

André Brahic et la modélisation de la formation planétaire

Philippe Thébault, Enseignant-Chercheur au LESIA, Observatoire de Paris

André Brahic est, à juste titre, connu pour ses travaux sur les anneaux et arcs planétaires, sujet auquel il a consacré une large part de sa carrière. Mais on oublie parfois qu'il a également été à l'origine de travaux sur un autre sujet majeur de la planétologie, celui de la formation des planètes. J'ai eu la chance de faire ma thèse sous sa direction à l'époque (les années 90) où il envisageait justement d'explorer ce sujet. Nous avons ensemble développé un nouveau modèle pour l'étude d'un phénomène crucial du processus de formation planétaire : celui des collisions entre « planétésimaux », ces briques solides à partir desquelles les planètes se sont accrétées. Je me propose de présenter ici ces travaux, d'expliquer comment ceux-ci s'inspirent des études d'André sur les anneaux, et de montrer la postérité que ces travaux ont eue, en permettant le développement de modèles de plus en plus sophistiqués dont l'application majeure a été celle de la formation planétaire dans les étoiles binaires.

L'accrétion des planétésimaux, une étape (très) fragile de la formation planétaire

Le scénario de formation planétaire est un processus d'une grande complexité, dont certaines étapes essentielles sont aujourd'hui encore mal connues. Cependant, du moins pour ce qui concerne les planètes telluriques, il semble qu'il y ait aujourd'hui un certain consensus sur les (très) grandes lignes de ce scénario, dont la chronologie est, grosso-modo, la suivante :

- formation d'un disque proto-planétaire chaud autour d'une proto-étoile ;
- refroidissement de ce disque et condensation de petits grains solides ;
- agglomération progressive des grains par forces de contact pour former des cailloux puis des rochers kilométriques appelés « planétésimaux » ;
- collisions et agglomération mutuelle de ces planétésimaux par leur gravité pour former des embryons planétaires de taille lunaire ;

- perturbations dynamiques entre embryons, éjection de certains d'entre eux et agglomération mutuelle entre les autres pour former les planètes « finies ».

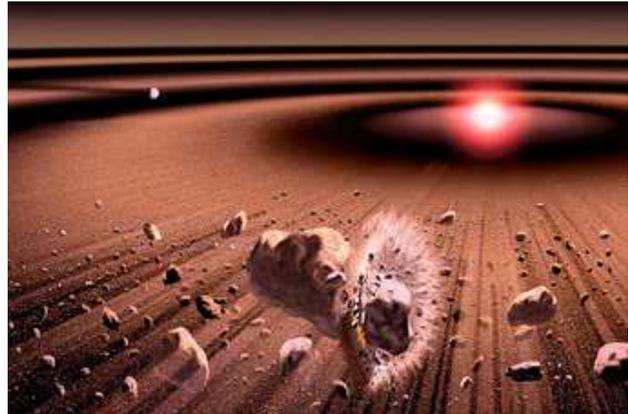


Fig.1. Collisions entre planétésimaux dans le disque proto-planétaire : ceux qui cognent à trop grande vitesse s'érodent ou se fragmentent, tandis que ceux qui cognent plus doucement vont rester « collés » par gravitation mutuelle (crédit : Kouji Kanba / ISAS / JAXA).

L'étape d'agglomération, ou accrétion, des planétésimaux est l'une des plus critiques de ce processus, car elle est très sensible à l'état dynamique du disque proto-planétaire. En effet, pour que deux corps massifs s'accrètent, il faut que leur vitesse de collision v_{coll} soit inférieure à leur vitesse d'évasion $v_{\text{éva}}$, soit seulement quelques m/s pour des corps kilométriques. Dans un disque « calme » (non perturbé par un gros corps extérieur), tout va bien : $v_{\text{coll}} \leq v_{\text{éva}}$ et l'accrétion va même suivre un chemin extrêmement rapide, dit « accrétion boule de neige », dans lequel quelques planétésimaux initialement un peu plus gros (et donc avec une plus grande $v_{\text{éva}}$) que les autres vont croître de manière exponentielle.

Il suffit cependant de très peu de chose pour enrayer cette belle mécanique : par exemple, la présence d'un proto-Jupiter pourrait agiter les planétésimaux des régions où les planètes telluriques se forment, en augmentant leurs v_{coll} et de ce fait freinerait ou même stopperait leur accrétion. C'est ce problème que nous nous sommes proposé d'étudier.

Un code pour l'étude de systèmes de planétésimaux « agités »

Nous avons pris comme base le code développé par André Brahic pour l'étude des anneaux planétaires (voir l'article de Cécile Ferrari). Ce code est très simple dans son principe : il suit l'évolution de « boules de billard » en révolution autour d'un corps central et ayant des collisions mutuelles inélastiques dans lesquelles de l'énergie est dissipée. Il permet cependant une grande précision dans l'estimation des vitesses et des angles d'impact, ce qui est fondamental pour l'accrétion des planétésimaux. Nous avons ensuite développé une version de ce code qui puisse fonctionner dans un environnement perturbé (avec un ou plusieurs corps massifs extérieurs, figure 2), ce qui était un vrai défi, car ces perturbations rendent la recherche des collisions beaucoup plus difficile.

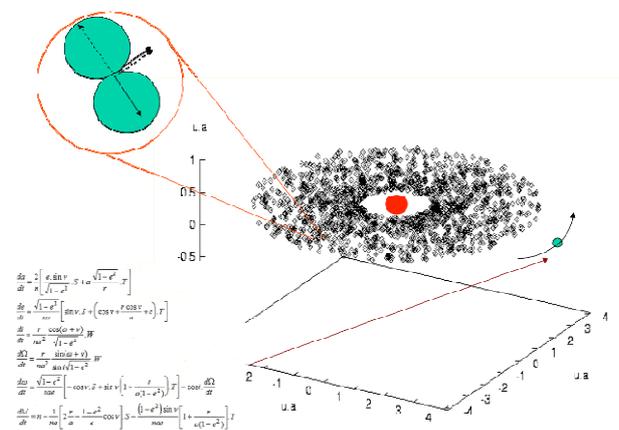


Fig.2. Présentation schématique du code collisionnel développé par P.Thébault & A.Brahic. Les planétésimaux sont représentés par des particules test indestructibles, en orbite autour d'un corps central (Soleil) et gravitationnellement perturbées par un corps extérieur (proto-Jupiter). Toutes les collisions mutuelles entre particules sont détectées et traitées. (crédit : P.Thebault).

Nous avons appliqué ce nouveau code au cas d'une ceinture de planétésimaux dans le Système solaire interne, perturbée par un proto-Jupiter. Les simulations ont montré qu'une « vague » de collisions se propage, à partir de la zone chaotique autour de Jupiter, jusqu'à environ 2 unités astronomiques (UA) du Soleil. Se crée ainsi une région, d'une largeur d'environ 1,5 UA, dans laquelle les vitesses de collision v_{coll} sont très supérieures aux vitesses d'évasion de corps kilométriques, ce qui rend donc l'endroit très hostile à l'accrétion de tels corps (figure 3). Il est intéressant de noter que l'extension radiale de cette zone « hostile » correspond grosso-modo à celle de la ceinture d'astéroïdes. De là à y voir l'explication

de la formation de cette ceinture il n'y a qu'un pas... qu'il ne faut pas se hâter de franchir. En effet, cette zone hostile ne se forme que pour un proto-Jupiter dont la masse est égale à celle du Jupiter actuel. Or il est tout sauf certain que Jupiter atteigne sa masse finale avant que les planétésimaux ne dépassent quelques kilomètres dans le Système solaire interne. Par ailleurs, la propagation de cette « vague » de collisions depuis Jupiter vers l'intérieur est obtenue dans notre code avec des « boules de billards » indestructibles, alors qu'il est certain qu'à de telles vitesses v_{coll} les corps se fragmentent, et il est probable que ces fragmentations successives atténuent la propagation de cette vague. Mais ce résultat reste tout de même très intéressant ; et il a été confirmé et analysé plus à fond quelques années plus tard avec un modèle développé par un autre collaborateur d'André Brahic, Sébastien Charnoz.

P. Thébault, A. Brahic / Planetary and Space Science 47 (1999) 233–243

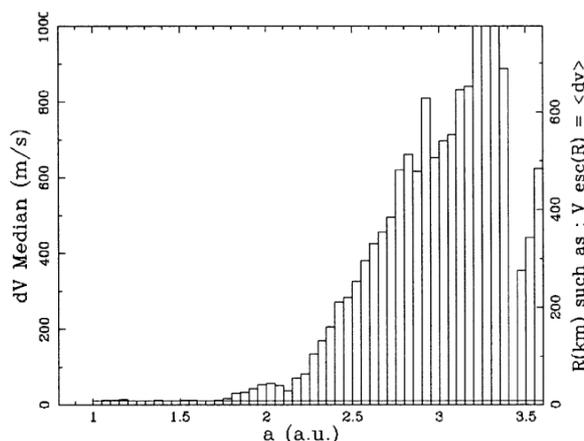


Fig.2. Median encounter velocity distribution at $T = 6 \times 10^6$ years.

Fig.3. Vitesses de collision moyennes dans un disque de planétésimaux perturbé par un proto-Jupiter de masse $0,001 M_{soleil}$. Pour comparaison, l'axe des ordonnées de droite indique la taille d'un corps solide dont la vitesse d'évasion est égale à v_{coll} (d'après Thebault&Brahic, 1998, Planetary&Space Science, 47).

Applications à d'autres systèmes planétaires

Nos travaux sur l'accrétion perturbée ont coïncidé avec l'un des plus grands bouleversements dans les sciences planétaires : la découverte des exoplanètes. À la fin des années 90, seules des planètes géantes étaient détectées, le plus souvent très proches de leur étoile (les fameux « Jupiter chauds »), mais, dans une poignée de systèmes, ces planètes étaient situées à des distances « joviennes », c'est-à-dire à plus de 3 UA de leur étoile. Il devenait alors légitime de se poser la question de savoir si la présence de telles planètes avait ou non empêché la

formation de planètes telluriques, planètes alors hors de portée des moyens instrumentaux. Notre code, développé pour l'étude du système astéroïdes/proto-Jupiter, semblait tout indiqué pour explorer ce problème.

Après avoir quitté l'équipe d'André Brahic, j'ai écrit à cette fin une nouvelle version du code, prenant en compte d'autres effets (friction gazeuse, etc.) et l'ai appliquée à quelques systèmes

exoplanétaires. Là encore, la présence d'une planète jovienne à moins de 5 UA semble être un obstacle majeur à l'accrétion de petits planétésimaux dans les régions telluriques (figure 4). Mais, là encore, ces résultats dépendent d'une hypothèse forte, à savoir que les planètes géantes extérieures soient déjà pleinement formées quand les régions internes du disque ne sont encore peuplées que de corps kilométriques.

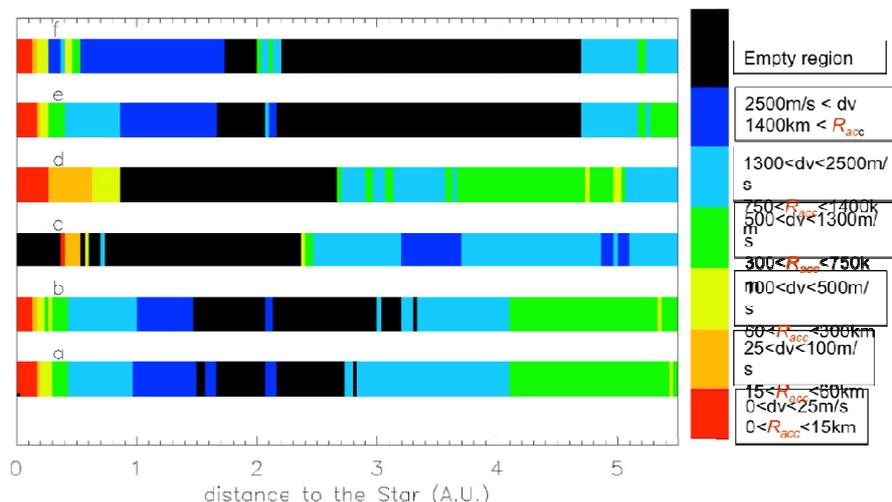


Fig.4. Zones favorables (vert/bleu) et hostiles (rouge/noir) à l'accrétion dans le système exoplanétaire « Upsilon Andromedae » tel qu'il était connu en 2002. (crédit : P.Thebault).

Accrétion planétaire dans les systèmes binaires

Mais l'application la plus fructueuse de notre modèle d'étude d'accrétion « perturbée » des planétésimaux est venue d'un domaine où on ne l'attendait pas a priori : les systèmes planétaires dans les étoiles binaires. En effet, à partir du début des années 2000, et un peu contre toute attente, des exoplanètes commencent à être découvertes dans des systèmes stellaires multiples (figure 5). Encore plus surprenant, des exoplanètes joviennes sont même découvertes dans des systèmes d'étoiles binaires très serrées, comme par exemple γ Cephei, où les deux étoiles ne sont séparées que de 20 UA (pour mettre les choses en perspective, c'est comme si, dans notre système solaire, on remplaçait Uranus par une étoile !).

Comment les planètes peuvent-elles se former dans de tels systèmes ? En effet, ici, contrairement à l'accrétion perturbée par un proto-Jupiter, il est quasiment certain que le corps perturbateur (l'étoile compagnon) était bien présent pendant le processus de formation des planètes, et que ce processus ne peut pas ne pas avoir été influencé par ces perturbations.

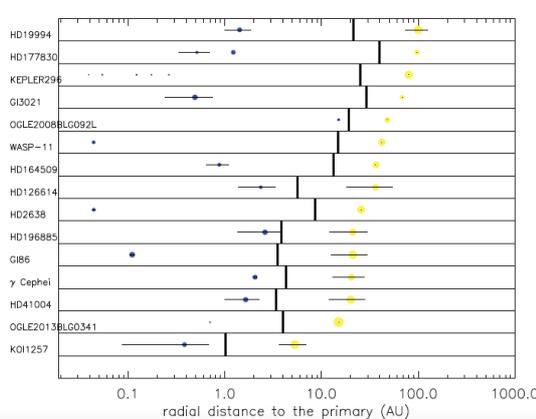


Fig.5. Exoplanètes dans des binaires de séparation <100 UA. Pour chaque système, l'étoile compagnon est représentée par un cercle jaune et la (ou les) exoplanète(s) par un cercle bleu, la taille de ces cercles étant proportionnelle à la masse des corps (la taille des planètes est « amplifiée » par rapport à celle des étoiles). Les segments horizontaux noirs représentent l'excursion radiale des corps due à l'excentricité de leur orbite (quand celle-ci est connue). Le trait vertical noir est l'estimation de la distance maximale à l'étoile centrale au-delà de laquelle les orbites deviennent instables à cause de l'étoile compagnon. (crédit : P.Thebault).

Nous avons publié plusieurs études à partir de 2004, explorant en détail l'effet des perturbations stellaires sur l'accrétion planétaire. Elles ont montré que certaines exoplanètes découvertes dans des

binaires « serrées » (~ 20 UA) n'ont sans doute pas pu se former *in situ* suivant le scénario « standard », car les collisions entre planétésimaux sont trop violentes et destructrices à l'endroit où se trouve aujourd'hui la planète.

Comment donc expliquer l'existence de telles planètes ? Il existe plusieurs solutions potentielles à ce paradoxe. Par exemple que :

- les planètes se soient initialement formées plus près de l'étoile centrale, dans un environnement plus « calme », et ont ensuite migré vers l'extérieur une fois formées ;
- la binaire n'était pas aussi serrée dans sa « jeunesse », et les planètes ont là aussi pu se former dans un environnement plus calme.

Et puis, deux solutions plus radicales :

- il y a quelque chose d'erroné ou que nous ne comprenons pas bien dans le scénario standard de formation planétaire ;
- la formation planétaire suit, dans les systèmes binaires, un chemin différent du cas des étoiles isolées.

L'étude des planètes dans les systèmes binaires étant une science encore très jeune, il est trop tôt pour trancher entre ces différentes explications.

Au-delà de l'étude de systèmes avec exoplanètes déjà détectées, nous nous sommes aussi lancés dans l'exploration des conditions de formation planétaire dans des binaires emblématiques où la recherche de planètes n'a pas encore été couronnée de succès.

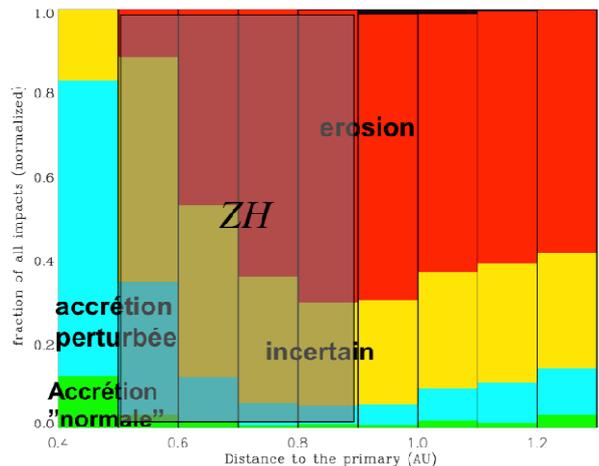


Fig.6. Conditions pour l'accrétion de planétésimaux autour d' α Centauri B sous l'effet des perturbations d' α Cen A. À chaque distance de l'étoile, nous estimons la proportion de collisions mutuelles entre planétésimaux qui se traduisent par l'érosion des corps (rouge), l'accrétion « perturbée » (c'est à dire freinée, en bleu) et l'accrétion « normale » (vert). La zone grisée correspond à la position estimée de la « zone habitable », c'est à dire là où l'on pense que l'eau liquide peut survivre à la surface d'une planète. Comme on peut le voir, seule la région à moins de 0,5 UA permet l'accrétion de planétésimaux kilométriques (crédit : P.Thebault).

La plus célèbre de ces binaires est bien entendu α Centauri, la plus proche voisine de notre Soleil. Dans ce système, où les 2 étoiles sont séparées d'environ 20 UA, notre modèle prédit que le scénario standard de formation planétaire a beaucoup de mal à produire une planète dans la zone habitable (figure 6). Il nous reste maintenant à attendre si les observations futures viendront infirmer ou confirmer cette prédiction. ■