

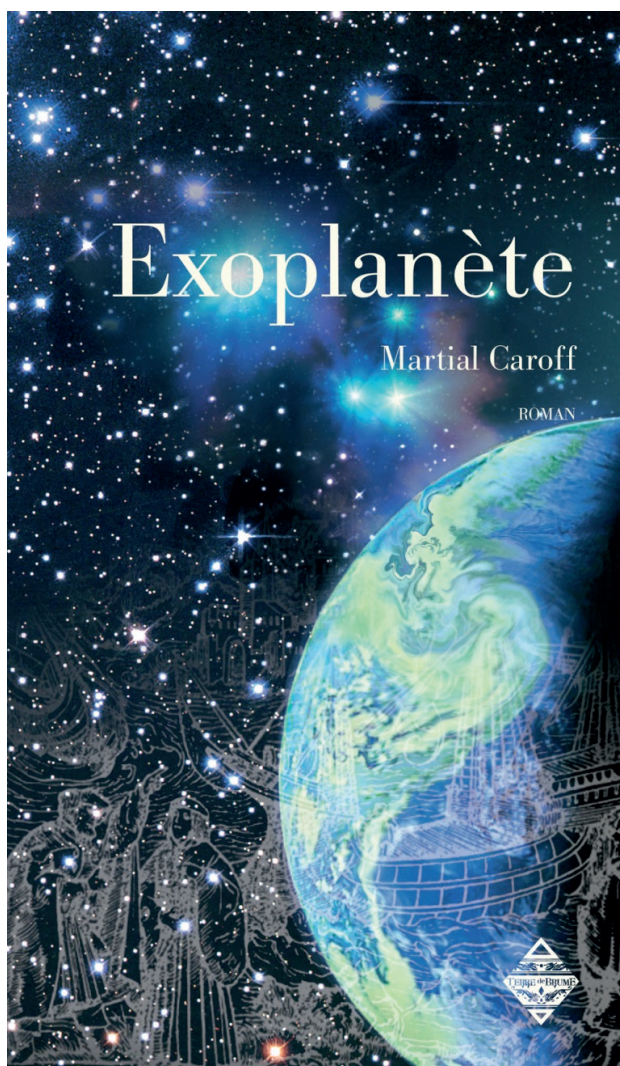
AVEC NOS ÉLÈVES

Lecture critique d'un roman de SF

Exoplanète, de Martial Caroff

Frédéric Pitout, IRAP-Toulouse, Marion Cointepas et Léa Thibout, lycée Toulouse-Lautrec

Faire de la science en lisant un roman de science-fiction, c'est le pari que nous avons fait lors d'activités sur les exoplanètes menées avec Marion et Léa dans le cadre d'un atelier scientifique et technique.



12 janvier 2030, une nouvelle «étoile» fait son apparition dans la constellation d'Orion, puis disparaît avant de réapparaître quelques jours plus tard. Étoile ? En fait non, c'est un peu plus compliqué que ça mais c'est le point de départ du roman *Exoplanète* de Martial Caroff (éd. Terre de Brume, 2009).

Ce roman relate donc l'apparition d'un phénomène astronomique inhabituel et la subséquente décou-

verte d'une exoplanète nommée ExoTerra. Cette exoplanète est observée avec l'«hypertélescope», télescope spatial hors-norme dont la puissance ferait rêver bien des astronomes ! Le roman rend bien compte de l'excitation qui peut régner au sein d'une équipe de recherche lors d'une découverte ; il présente aussi de nombreuses notions physiques et astronomiques qui peuvent être sujettes à questionnements.

Avec Marion et Léa, alors élèves en terminale S au Lycée Toulouse-Lautrec de Toulouse, nous avons lu *Exoplanète* d'un œil critique afin de vérifier la cohérence de ces notions ; une excellente occasion de mettre en application des points du programme de physique et d'aborder d'autres concepts.

Supernova SN1006

L'apparition de l'«étoile» est comparée à des supernovæ observées par le passé. Il est question de la supernova – bien réelle – de l'an 1006 (SN1006) qui aurait été visible en plein jour et qui aurait été si lumineuse que sa lumière formait la nuit des ombres sur Terre (p. 60). Qu'en est-il exactement ?

Dans la littérature, il est fait état d'une magnitude apparente de $-7,5$ pour SN1006, ce qui en ferait l'étoile la plus brillante jamais observée de la Terre (à part le Soleil, bien entendu !). Cela équivaudrait à l'éclairement d'un quartier de Lune. En revanche, cette supernova se trouvait dans la constellation du Loup qui n'est visible en Europe que l'été en milieu de nuit et bas sur l'horizon, donc totalement invisible de jour. En revanche, plus au sud, il est tout à fait envisageable qu'elle fût visible en plein jour. On rappelle que pour voir un objet céleste de jour, il faut que sa magnitude apparente soit de -4 ou moins (par exemple, avec sa magnitude minimale de $-4,6$ Vénus peut être vue en plein jour).

Quant aux ombres, un quartier de Lune en projet, donc on peut imaginer que SN1006, de même éclairement, en formait aussi.

Étoile et système planétaire

Au fil des pages (notamment p. 189-205), l'auteur nous donne quelques caractéristiques du système planétaire auquel appartient ExoTerra. On apprend ainsi qu'il est distant de 389 années-lumière ($3,68 \times 10^{18}$ m) de la Terre et qu'en son centre brille une naine rouge : « l'étoile apporte peu de lumière à ce monde [...] », « son rayonnement rouge, éternellement crépusculaire, peine à percer l'obscurité du vide » (p. 189).

Une naine rouge est une petite étoile dont la masse est au plus 40 % de celle du Soleil (nous vérifierons ce point par la suite) et dont la luminosité ne dépasse pas quelques pourcents de celle du Soleil. Comme son nom l'indique, elle émet son maximum d'intensité lumineuse dans le rouge car sa température de surface, autour de 3 500 K, est relativement basse (cf. la loi de Wien). Dans le diagramme de Hertzsprung-Russell (diagramme HR), qui rend compte du type des étoiles ou de leur stade d'évolution, on trouve les naines rouges (étoile de classe M) parmi les étoiles froides et peu lumineuses, en bas à droite donc (figure 1).

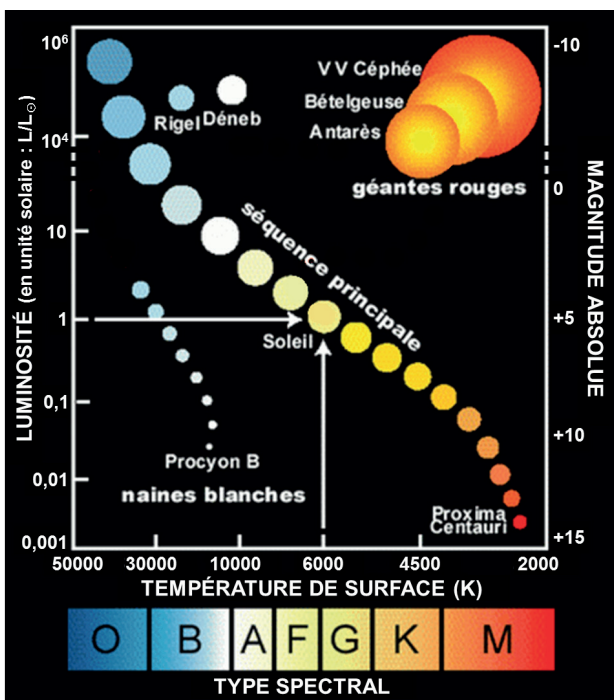


Fig.1. Diagramme HR montrant les différents types d'étoiles (ou stades d'évolution stellaire) en fonction de leur température de surface et de leur luminosité. (Adapté de <http://www.astrorennes.com>).

Le système planétaire comprend 8 planètes internes rocheuses, dont ExoTerra qui est la plus grosse (sans que l'on connaisse sa position), et 5 planètes gazeuses externes (p. 189). Notons au passage que l'auteur n'a

pas pu s'empêcher de calquer son système sur notre Système solaire : une grosse planète gazeuse comme Jupiter et une autre exhibant des anneaux comme Saturne (p. 183). La figure 2 montre à quoi ce système pourrait ressembler, avec ExoTerra en 5^e position à partir de l'étoile.

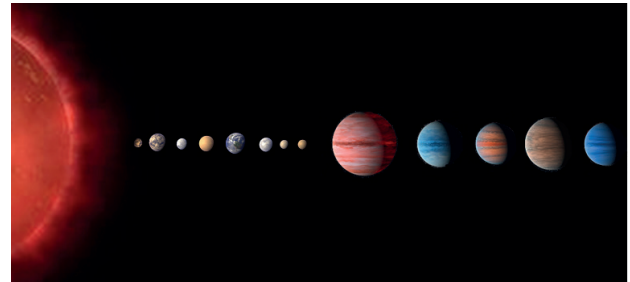


Fig.2. Représentation du système planétaire auquel appartient ExoTerra, 5^e planète en partant de l'étoile. (Composition adaptée de ressources NASA et ESA)

ExoTerra est distante de 0,34 UA de son étoile sur une orbite parcourue en 137 jours terrestres. En faisant les hypothèses nécessaires, on se propose de calculer la masse de l'étoile autour de laquelle orbite ExoTerra et de confronter notre résultat à ce que l'on sait des étoiles naines.

Appliquons la 3^e loi de Kepler, qui peut s'écrire, quand la masse de la planète est négligeable devant celle de l'étoile, de la façon suivante :

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

avec T la période de révolution de la planète (ici 137 jours), a le demi-grand axe de l'orbite de la planète (ici 0,34 UA), G la constante de la gravitation universelle et M la masse recherchée de l'étoile.

L'application numérique nous donne une étoile de masse $M = 5,60 \times 10^{29}$ kg.

Si l'on compare cette masse à celle du Soleil, on a une étoile de 0,28 masse solaire, ce qui correspond bien à une étoile de type naine rouge (masses comprises entre 0,08 et 0,4 masse solaire) comme décrit dans le roman.

ExoTerra

ExoTerra n'a qu'un continent dans l'hémisphère nord (p. 193). Là encore, l'auteur semble s'être inspiré de la Terre du temps où elle n'avait qu'un seul supercontinent (Gondwana, Pangée). Remarquons que le fait qu'un hémisphère soit très différent de l'autre, bien que surprenant, ne nous est pas inconnu puisque l'altitude moyenne de l'hémisphère nord de Mars est plus basse de plusieurs kilomètres que celle de son hémisphère sud.

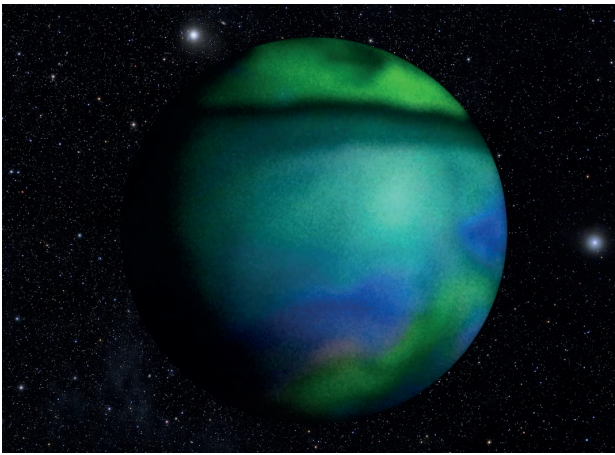


Fig.3. Vue d'artiste d'une exoplanète qui, comme ExoTerra, comporte un continent unique dans l'hémisphère nord et des nuages bleus et verts. (Exoplanete Bubble Gum by Amanda) Crédit PHL @ UPR Arecibo, ISMuL, Puerto Rico NASA Space Grant.

L'atmosphère d'ExoTerra comporte des «nuages étirés verts et bleus» (p. 189).

On nous dit aussi que les satellites naturels «dont deux de grandes tailles» (p. 201) de la planète créent des marées terribles.



Fig.4. Image de synthèse d'une exoplanète avec trois de ses satellites proches.

En ce qui concerne sa taille, ExoTerra présente une bizarrerie. D'une part, il est dit qu'elle est de «taille moyenne» puis de la taille de Vénus (p. 189). Soit. La taille de Vénus, rappelons-le, c'est la taille de la Terre à peu de chose près. Mais plus loin (p. 204), il est question d'une «pesanteur faible». Est-ce cohérent ? ExoTerra est une planète rocheuse semblable à la Terre et à Vénus donc on peut imaginer a priori qu'elle a une composition assez similaire. Pour une taille donnée, celle de la Terre et de Vénus en l'occurrence, elle devrait donc avoir une masse et un champ de gravité assez semblables.

Par ailleurs, on nous indique que la période de rotation est inférieure à 11 h (p. 189). Cette rotation plus rapide que notre Terre peut expliquer en partie

une pesanteur plus faible, voyons dans quelle mesure.

L'accélération de la pesanteur à la surface d'une planète est la composition entre l'accélération gravitationnelle de la planète qui nous attire vers elle et l'accélération centrifuge due à sa rotation qui nous en éloigne. ExoTerra tournant plus rapidement, cette «force» centrifuge est plus grande. Considérant que son rayon R est le même que celui de Vénus (6 050 km) et que sa période de rotation est de 11 h, nous obtenons une vitesse linéaire de rotation à l'équateur V de 960 m/s. L'accélération centrifuge valant $a_c = V^2/R$, il vient $a_c = 0,15 \text{ m/s}^2$ à l'équateur.

Si on suppose la masse d'ExoTerra identique à celle de Vénus, la pesanteur ne serait au final que marginalement plus faible que celle de la Terre. Si l'on veut que tout cela reste plausible, notre hypothèse d'une planète aussi dense que la Terre ou Vénus est fautive. Mars par exemple a une densité moyenne de 3,9 alors que celle de la Terre est de 5,5. En supposant qu'ExoTerra ait la densité de Mars, nous aurions alors une accélération de la pesanteur de 6,79 m/s² à sa surface ce qui est pour le coup sensiblement plus faible.

Autre détail intrigant : «les pierres tombent à grande vitesse». Plus vite que sur Terre ? Si c'est ce qu'a voulu dire l'auteur, il y a une incohérence avec les éclairages précédents. Une pesanteur plus faible devrait induire en une vitesse de chute plus faible.

Quant à son atmosphère, on peut lire que «les sons ne sonnent pas comme sur la Terre» (p. 204). Cela peut s'expliquer par une pression ou une composition atmosphériques différentes qui donneraient une vitesse du son plus ou moins grande. Imaginons une atmosphère qui donnerait à tout le monde une voix de canard comme quand on inhale de l'hélium...

ExoTerra possède quatre satellites aux orbites «complexes» : «il y en a toujours au moins un dans le ciel diurne de la planète, qui peut masquer l'étoile» et donc produire une éclipse. Quelle condition implicite cela suppose-t-il ? A priori, il faut que les satellites soient dans le même plan orbital que la planète autour de l'étoile. Sinon, comme la Lune autour de la Terre, les éclipses se feraient rares.

De plus, il faut que les satellites soient proches de la planète (ce qui est en accord avec les fortes marées mentionnées plus haut) pour que leurs périodes de révolution soient courtes. Enfin, comme les satellites galiléens de Jupiter, on peut imaginer que les satellites d'ExoTerra sont en résonance orbitale.

Performances de l'hypertélescope

Les performances de l'hypertélescope font rêver : résolution de 1 cm à la surface de Ganymède (p. 137-138) et résolution d'ExoTerra et de la sphère émettrice de lumière. Vérifions tout ceci.

L'hypertélescope est formé de 15 000 miroirs de 4 m de diamètre, dont seulement un certain nombre est utilisé pour observer dans une direction donnée. Cela constitue au final un instrument avec un miroir primaire de diamètre équivalent D_m qui est supérieur à 100 km (p. 31), sans plus de précisions. Nous choisirons $D_m = 200$ km dans la suite pour obtenir une limite haute des possibilités du télescope.

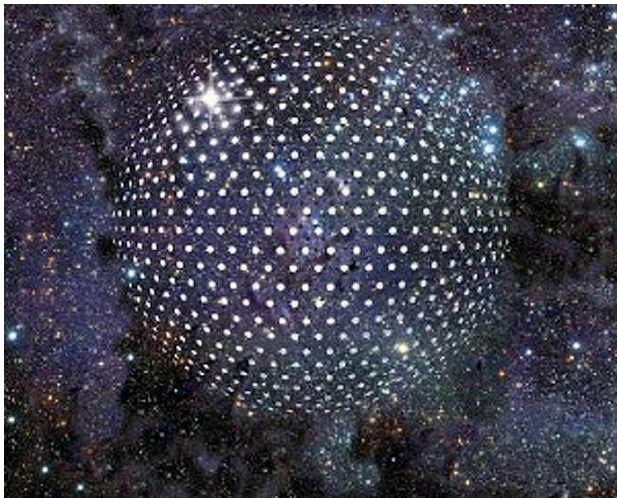


Fig.5. Hypertélescope spatial, une multitude de miroirs disposés en sphère pour observer dans toutes les directions sans en déplacer aucun. (Crédit : hypertelescope.org).

Le pouvoir séparateur, ou résolution, α_R d'un instrument optique est donné par la limite de diffraction :

$$\alpha_R = \frac{1,2 \times \lambda}{D_m}$$

avec D_m le diamètre du miroir primaire de l'instrument et λ la longueur d'onde considérée.

Dans le domaine visible, avec $\lambda = 560$ nm et $D_m = 200$ km, on obtient $\alpha_R = 3,41 \times 10^{-12}$ rad (soit 0,000 000 7").

Pour information, le futur télescope E-ELT avec son miroir primaire de 39 m de diamètre aura un pouvoir de résolution théorique (sans turbulence atmosphérique) 5 000 fois moins bon de $1,7 \times 10^{-8}$ rad (0,003 5").

On part du principe qu'un instrument est capable de résoudre un objet si le pouvoir séparateur de l'instrument est inférieur au diamètre apparent α de cet objet (on appelle en astronomie diamètre apparent

l'angle sous lequel on voit un objet).

Dans l'approximation des petits angles, le diamètre apparent d'un objet céleste vaut, en radian, d/D avec d son diamètre et D sa distance à l'observateur.

Ganymède est un des satellites galiléens de Jupiter, il se trouve à environ 5 UA du Soleil, donc au plus près à environ 4 UA de la Terre. Avec la résolution angulaire de l'hypertélescope calculée précédemment, on trouve une résolution de l'ordre de 2 m. Ce n'est pas mal du tout mais c'est loin du centimètre comme envisagé dans le roman.

En ce qui concerne ExoTerra, on sait qu'elle se trouve à une distance D de 389 AL de la Terre (soit $389 \times 3 \times 10^8 \times 3600 \times 24 \times 365,25 = 3,68 \times 10^{18}$ m) et que son diamètre d est équivalent à celui de Vénus (12×10^6 m). Cela donne un diamètre apparent de $3,26 \times 10^{-12}$ rad.

Même en choisissant un diamètre de miroir de 200 km, le diamètre apparent d'ExoTerra est inférieur au pouvoir de résolution de l'hyper-télescope donc ce dernier est incapable de résoudre l'exoplanète, et encore moins la sphère émettrice de lumière qui fait « un cinquième de la taille d'ExoTerra » (p. 195).

Notons enfin que le concept d'hypertélescope est réellement envisagé et étudié, au sol ou dans l'espace (www.hypertelescope.org).

Production du rayon lumineux

L'éclat visible depuis la Terre est produit artificiellement par un planétoïde, une sphère dont la lumière est concentrée par une lentille transportée par un second planétoïde. La sphère émettrice tourne autour de l'étoile sur une orbite « plus resserrée » qu'ExoTerra et pourtant elle est toujours à la même distance d'ExoTerra (p. 190). Est-ce possible ? À quelle condition ?

Idem pour le second planétoïde artificiel qui, nous dit-on, se trouve plus loin de l'étoile centrale (entre les orbites des 2^e et 3^e planètes gazeuses - p. 191) mais toujours sur le même rayon étoile-sphère émettrice.

Ces deux planétoïdes ne sont pas en orbites képlériennes sinon celui le plus proche de l'étoile aurait une période de révolution plus courte et le second planétoïde, bien plus éloigné, aurait une période de révolution plus longue. Pour que ces deux objets restent alignés avec l'étoile centrale, ils doivent d'abord être dans le même plan orbital mais surtout leurs vitesses doivent être contrôlées ; en d'autres termes, au moins un des deux doit être motorisé. Le second planétoïde, nous dit-on aussi,

gravite à très grande vitesse (p. 190 et 199). Est-ce cohérent ? Forcément, il doit décrire dans un même temps une orbite bien plus longue donc sa vitesse est nécessairement plus grande.

La lumière produite par la sphère et qui transite par une lentille de 1 200 m de diamètre (p. 199) produirait un éclat tel qu'il serait visible sur Terre en plein jour. Rappelons que pour qu'un objet soit visible en plein jour, il faut que sa magnitude apparente soit de l'ordre de -4 au plus. En considérant cette magnitude limite et connaissant la distance, nous pouvons calculer la magnitude absolue de cette source lumineuse et la comparer à des étoiles connues (on ne prend pas en compte l'extinction interstellaire ou atmosphérique pour simplifier). La magnitude apparente m et la magnitude absolue M sont alors liées à la distance d de l'astre à la Terre, mesurée en parsecs, par la relation :

$$m - M = 5 \log(d) - 5$$

Pour $m = -4$ et $d = 389$ al (119,3 pc), on obtient $M = -9,38$, soit une magnitude absolue plus faible encore que Deneb, pourtant une des plus intrinsèquement lumineuses étoiles visibles à l'œil nu ($M = -8,73$). Imaginez : Deneb a un rayon de l'ordre de 200 fois celui de notre astre et brille comme environ 60 000 soleils ; toute cette puissance lumineuse sortirait d'une lentille de 1 200 m de diamètre seulement... Colossal !

Par ailleurs, la lumière visible depuis la Terre due nous dit-on à des réactions thermonucléaires provoquées dans la sphère n'a pas les propriétés de la lumière émise par une étoile : pas de raies d'absorption dans le spectre (p. 45 et p. 190-191). Qu'il n'y ait pas de raies d'absorption est peu vraisemblable. La lumière de toute étoile, de tout objet distant, traverse le milieu interstellaire qui est composé de gaz et de poussières, plus ou moins denses certes, mais qui affectent inmanquablement le spectre de toute lumière qui les

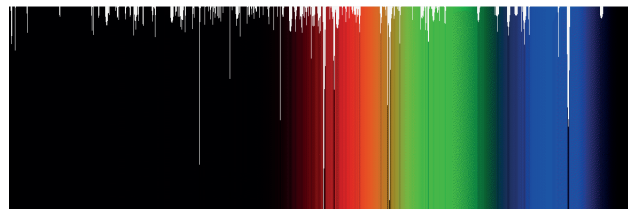


Fig.6. Raies d'absorption interstellaires avec en blanc leur profondeur relative (crédit : P. Jenniskens, F.-X. Désert).

traverse. De fait, des raies d'absorption interstellaires sont observées dans les spectres stellaires. Ce sont les bandes interstellaires diffuses.

En revanche, on sait faire la différence entre raies stellaires et raies interstellaires, ces dernières étant plus étroites que les bandes d'absorption stellaires (car créées par un milieu beaucoup plus froid) et souvent dues à des molécules carbonées complexes introuvables dans l'environnement chaud d'une étoile.

Résumé

Tout en lisant un roman au demeurant agréable et prenant, nous avons fait appel à des bases de physique dont beaucoup sont vues dès le lycée (lois de Kepler, loi de Wien, pesanteur, spectre et raies d'absorption). Nos réflexions nous ont aussi amenés à nous intéresser aux notions d'effet centrifuge, de magnitudes apparente et absolue, de pouvoir séparateur d'un instrument et d'élargir notre réflexion aux différents types d'étoiles et à la composition des planètes.

Nous avons pu finalement constater que les points techniques et scientifiques abordés dans le roman sont plutôt vraisemblables, mis à part les performances un poil optimistes de l'hypertélescope. Quant à la luminosité équivalente à celle d'une étoile géante qui sortirait d'une lentille aussi grande fût-elle, eh bien c'est un roman d'anticipation après tout...



École d'été d'astronomie du CLEA à Col Bayard du 12 au 19 juillet 2017

cette année :

« Soleil, soleils... » de notre étoile à la Voie lactée

Exposés, ateliers, observations
Visite de la Maison du Soleil (Saint-Véran)

Informations, réservations et inscriptions sur
<http://lyon.fr/clea/aLaUne/EcoleDEteDAstronomie2017/>

Inscription : du 20 février au 15 mai (date limite)

Pour les « espaces famille », réserver très tôt

