CORRIGE ENSEIGNANT

Explorer les exoplanetes avec des donnees reelles

Reponses types pour l'activite de lycee de 90 minutes

Auteur : Alain Doressoundiram (Observatoire de Paris - PSL)

Guide enseignant Utiliser ce corrige avec souplesse. Le catalogue exoplanet.eu est regulierement mis a jour ; les effectifs, les pics et les valeurs extremes peuvent donc legerement varier d'une seance a l'autre. Valoriser le raisonnement scientifique correct plus que les nombres exacts.

Ce que contient ce corrige

- Des reponses types a toutes les questions de la fiche eleve
- Des valeurs approximatives lorsque le catalogue en ligne peut varier
- De courtes notes pour indiquer ce qui peut etre accepte chez les eleves

Strategie de correction recommandee

- Verifier d'abord l'identification des tendances.
- Accepter les formulations equivalentes si elles sont scientifiquement correctes.
- Utiliser les notes de la colonne de droite pour les variations courantes.
- Encourager les eleves a relier les tendances aux biais de detection.

Sources des donnees Fiche eleve basee sur les outils graphiques d'exoplanet.eu et sur le cadre educatif Exo4Edu.

Corrige

A utiliser avec la fiche eleve. Les formulations proposees peuvent etre raccourcies lors de la correction en classe.

PARTIE A — Le boom des decouvertes

Question / consigne	Reponse suggeree	Note pour l'enseignant
Pendant quelles periodes le nombre de decouvertes augmente-t-il le plus fortement ?	Une bonne reponse identifie au moins deux grandes phases d'acceleration : une premiere hausse apres les premieres decouvertes confirmees d'exoplanetes au milieu des annees 1990, une tres forte augmentation pendant l'ere Kepler (environ 2009-2014), puis une autre hausse importante a la fin des annees 2010 et dans les annees 2020 avec les grands traitements de releves et les decouvertes de l'ere TESS.	Les annees exactes peuvent varier legerement avec la base en ligne. Accepter toute reponse qui identifie des phases de croissance nettes plutot que des annees isolees.
Proposer deux raisons expliquant ces augmentations.	Les raisons attendues peuvent inclure : (1) de meilleurs instruments et une meilleure precision en vitesse radiale ; (2) des missions et releves spatiaux dedies comme CoRoT, Kepler ou TESS ; (3) des chaines de traitement de donnees et de confirmation ameliorees ; (4) davantage de telescopes et de programmes d'observation plus vastes.	Les eleves n'ont pas besoin de citer toutes les missions. Deux raisons bien expliquees suffisent.
Pourquoi l'histogramme ne croit-il pas regulierement d'une annee a l'autre ?	Parce que les decouvertes ne sont pas publiees de façon continue, une par une. Elles apparaissent souvent par lots apres des campagnes de releve, des retraitements de donnees, la validation de candidats et des delais de publication. Les differentes techniques et les differents projets contribuent aussi a des moments differents.	Accepter « les decouvertes arrivent par groupes / campagnes » si l'idee est claire.

Conclusion type pour la partie A

- Le rythme des decouvertes a fortement augmente lorsque les releves dedies aux exoplanetes et les missions spatiales ont commence a fournir de grands jeux de donnees homogenes.
- La courbe est irreguliere car le catalogue s'enrichit par campagnes, confirmations et vagues de publication, et non de maniere parfaitement continue.

PARTIE B — Histogrammes : masse, distance orbitale et excentricite

Question / consigne	Reponse suggeree	Note pour l'enseignant

Tableau d'observation — Histogramme des masses	Tendance principale : la base couvre plusieurs ordres de grandeur, depuis de tres petites planetes jusqu'a de nombreuses masses de Jupiter. Lorsque les eleves passent aux unites de masse terrestre et a une echelle logarithmique, la dispersion devient plus lisible et une transition autour de quelques dizaines de masses terrestres devient souvent plus visible, separant les planetes de type Neptune des planetes geantes.	Etiquette suggeree dans le tableau de la fiche : « les deux » (astrophysique reelle + biais de detection).
Tableau d'observation — Histogramme du demi-grand axe	Tendance principale : beaucoup de planetes detectees sont tres proches de leur etoile, avec une forte concentration aux petites distances orbitales et une longue queue vers de plus grands demi-grands axes.	Etiquette suggeree : « les deux », avec un biais de detection particulierement important.
Tableau d'observation — Histogramme des excentricites	Tendance principale : les orbites presque circulaires et moderement excentriques sont courantes, tandis que les orbites extremement allongees sont plus rares.	Etiquette suggeree : « surtout physique, mais certains biais comptent aussi » ; « les deux » est acceptable.
Histogramme des masses : masses minimale et maximale approximatives visibles ? Que change l'echelle logarithmique ?	Reponse raisonnable en classe : l'intervalle de masse va de moins d'une masse terrestre a plusieurs masses de Jupiter. En unites terrestres, les eleves doivent remarquer des valeurs allant de fractions de masse terrestre a plusieurs milliers de masses terrestres. Si le prereglage « tous les objets » est utilise, la limite superieure peut s'approcher de la limite du catalogue, proche de 60 masses de Jupiter. En echelle logarithmique, la distribution est plus facile a lire et les differentes populations sont plus faciles a distinguer.	Accepter des nombres approximatifs. Le point essentiel est « tres large intervalle sur plusieurs ordres de grandeur ».
Histogramme du demi-grand axe : ou se situent la plupart des planetes detectees par rapport a leur etoile ?	La plupart des planetes detectees sont relativement proches de leur etoile, souvent a l'interieur de l'orbite terrestre et beaucoup meme a l'interieur de l'orbite de Mercure. Il existe une longue queue vers les grandes distances, mais la region interne est beaucoup plus peuplee dans de nombreux releves.	La comparaison avec Mercure (0,39 ua), la Terre (1 ua) et Jupiter (5,2 ua) doit montrer que de nombreuses planetes detectees se situent largement a l'interieur de 1 ua.
Pourquoi les planetes proches de leur etoile sont-elles souvent surrepresentees ?	Parce qu'elles sont plus faciles a detecter. Les transits sont plus probables pour de courtes distances orbitales et se produisent plus souvent pendant une campagne d'observation. Les signaux de vitesse radiale sont aussi plus forts et se repetent plus rapidement pour les planetes proches, surtout si elles sont massives.	C'est l'idee centrale de biais de detection dans cette fiche.
Histogramme des	Plusieurs exoplanetes ont une excentricite exactement	Accepter « notre

excentricites : les orbites presque circulaires ou tres allongees sont-elles les plus courantes ? Comparer avec le Systeme solaire.	egale a zero. Il s'agit de planetes pour lesquelles on ne dispose pas d'information sur la forme de l'orbite ; on suppose donc qu'elle est circulaire (e = 0). On observe que la distribution des excentricites est decroissante, mais il existe encore de nombreuses planetes sur des orbites tres excentriques. Par rapport aux planetes du Systeme solaire, beaucoup d'exoplanetes ont des orbites beaucoup plus excentriques que les planetes du Soleil : Mercure : 0,2 - Venus : 0,007 - Terre : 0,02 - Mars : 0,09 - Jupiter : 0,05 - Saturne : 0,05 - Uranus : 0,05 - Neptune : 0,004	Systeme solaire est globalement plus ordonne / moins excentrique ».

Point a souligner Les eleves doivent relier explicitement le pic des planetes proches aux effets de selection : un catalogue n'est jamais une photographie parfaitement non biaisee de la nature.

PARTIE C — Diagramme masse-rayon : de quoi les planetes sont-elles faites ?

Question / consigne	Reponse suggeree	Note pour l'enseignant
Identifier au moins trois grandes familles de planetes ou d'objets.	Les familles typiquement visibles sur le diagramme masse-rayon sont : (1) planetes rocheuses / super-Terres, (2) sous-Neptunes / Neptunes et (3) geantes gazeuses. Selon le jeu de donnees actuel, les eleves peuvent aussi mentionner les geantes gonflees ou les objets tres massifs proches du regime des naines brunes.	Accepter des etiquettes equivalentes si le regroupement est physiquement pertinent.
Les planetes de rayon comparable a celui de la Terre ont-elles toutes la meme masse ? Qu'est-ce que cela implique ?	Non. Des planetes de rayons similaires peuvent avoir des masses differentes, ce qui signifie qu'elles ont des densites differentes. Cela indique des compositions internes differentes : certaines sont riches en roches ou en fer, tandis que d'autres sont moins denses car elles contiennent davantage de volatils ou de gaz.	L'idee cle est : densite = indice sur la composition.
Ou se placeraient sur ce graphique des planetes rocheuses denses comme la Terre ou Mercure ?	Comme l'axe des x represente la masse et l'axe des y le rayon, les planetes rocheuses denses se situent dans la region des petits rayons, mais avec une masse relativement plus elevee pour leur taille. En pratique, elles se placent a droite de planetes moins denses de rayon similaire, ou en dessous de planetes de meme masse mais de plus faible densite.	Les eleves confondent souvent « au-dessus » et « a droite » ; accepter l'un ou l'autre s'ils justifient en termes de densite.
Choisir une petite planete et une planete geante et les comparer en une phrase.	Phrase type : « Une petite planete rocheuse a un rayon de quelques rayons terrestres au plus et une densite relativement elevee, tandis qu'une planete geante a un rayon beaucoup plus grand et est dominee par une	Toute comparaison claire et physiquement correcte est

	epaisse enveloppe d'hydrogene et d'helium. »	acceptable.

Resume en une phrase pour la partie C

- Le diagramme masse-rayon montre que les exoplanetes ne forment pas une seule sequence simple : des planetes de taille similaire peuvent avoir des masses tres differentes, et donc des densites et des compositions tres differentes.

PARTIE D — La troisieme loi de Kepler dans de vraies donnees

Question / consigne	Reponse suggeree	Note pour l'enseignant
Quelle tendance generale apparait entre la periode et le demi-grand axe ?	La tendance generale est positive : les planetes dont la periode orbitale est plus longue sont generalement plus eloignees de leur etoile ; le demi-grand axe augmente donc lorsque la periode augmente.	Les eleves doivent identifier une relation croissante nette.
Pourquoi un graphique log-log aide-t-il a voir cette relation ?	Un graphique log-log compresse un tres grand intervalle de valeurs et transforme une loi de puissance en une relation proche d'une droite. Cela rend la tendance de Kepler beaucoup plus facile a reconnaitre.	Cela renvoie directement a la note mathematique de la fiche eleve.
Les planetes d'un meme systeme suivent-elles la meme tendance ?	Oui. Dans un meme systeme planetaire, les planetes s'alignent generalement selon la meme relation croissante periode-distance, car elles orbitent autour de la meme etoile ; la troisieme loi de Kepler s'applique donc avec la meme masse centrale. La relation est habituellement plus nette dans un seul systeme que dans le catalogue complet.	Accepter la mention d'une faible dispersion et d'une masse commune pour l'etoile hote.
Defi facultatif : si la periode est multipliee par 10, que devient le demi-grand axe ?	Pour des planetes orbitant autour de la meme etoile, a $\propto P^{(2/3)}$. Donc, si la periode est multipliee par 10, le demi-grand axe est multiplie par $10^{(2/3)} \approx 4,6$. C'est coherent avec la tendance visible sur un graphique log-log.	Une valeur arrondie entre environ 4,5 et 4,7 convient.

Conclusion type pour la partie D

- Le graphique periode-distance est un exemple clair d'une loi physique qui emerge de vraies donnees : les planetes plus eloignees de leur etoile mettent plus de temps a faire leur orbite, conformement a la troisieme loi de Kepler.

SYNTHESE — Bilan et prolongement

Teacher answer key

Question / consigne	Reponse suggeree	Note pour l'enseignant
Ecrire une tendance physique claire observee dans la base de donnees.	Reponses possibles : « Les planetes de plus longue periode sont generalement plus eloignees de leur etoile » ; « La masse et le rayon dessinent de grandes familles planetaires » ; « Les tres fortes excentricites existent mais sont moins courantes que les excentricites faibles a moderees. »	Toute tendance physique reelle issue des graphiques est acceptable.
Ecrire un biais observationnel clair qui affecte le catalogue.	Reponse type : « Les planetes proches de leur etoile, surtout les grandes, sont surrepresentees parce que les methodes des transits et des vitesses radiales les detectent plus facilement que les petites planetes lointaines. »	C'est le biais le plus important de l'activite.
Quelle famille d'exoplanetes semble la plus facile a identifier ?	Une reponse courante est : les geantes gazeuses / Jupiters chauds, car elles ressortent nettement a la fois par leur masse et par le biais de detection. Certains eleves peuvent aussi citer les sous-Neptunes, car elles forment une population visible dans les graphiques fondes sur le rayon.	Accepter l'une ou l'autre si elle est justifiee a partir des diagrammes.
En 4 a 5 lignes, expliquer pourquoi les vraies donnees astronomiques sont puissantes mais doivent etre interpretees avec prudence.	Paragraphe type : « Les vraies donnees sont puissantes car elles revelent des tendances authentiques de la nature, comme les familles planetaires ou la loi de Kepler. Elles font aussi travailler les eleves comme des scientifiques, en leur faisant lire des mesures incompletes et bruitées. Mais un catalogue est façonne par des effets de selection : certaines planetes sont plus faciles a detecter que d'autres. La distribution observee n'est donc pas exactement la distribution reelle dans l'Univers. Une bonne interpretation exige donc a la fois la lecture de graphiques et l'esprit critique. »	Les eleves n'ont pas besoin de reprendre exactement cette formulation. Valoriser l'association « tendances reelles » + « biais / prudence ».
Activite de prolongement : comparer 51 Peg b et Kepler-10 b.	51 Peg b est une planete geante proche de son etoile (« Jupiter chaud »), tandis que Kepler-10 b est une petite planete rocheuse tres proche de son etoile. Ensemble, elles montrent que des planetes situees a des distances orbitales aussi faibles peuvent etre extremement differentes par leur masse, leur taille et leur composition. Les systemes planetaires sont donc tres divers.	Des versions plus courtes conviennent si le contraste est clair.

Note finale pour l'enseignant Les meilleures reponses d'eleves combinent trois idees : (1) les tendances dans les graphiques sont reelles, (2) ces tendances sont filtrees par les methodes de detection, et (3) les systemes exoplanetaires sont beaucoup plus divers que l'ancienne vision fondee uniquement sur le Systeme solaire.

Teacher answer key

Rappel utile pour la correction

Terme cle	Definition simple pour la correction	Commentaire
Demi-grand axe	Distance orbitale moyenne, generalement mesuree en ua.	Les eleves peuvent dire simplement « distance a l'etoile ».
Excentricite	Mesure du caractere circulaire ou allonge d'une orbite ; e = 0 signifie un cercle.	Faible e = presque circulaire.
Echelle logarithmique	Des espacements egaux signifient une multiplication egale, et non une addition egale.	Utile lorsque les valeurs couvrent plusieurs ordres de grandeur.
Biais de detection	Distorsion causee par le fait que certaines planetes sont plus faciles a detecter que d'autres.	Concept central de cette activite.