

Diversité, universalité ?

2° partie

Du géocentrisme d'Hipparque et Ptolémée à l'héliocentrisme de Copernic, à l'universalité des mondes de Giordano Bruno ; de l'astronomie observationnelle, de l'astrophysique théorique des 17 - 18 - 19 et 20^{ème} siècles à la conquête spatiale, nous étions arrivés la fois dernière à la fin des années 80 au début des années 90.

Début des années 90, à cette époque, grâce aux missions spatiales (soviétiques, américaines, européennes et japonaises), les astronomes avaient pris conscience de la grande diversité du système solaire (peu de choses en commun entre les planètes telluriques entre elles, entre les telluriques et les géantes gazeuses) ; mais aussi de son unité - unité structurelle : 4 petites planètes rocheuses internes, 4 planètes géantes gazeuses externes, deux ceintures d'astéroïdes, le tout orbitant, à quelques degrés près, dans un même plan - unité générique : même âge, même mode de formation : *effondrement d'un immense nuage de gaz et de poussières avec formation d'un disque protoplanétaire suivi d'une séquence de processus imprimant à chaque étage leur marque* - unité des mécanismes : les lois physiques régissant genèse et fonctionnement du système étant invariantes dans l'espace et dans le temps (les règles mises en jeu il y a 4,5 milliards d'années et aujourd'hui, les règles mises en jeu ici et à des milliards de kilomètres étant les mêmes).

De là à faire du système solaire un modèle, un prototype pouvant caractériser, à quelques nuances près, les systèmes extrasolaires, systèmes extrasolaires dont l'existence ne fait plus de doute mais qu'il reste toutefois à découvrir, il n'y avait qu'un pas... Comme vous allez le voir nous allons aller de surprises en surprises ...

Cela commence en 1995 lorsque **M. Mayor et D. Queloz** deux astrophysiciens de l'observatoire de Genève, travaillant sur des données recueillies à l'observatoire de haute Provence découvrent la première planète extrasolaire. **51 Pegasi b**, c'est son nom, orbite autour de l'étoile 51 Pegasi (une naine jaune de masse solaire située à environ 50 années lumière dans la constellation de Pégase). **Surprise**, cette exoplanète, cette planète extrasolaire (les deux mots sont équivalents) s'avère être une géante gazeuse, de 0,46 masse jovienne, d'un rayon en moyenne de 1,9 fois celui de Jupiter. Elle est qualifiée d'« inflated hot Jupiter » Jupiter parce qu'il s'agit comme Jupiter d'une géante gazeuse, hot parce qu'il s'agit d'une planète chaude (autour de 2000° en surface), chaude car très proche de son étoile, inflated parce que ses couches périphériques sont comme gonflées, diluées, très peu dense, d'une densité nettement inférieure à celle de l'eau. Mais surtout, alors que les géantes gazeuses du système solaire sont entre de 5 pour Jupiter et 30 U.A. pour Neptune, 51 Pegasi b orbite à 1/20° d'U.A. soit 7,5 millions de km presque dix fois plus proche que Mercure peut l'être du Soleil; sa période orbitale étant d'à peine plus de 4 jours (je vous rappelle qu'elle est proche de 12 ans pour Jupiter).

Note : La technique utilisée fut celle de la mesure de la vitesse radiale utilisant le spectrographe ELODIE (conçu à l'Observatoire de Haute Provence en collaboration avec André Baranne de l'observatoire de Marseille et Michel Mayor de l'observatoire de Genève). La masse d'une planète est certes minime par rapport à celle de son étoile (la masse de Jupiter c'est un millième de la masse du soleil) elle exerce toutefois un effet gravitationnel. Lorsque la planète passe derrière son étoile elle l'attire vers l'arrière lorsqu'elle passe devant elle l'attire vers l'avant, le rayonnement de l'étoile est ainsi périodiquement décalé vers le rouge lorsqu'elle s'éloigne de nous, vers le bleu quand elle s'en approche (c'est l'effet doppler) ; ce décalage spectral certes minime, est d'autant plus important que l'étoile est massive (cela permet d'en évaluer sa masse) et d'autant plus fréquent que la planète est proche de son étoile (on peut ainsi calculer sa période).

Cette découverte, un temps mise en doute, ne l'est plus plusieurs milliers d'exoplanètes ayant depuis été identifiées ; entre 2009 (date de son lancement) et juillet 2015, plus de 4500 exoplanètes candidates ont été répertoriées par le télescope spatial Kepler.

- un grand nombre d'entre elles ont des périodes orbitales très courtes autour de 10 jours parfois moins étant très proches de leur étoile; on y trouve des Jupiters chauds, des Neptunes chauds, des exo-terres,
- d'autres, de la taille de Neptune ou des super terres, ont des périodes orbitales un peu plus longues bien qu'à moins d'une année terrestre se trouvant par conséquent à moins d'une unité astronomique de leur étoile
- mais il y a aussi des super Jupiter très denses comme CoRot-3b de 20 masses joviennes, orbitant en 4 jours 1/4 à 0,05 UA et dont la masse volumique (la densité) est de 26,4 g/cm³ supérieure à celle du platine (la masse volumique de la terre est de 5,515), ou au contraire très éloignées comme Kappa Andromedea-b de 12,8 masses joviennes et dont la distance à son étoile est de 55 U.A. (pour mémoire Neptune est à 30 U.A.).

Il y a certes **un biais observationnel** - il est plus facile de détecter une exoplanète géante à période courte proche de son étoile, qu'une planète éloignée dont la période est longue voire très longue de plusieurs siècles - force est toutefois de convenir qu'**une organisation de type solaire** avec rocheuses internes, géantes externes, n'est à **priori pas la règle**, peut être est ce même d'une exception... **comment expliquer ?**

Les planètes se forment à partir d'un **disque protoplanétaire** en rotation autour d'une protoétoile. Ce disque comprend un compartiment interne et un compartiment externe, séparés par ce que l'on appelle une ligne des glaces qui, pour le système solaire est située entre 3 et 4 UA.

Le **compartiment interne** est en rotation d'autant plus rapide que l'on est proche de l'étoile en formation (conséquence de la conservation du mouvement angulaire, *c'est ce qui explique que la patineuse qui tourne sur elle même avec les bras écartés voit sa vitesse de rotation augmenter lorsqu'elle les serre contre son corps*) ; la température y est très élevée du fait des frottements entre poussières et gaz, frottements d'autant plus importants que le disque est en rotation rapide. Seules les structures réfractaires, les grains minéraux ayant un point de fusion et de vaporisation très élevé, peuvent y rester à l'état solide. Ce sont ces structures réfractaires, solides, qui vont s'agglomérer, accréter, pour finir par former des grains micrométriques, millimétriques des grumeaux des débris de quelques centimètres puis des planétésimaux de quelques kilomètres, des embryons planétaires, le peu de vapeur d'eau encore disponible s'étant incorporé aux agglomérats. Ce compartiment interne est le **lieu de formation des planètes rocheuses** dites telluriques, mais ce **processus est lent** (il faut beaucoup de temps pour que des petites structures qui s'entrechoquent avec violence arrivent à s'agglomérer), il demande, tout au moins pour le système solaire, plusieurs dizaines de millions d'années.

Le **compartiment externe** au delà de la ligne des glaces, est en rotation moins rapide, la température y est basse en dessous de - 100° C ; on y trouve du gaz, des poussières et de la glace. Ce compartiment externe est le lieu de formation des géantes gazeuses ; cette formation doit se faire rapidement, avant que les gaz se soient raréfiés sous l'effet du rayonnement. Mais pour accréter du gaz il faut disposer rapidement d'un noyau de plusieurs masses terrestres ; dans le compartiment externe, outre des minéraux il y a de la glace, de la glace en quantité, c'est elle qui va participer à la constitution rapide du noyau d'accrétion ; il est en effet plus facile de faire des boules de neige glacée mélangées à de la terre que des boules de sable déshydraté.

En résumé : dans le système solaire les conditions sont telles que les planètes telluriques se forment lentement en quelques dizaines de millions d'années dans le compartiment interne, tandis que les géantes gazeuses se forment plus rapidement, en quelques centaines de milliers d'années tout au plus quelques millions, en périphérie dans le compartiment externe, là où l'eau, sous forme de glace, est en quantité suffisante pour participer à la constitution rapide d'un noyau d'accrétion.

1^{ère} question : comment se fait il que l'on trouve des géantes gazeuses proches de leur étoile alors qu'elles ne peuvent se former qu'en périphérie au delà de la ligne des glaces ? **Réponse :** si l'on trouve des géantes gazeuses proches de leur étoile, c'est, qu'après avoir été formées au delà de la limite des glaces, elles ont migré vers l'intérieur. Lors de cette migration - processus obligé si l'on prend en compte l'hydrodynamique conditionnant la répartition de masses soumises à la gravitation dans un disque de gaz en rotation - la géante gazeuse « fait le ménage » accréte le gaz, les grains, toutes les structures qu'elle rencontre sur son chemin ; c'est sûrement la raison pour laquelle on ne trouve pas de planètes rocheuses là où il y a des géantes gazeuses proche de leur étoile.

2^{ème} question : puisque le processus de migration semble être un processus « physiologique », comment se fait-il que dans le système solaire les géantes soient situées dans le compartiment externe au delà de la ligne des glaces ? Les astrophysiciens ont essayé de répondre à cette question en s'aidant de simulations numériques. Or, concernant la formation des planètes telluriques, toutes les modélisations aboutissent à une planète Mars très nettement plus massive qu'un dixième de masse terrestre ce qu'elle est en réalité. Comment l'expliquer ? La **réponse** c'est **Alessandro Morbidelli** de l'observatoire de Nice qui va nous l'apporter, son modèle qualifiée de **modèle de Nice** est de plus en plus reconnu par la communauté scientifique internationale. Que nous dit-il ?

1. la planète Jupiter s'est bien formée au delà de la limite des glaces,
2. elle a ensuite migré vers l'intérieur jusqu'à environ une unité astronomique, accrétant gaz, débris, poussières sur son passage ; ce processus a eu lieu avant que les planétésimaux aient eu le temps de s'accréter pour former les planètes telluriques,
3. si Jupiter avait poursuivi son périple s'approchant du Soleil comme l'a fait 51 Pegasi b de son étoile nous ne serions pas là car, faute de matériaux à accréter, les planètes rocheuses n'aurait pu se former,
4. En migrant vers l'intérieur Jupiter a nettoyé le disque protoplanétaire d'une grande partie des grains, débris et planétésimaux nécessaires à la formation d'une planète rocheuse, ceci dans les zones situées au delà d'une U.A.. Ne disposant plus de matériaux en quantité suffisante pour se former comme les simulations le laissaient prévoir, Mars a vu ainsi sa masse réduite au dixième de la masse terrestre.

3^{ème} question : pourquoi Jupiter s'est-elle arrêtée en route, pourquoi n'a-t-elle pas migré plus près du soleil comme 51 Pegasi b et bien d'autres Jupiter chaudes ont pu le faire ? **Réponse** : elle s'est arrêtée en route parce que Saturne formée au delà de Jupiter avait une masse adéquate pour l'accompagner et la freiner. Si Saturne avait été plus massive elle l'aurait accompagnée dans sa migration à proximité immédiate du Soleil, si elle avait été moins massive elle n'aurait pu la retenir, dans un cas comme dans l'autre nous ne serions pas là pour en discuter !

4^{ème} question : pourquoi Jupiter et Saturne sont-elles actuellement au delà de la limite des glaces alors qu'elles ont migré vers l'intérieur ? **Réponse** : parce que le système est devenu instable et qu'après être entrées en résonance 3/2 (Jupiter faisant trois tours alors que Saturne en fait deux), les deux géantes ont été éjectées vers l'extérieur. A cette occasion tout le système solaire s'est trouvé déstabilisé, c'est ainsi qu'Uranus et Neptune qui les avaient suivies dans leur migration se sont trouvées éjectées vers l'extérieur (on pense même que Neptune initialement en dedans est passé en dehors d'Uranus), tandis que tous les débris, comètes, astéroïdes, qui se trouvaient sur leur passage furent éjectés, soit vers l'intérieur, soit vers l'extérieur ; en reste la ceinture de Kuiper au delà de Neptune et la grande ceinture astéroïde entre Mars et Jupiter dont la masse s'est trouvée réduite au millième de ce qu'elle était au début (insuffisante pour que puisse se former une planète). De cette instabilité témoignent les nombreux impacts que l'on trouve sur les planètes rocheuses et certains satellites du système solaire en particulier Mercure, la Lune et Callisto ; ce processus, qualifié de grand bombardement tardif, eut lieu il y a environ 4 milliards d'années.

De cette série questions/réponses que retenir ?

1. que le système solaire aurait pu être un prototype, un modèle quant à son organisation - rocheuses internes, géantes semi géantes externes... à priori il n'en est rien, aucun système exoplanétaire de type solaire n'ayant été identifié jusqu'à présent.
2. que nombreux sont les systèmes extra solaires avec des Jupiter chauds très proches de leur étoile, des super terres et des Neptunes à moins d'une unité astronomique,
3. que les géantes formées au delà de la ligne des glaces ont tendance à migrer précocement vers l'intérieur, elles peuvent toutefois reprendre leur place, voire être éjectées du fait d'interactions, de résonances... **migration et instabilité** étant une des caractéristiques évolutives des systèmes planétaires.

Mais attention il y a un biais observationnel : les techniques de recherche indirectes - transit, variations des vitesses radiales - privilégient les planètes de grandes taille à période courte : il est en effet plus facile d'observer de grosses planètes orbitant tout près de leur étoile que des planètes distantes de plusieurs dizaines d'UA dont la période orbitale peut excéder le siècle...

C'est l'**optique adaptative** qui, permettant de s'abstraire des perturbations atmosphériques et de capter les photons provenant d'une exoplanète, a permis d'améliorer l'imagerie directe et de découvrir des planètes à période longue très éloignées de leur étoile.

Ainsi une image donnant l'impression d'un amas quelque peu nébuleux peut en optique adaptative s'avérer être composé de plusieurs étoiles. Couplée à la **coronographie** permet en outre, masquant la lumière de l'étoile, d'obtenir visualisation encore meilleure d'une exoplanète - le principe est le même que celui utilisé pour le Soleil dont on veut masquer la photosphère afin de dégager la chromosphère et la couronne. C'est ainsi que l'on a pu visualiser directement *béta Pictoris-b* exoplanète découverte par A.M. Lagrange. Cette planète d'une masse de 4 à 11 masses joviennes, d'un rayon estimé à 65 % de plus que celle de Jupiter, orbite à 8 - 9 unités astronomiques avec une période évaluée entre 17 et 21 ans. Son suivi régulier montre qu'elle est en train de se rapprocher de son étoile pour bientôt passer derrière elle.

L'espoir réside aussi dans l'**astrométrie**. Cette technique datant du début des années 70, consiste à mesurer les infimes oscillations du mouvement apparent d'une étoile sur la voûte céleste provoquées par l'influence gravitationnelle d'une planète en orbite. L'amplitude de la perturbation étant fonction du produit de la masse de la planète par sa distance à l'étoile, l'astrométrie favorise ainsi la détection des Jupiters froids ; Gaïa lancée en 2013 par l'ASE et qui scanne en 3D des millions et des millions d'étoiles de la voie lactée, devrait fournir une foison de données complémentaires dans les années à venir.

Il est temps de faire la synthèse. En résumé, nous avons appris :

1. que nombreuses sont les exoplanètes découvertes ces vingt dernières années :
 - des géantes gazeuses Jupiter chaudes souvent « gonflées », des Neptunes chauds, des exo-terres et super terres très très proches de leur étoile à moins d'un dixième d'UA
 - des planètes de la taille de Neptune ou des super terres ayant pour beaucoup d'entre elles des périodes orbitales un à moins d'une année terrestre, se trouvant à moins d'une unité astronomique de leur étoile,
 - des géantes gazeuses de type jovien situées entre une et cinq UA, comme dans le système solaire... cela n'est pas trop surprenant
 - mais aussi des géantes froides à plus de 30 UA ; cela on le sait depuis que l'on dispose de la visualisation directe d'exoplanètes dont la période orbitale extrêmement longue, plusieurs siècles terrestres, n'autorise pas la détection par des méthodes indirectes (pour mémoire Neptune situé à 30 UA environ du Soleil a une période de révolution proche de 165 ans).
 - enfin des planètes « exotiques » : océan, de carbone, métalliques, avec des orbites rétrogrades, désaxées par rapport au plan écliptique, très elliptiques de type cométaires, orbitant parfois même autour de deux étoiles,
2. Nous avons également appris que la densité des géantes de 0,3 à 60 masses joviennes augmentait d'une manière linéaire au prorata de leur masse alors que celle des étoiles diminue, tandis qu'à de moins de 0,3 masse jovienne, la relation densité masse n'est pas établie,
3. qu'à partir d'un certain seuil situé autour de 80 masses joviennes il est difficile et probablement quelque peu artificiel de distinguer une planète géante très dense d'une naine brune,
4. Pour couronner le tout : on vient de découvrir un nuage protoplanétaire avec des bras spiraux comme on les rencontre dans certaines galaxies, et tout récemment deux étoiles entourées de trois disques de matière totalement désaxés ; chaque étoile du couple possédant son propre disque, tandis qu'un grand disque vient entourer le

*couple, les trois étant totalement désaxés les uns par rapports aux autres ; ces observations pourraient conduire à **reconsidérer le mode de formation de certains systèmes planétaires.***

Si nous avons beaucoup appris il nous reste beaucoup à apprendre

Du géocentrisme d'Hipparque et Ptolémée de Copernic, à l'universalité des mondes et systèmes planétaires quel chemin parcouru !

***Il y eut toutefois des précurseurs** : l'un des premiers fut **Aristarque de Samos** qui vécut au 3^e siècle avant JC ; voilà ce qu'écrivit Archimède à son sujet dans sa préface du traité l'Arénaire « Vous n'êtes pas sans savoir que par l'Univers, la plupart des Astronomes signifient une sphère ayant son centre au centre de la Terre.... Toutefois, Aristarque de Samos a publié des écrits sur les hypothèses astronomiques. Les présuppositions qu'on trouve dans ces écrits suggèrent un univers beaucoup plus grand que celui mentionné plus haut ; il commence avec l'hypothèse que les étoiles fixes et le Soleil sont immobiles ; quant à la Terre, elle se déplace autour du Soleil sur la circonférence d'un cerce ayant son centre dans le Soleil. ».*

*Il y eut **Epicure** qui 305 ans avant JC dans sa lettre à Hérodote écrivait « ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'univers ». Plus proche de nous, **Giordano Bruno** dans L'Infini, l'Univers et les Mondes écrivait en 1584 « Il est d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept "terres" que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche. » Ce génie visionnaire à qui les pères inquisiteurs du Saint Office demandaient des preuves à ses assertions répondit « C'est à l'intellect qu'il appartient de juger et de rendre compte des choses que le temps et l'espace éloignent de nous ». Après un procès en hérésie qui dura 8 années ce génie fut brûlé vif avec un masque de souffrance le 17 Février 1600 sur le campo dei fiori à Rome où, malgré les protestations du Pape Léon XIII, une statue à son effigie y fut érigée en 1889.*

Il fallut attendre le 3 juillet 1981 pour que le pape Jean-Paul II, réunisse une commission spéciale « pour l'étude de la controverse ptoléméo-copernicienne ». Après plus de 10 ans de travaux cette commission finit par revenir sur la condamnation de Galilée, elle réaffirma toutefois que « La condamnation pour hérésie de Giordano Bruno, indépendamment du jugement qu'on veuille porter sur la peine capitale qui lui fut imposée, se présente comme pleinement motivée, le copernicisme de Bruno ne prêtant aucun intérêt aux raisons scientifiques » fin de citation.

Toutefois à Rome en 2000 le Cardinal Paul Poupard président du Conseil pontifical pour la culture et ancien président du Conseil pontifical pour le dialogue interreligieux du Saint Siège déclarait « L'action de l'Eglise contre la personne de Giordano Bruno est un de ces contre témoignages dont, aujourd'hui, l'Eglise se repent, demandant le pardon du Seigneur et des frères. La purification de la mémoire, signe essentiel du Grand Jubilé, concerne aussi ce moment sombre de la vie de l'Eglise et nous incite, avec humilité et courage, à prononcer un jugement moral sur les attitudes historiques non conformes à l'Evangile qui ont marqué négativement le chemin de l'Eglise au cours de ces deux millénaires. »

Il aura donc fallu 4 siècles pour qu'une autorité de l'église demande le pardon sachez toutefois que Mg Robert Bellarmine Membre de la Sacrée Congrégation de l'Inquisition romaine et universelle, qui instruisit le procès de Bruno et le conduisit au bûcher fut béatifié, canonisé, déclaré docteur de l'église dans les années 30 par le pape Pie XI... sans commentaire.

Diversité, universalité tel était le titre que j'avais choisi pour cette conférence ; diversité, universalité car si nous avons un temps pensé que les planètes rocheuses étaient à l'image de la terre, les autres systèmes planétaires à l'image du système solaire, nous avons maintenant pris conscience de l'extraordinaire diversité de notre monde, diversité en sein du système solaire, au sein des systèmes extrasolaires, universalité de la diversité, mais nous avons aussi appris qu'à l'échelle des temps astronomiques tout bouge, tout évolue, rien n'est immuable en et cela sera ma conclusion en d'autres terme l'univers est vivant !