnelle : Krypton ne ressemble pas du tout à la Terre mais plutôt à un type d'étoile nommée



4. L'astéroïde Kleopatra dont la forme diffère sensiblement d'une sphère !

naine brune : trop lourde pour être planète et trop légère pour briller vivement comme le Soleil. Remarquons enfin, sans trop nous attarder, que la gravité d'une planète fixe de nombreuses caractéristiques des conditions qui règnent à sa surface. Ainsi, la hauteur des montagnes est limitée, car la résistance des roches du socle doit supporter le poids de celles qui les surplombent. Une montagne trop haute s'effondrerait sous son propre poids ! La structure atmosphérique est, elle aussi, fortement dépendante de la gravité planétaire : plus la gravité est forte, plus le gaz atmosphérique est comprimé et dense. Ainsi, la pression qui règne à la surface de Krypton est certainement bien supérieure à celle de la Terre et on s'étonne de voir Superman respirer notre air sans dispositif approprié. Enfin, la gravité comprime et chauffe le matériau interne. Cela est source de chaleur qui diffuse vers la surface. On peut ainsi imaginer que la surface de Krypton a une température plutôt élevée selon nos standards terrestres. Krypton est une planète paradoxale et son ambiance climatique semble peu propice au développement de la vie, c'est le moins qu'on puisse dire. Comme quoi, la vérité est bien ailleurs...

Roland Lehoucq,
D'où viennent les pouvoirs de Superman ?
Chapitre 1 : La Planète Krypton, pp. 13-26,
EDP Sciences, 2003.

