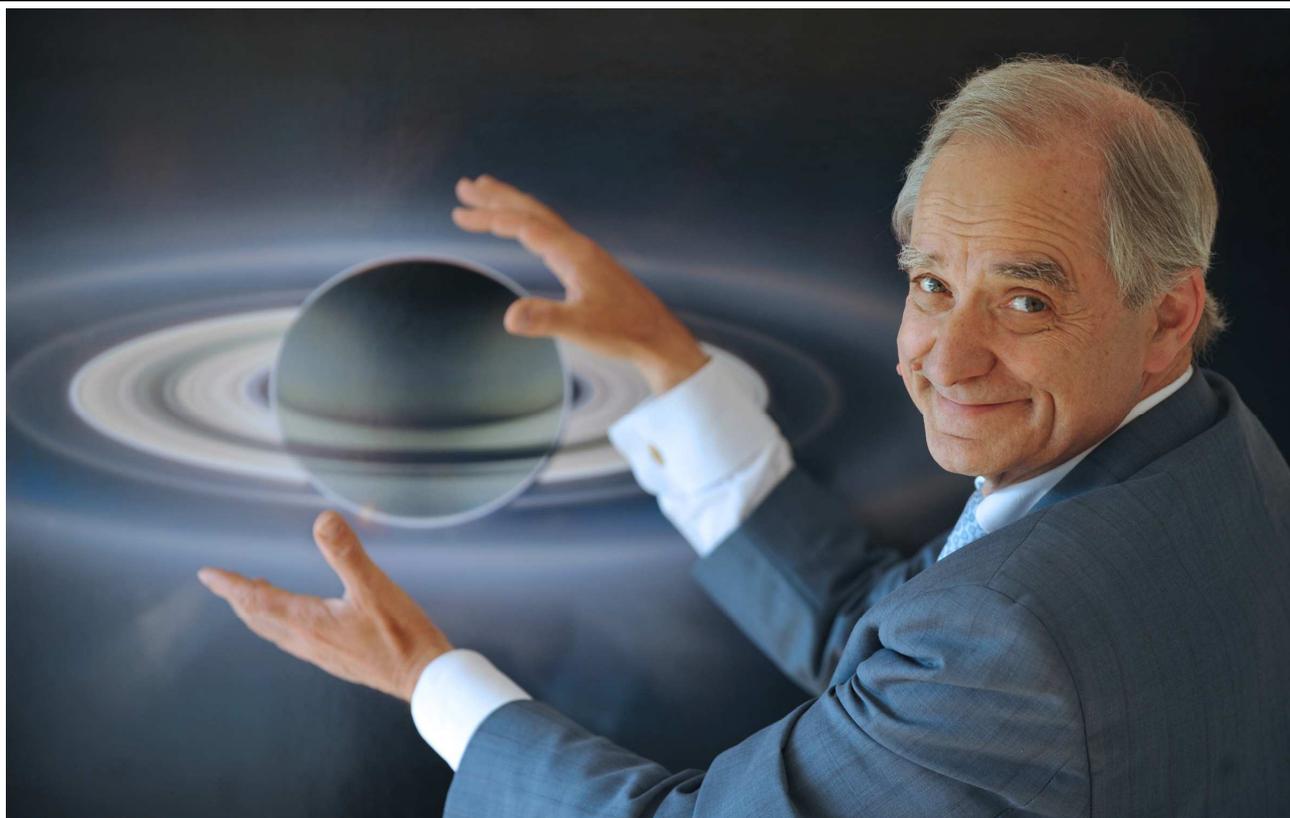


# Hommage à André Brahic



Crédit Éric Feferberg / AFP

## Propos liminaire

André Brahic est décédé le 15 mai 2016. L'écho de sa disparition a surpris même ceux qui le côtoyaient depuis longtemps. Comme beaucoup l'ont dit, André était un passeur des sciences, il transmettait une culture, celle des Sciences de l'Univers, à tout un chacun, le plus largement possible. Tout Terrien, tout citoyen devait pouvoir disposer d'éléments factuels concernant sa situation terrestre et sa grandeur relative. Un sacerdoce éminemment politique. À cet égard, on pourrait lire ou relire avec intérêt « Le savant et le politique » de Max Weber à propos du métier de professeur des universités et de travailleur scientifique. André était une personnalité, totalement au service de sa discipline, dévoué à sa cause, et non l'imprésario de son propre rôle. S'il avait quelque fierté pour certains de ses résultats scientifiques, il acceptait, conscient de son rôle de formateur, de transmetteur, non pas de vieillir, mais de voir son œuvre transformée, dépassée, conjugulée, par les générations suivantes. P. Thébault et moi-même avons travaillé à ses côtés durant plusieurs années. Nous avons hérité de quelques-unes des questions scientifiques sur lesquelles il a travaillé ou bien fait évoluer des outils qu'il utilisait, ou bien encore profité des portes qu'il ouvrait, entre autres choses. Comment ces questions, ces sujets ont-ils vieilli ? Comment ont-ils été développés, bien au-delà de l'intention de départ ? Il m'a semblé opportun, pour lui rendre hommage, non pas de décrire ses principaux résultats scientifiques mais de mettre en perspective l'héritage de son travail de scientifique et de professeur.

Cécile Ferrari

# L'épaisseur des anneaux de Saturne

*Cécile Ferrari, Professeure à l'Université Paris Diderot*

*André Brahic publiait en 1977 dans la revue Astronomy & Astrophysics un article détaillant les résultats de son étude de l'aplatissement d'un disque de particules sous l'effet des collisions. Alors que l'étude des systèmes de particules évoluant sous l'effet des collisions dans un champ gravitationnel par le biais de la simulation numérique en est à ses prémices, André y présente un modèle standard simple de leur évolution dynamique. En étudiant les cas des anneaux de Saturne, il conclut que leur épaisseur est de l'ordre de 2,5 m s'ils ont l'âge du Système solaire, bien en deçà des estimations kilométriques d'alors. Où en est-on de cette question 40 ans plus tard, à l'épilogue de la mission Cassini, en orbite autour de Saturne depuis plus de douze ans ?*

L'évolution dynamique des anneaux planétaires est une question complexe. Il s'agit de comprendre l'évolution à plus ou moins long terme d'un ensemble de particules (N corps) dans le champ gravitationnel d'une planète, interagissant entre elles par collisions ou par attraction gravitationnelle mutuelle (l'auto-gravitation). Localement dans le disque, elles peuvent aussi subir des interactions gravitationnelles d'intensité variable mais récurrentes des satellites présents dans le disque ou à l'extérieur. Des approches analytiques ou de simulations numériques ont permis de progresser en s'aidant d'hypothèses ou d'a priori toujours simplificateurs.

## L'évolution des disques par la simulation

À cette époque-là, André cherche à comprendre les mécanismes de base de l'évolution d'un essaim de particules évoluant sous l'effet des collisions. Les particules sont des sphères dures, indestructibles, identiques, elles ne s'attirent pas entre elles par autogravitation. Les collisions sont inélastiques. Le modèle est simple mais pas simpliste, il tend à séparer les facteurs d'évolution pour comprendre leur influence propre. Dans ses simulations d'alors, l'évolution de trajectoires de 100 particules est suivie sur une centaine d'orbites. Les collisions réduisent les inclinaisons et les excentricités des orbites. Il constate que le système s'aplatit très vite et qu'il gagne un état de quasi-équilibre où l'anneau a une épaisseur finie. Les collisions se raréfient, deviennent plus douces avec le temps, elles persistent tant que la distance entre les particules est inférieure à leur diamètre. Les orbites sont circulaires, le système s'étale lentement, des particules tombent dans la planète, d'autres s'éloignent sans limite. Le disque formé ne fait que quelques particules d'épaisseur. De ces simulations, André Brahic tire une relation entre la taille des particules et l'âge du système qui le pousse à conclure que, pour des anneaux primordiaux, l'ordre de grandeur d'une particule est de l'ordre de 2,5 m. Le disque est quasi-monocouche, l'épaisseur est donc de l'ordre de grandeur de la taille des particules.



*Fig.1. Les anneaux de Saturne observés par les caméras de la sonde Cassini. On distingue l'anneau B, central (gris clair), encerclé par la division de Cassini (sombre). L'anneau A s'étale au-delà de la division de Cassini et son bord extérieur délimite de manière abrupte le bord des anneaux à environ 137 500 km de la planète. Crédit : Cassini Imaging Team/JPL/ESA/NASA.*

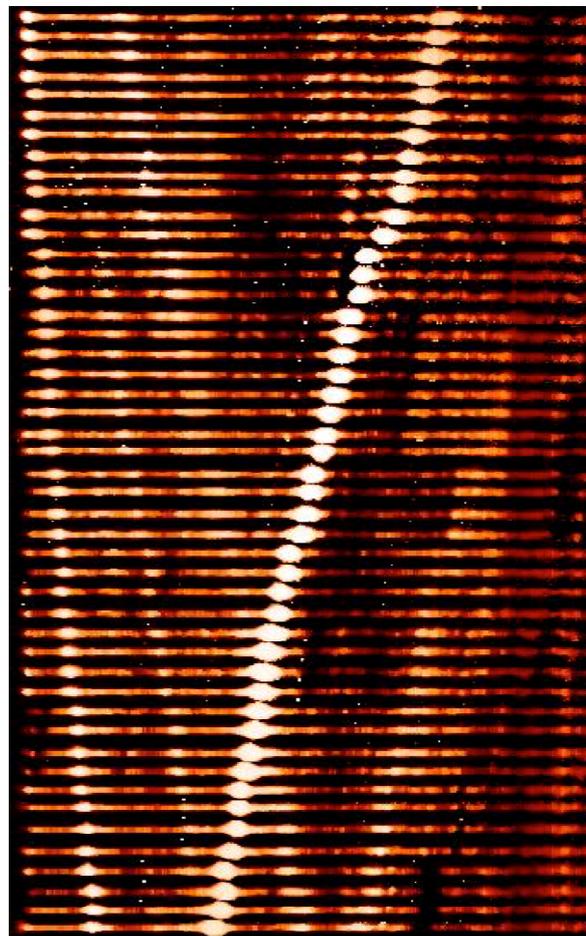
André manifeste alors un grand intérêt pour les survols prochains de Saturne et ses anneaux par les sondes Voyager 1 et 2, prévus en 1980 et 1981. Brad Smith, chef des caméras des sondes, l'accueille dans l'équipe 'Imagerie' pour bénéficier de son œil de dynamique dans l'analyse des données. Les anneaux de Saturne (figure 1) se révèlent déjà très différents d'un disque « nonchalamment » étalé dans le plan équatorial de la planète. Les bords du disque ou des divisions de Cassini ou de Encke sont abrupts ou parcourus d'ondes, des anneaux étroits, confinés radialement, sont découverts à l'instar de ceux d'Uranus découverts en 1977. L'anneau F, en périphérie des anneaux principaux est étroit, tortueux, grumeleux, étonnant si l'on envisage que les collisions devraient œuvrer à disperser, étaler toutes ces structures. Ces survols ne sont cependant pas les seules opportunités de confronter la théorie à l'observation pour tenter de mesurer l'épaisseur des anneaux. Tous les quinze ans en effet la Terre (et le Soleil) passe dans le plan des anneaux de Saturne et l'on peut espérer estimer, à l'instar des sondes, l'épaisseur en regardant les anneaux par la tranche.

## Mesurer l'épaisseur en observant le disque des anneaux par la tranche

Les passages de la Terre et du Soleil dans le plan des anneaux de Saturne sont le rendez-vous périodique de générations d'astronomes. Dans le cadre de sa thèse, Bruno Sicardy va analyser avec André Brahic les observations du passage de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne de mars 1980 réalisées au Pic du Midi et à l'Observatoire de Haute-Provence. Évidemment aucun espoir ici de résoudre l'épaisseur des anneaux alors que la résolution spatiale sur Saturne vu de la Terre n'est que de 6 000 km. Mais la brillance de la fine ligne que représentent les anneaux à ce moment-là peut-être analysée pour en déduire une épaisseur physique des anneaux. On utilise pour cela un modèle photométrique, qui figure les anneaux comme une boîte de camembert. En supposant la diffusion multiple des photons solaires dans l'anneau, on calcule sa brillance en fonction des hauteurs du Soleil et de l'observateur de part et d'autre du plan. Les observations ne permettent pas en général d'observer le moment exact du passage mais on peut extrapoler la brillance à ce moment-là, due à la tranche seule, à partir des observations faites avant ou après le passage. La valeur trouvée alors est de  $1,4 \pm 0,3$  km, une valeur que les auteurs interprètent comme peut-être pas réaliste pour les anneaux principaux. En effet le disque des anneaux pourrait être gauchi, ou entouré d'un nuage plus épais de petites particules, ou d'une ceinture de petits satellites. L'anneau F qui ceinture les anneaux principaux à une distance d'environ 140000 km de la planète, pourrait en être la cause. L'anneau E, observable plus loin dans la banlieue, beaucoup moins dense mais très dispersé verticalement de part et d'autres du plan équatorial de Saturne, pourrait aussi augmenter l'épaisseur apparente des anneaux vus de l'extérieur. D'autres mesures donnent alors une épaisseur photométrique certainement inférieure à 3 km. Ce résultat n'est pas en contradiction avec le fait que les anneaux principaux ne fassent que quelques mètres d'épaisseur, l'observation depuis la Terre montre que, très probablement, d'autres objets viennent s'ajouter sur la ligne de visée.

Le passage de 1995 va donner l'occasion à la génération suivante de progresser sur la connaissance de l'environnement proche des anneaux principaux. Les plus gros télescopes, le Télescope Spatial Hubble ou le télescope franco-canadien d'Hawaii équipé du système d'optique adaptative de François Roddier vont permettre de gagner encore en sensibilité et en résolution spatiale. Le passage du Soleil dans le plan des anneaux en novembre 1995 sera accompagné de trois passages de la Terre dans le plan en mai et août 1995 puis en février 1996. S. Charnoz P. Thébaud, A. Brahic et moi-même

analysons une partie des données acquises par l'équipe de F. Roddier. Il s'avère que l'essentiel du flux lors du passage de la Terre dans le plan des anneaux en août 1995 vient de l'anneau F, dans lequel vont être détectés de multiples arcs, à l'instar de ceux observés par les sondes Voyager quinze ans plus tôt (figure 2).

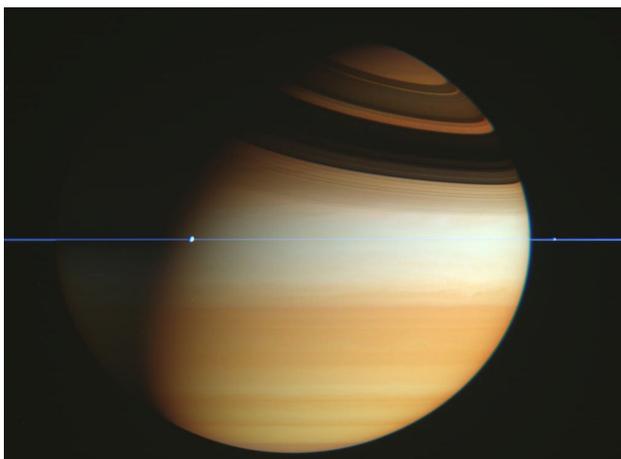


*Fig.2. Empilement d'une cinquantaine d'images des anneaux de Saturne vu par la tranche en 1995 par le CFHT. La planète est sur la droite. Le temps défile de bas en haut. Les arcs et autres objets détectés de l'anneau F laissent, en tournant autour de la planète, des traces penchées vers la gauche quand ils passent derrière et rejoignent le bout de l'anse à gauche et laissent une trace penchée vers la droite quand ils passent devant les anneaux principaux. Crédit : C. Ferrari.*

La détermination de l'épaisseur par cette méthode devient donc compromise, mais au profit de la première détection terrestre des arcs de l'anneau F. Les observations du télescope spatial publiées par P. Nicholson et ses collègues confirment une épaisseur effective de 1,2 à 1,5 km qui pourrait être l'amplitude maximale des ondes de gauchissement créées dans l'anneau A par les satellites, le cœur optiquement épais de l'anneau F pouvant y contribuer pour une épaisseur de 400 à 800 m.

La sonde Cassini, mise en orbite autour de Saturne en 2004 est passée plusieurs centaines de fois dans le plan équatorial de la planète. Un film a été réalisé en janvier 2007 avec les caméras ISS pour figurer le

passage dans le plan des anneaux de Saturne (<https://saturn.jpl.nasa.gov/resources/3510/>).



*Fig.3. La finesse des anneaux de Saturne lors d'un passage de la sonde Cassini dans le plan équatorial de la planète. Mosaïque d'images prises par la caméra ISS rassemblées par F. Garcia Navarro. Les couleurs sont représentatives : les anneaux apparaissent en bleu, les bandes et les nuages de la haute atmosphère de Saturne en or. Crédit : Cassini Imaging Team/JPL/ESA/NASA).*

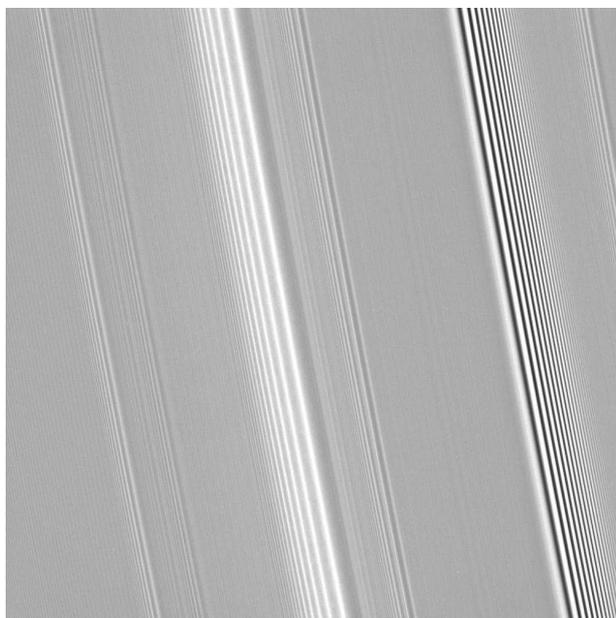
Les anneaux « disparaissent » au moment du passage de la sonde dans leur plan, du fait de leur très faible épaisseur, et donc de leur très faible brillance, relativement aux pixels de la caméra dont la taille représente environ 50 km.

La sonde est alors éloignée de 900 000 km. Sur d'autres images (figure 3), on perçoit bien leur finesse sans pouvoir cependant les résoudre verticalement. Les meilleures images, à moins de 100 m/pixel ne les résoudre pas plus. Les caméras, à ce stade, n'ont donc pas réussi à mesurer cette épaisseur, le problème de l'écrantage par l'anneau F restant le même avec la sonde Cassini.

## Estimer l'épaisseur en regardant les ondes de densité

D'autres moyens vont donc être mis en œuvre lors de la mission Cassini pour tenter d'estimer l'épaisseur des anneaux principaux. Dans les anneaux fins, comme les anneaux A et C, de part et d'autre de l'anneau B, ou dans la division de Cassini (qui n'est pas complètement vide de particules), l'épaisseur peut être estimée localement en y observant les ondes spirales de densité créées par les satellites environnants. Elles sont détectables par l'observation d'occultation d'étoiles par l'anneau avec des spectromètres ultraviolet ou proche-infrarouge, comme les instruments UVIS et VIMS embarqués sur la sonde Cassini. La théorie propose une relation entre la viscosité de l'anneau estimée par l'amortissement de l'onde avec la distance et son épaisseur. Ces instruments ont déterminé une valeur de l'épaisseur

entre 2 et 6 m pour l'anneau C et de l'ordre de 3 à 6 m pour la division de Cassini. Ces mesures, indépendantes mais très locales, confirment donc une épaisseur de l'ordre de quelques mètres. Ces résultats ont été en partie obtenus par K. Baillié, qui s'est formé à la dynamique des disques au sein du laboratoire dirigé par André Brahic, sous la houlette de S. Charnoz.



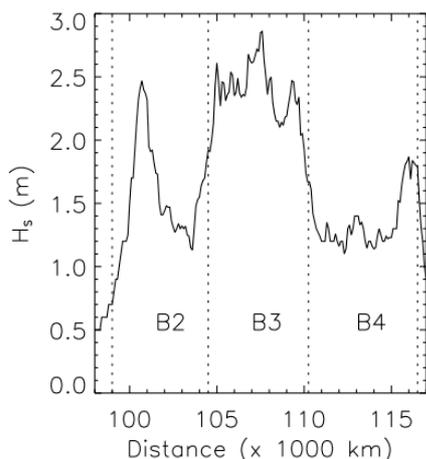
*Fig.4. Ondes spirales de densité (gauche, centre) et de gauchissement (à droite) dans l'anneau A de Saturne. La brillance marque la densité, la longueur d'onde est la distance qui sépare deux pics de densité. La planète est sur la droite de l'image. Pour une onde de densité, la longueur d'onde décroît avec la distance à Saturne. Elle s'amortit avec la viscosité. La résolution est ici d'environ 1 km/pixel et l'image a été réalisée en 2008 par le téléobjectif de la caméra ISS. Crédit : Cassini Imaging Team/JPL/ESA/NASA.*

## Estimer l'épaisseur en mesurant la diffusion de la chaleur à travers le disque

La méthode d'estimation par les ondes ne peut cependant pas être utilisée pour l'anneau B le plus dense, trop dense pour y observer des ondes par la méthode d'occultation. J'ai réalisé avec Erwan Reffet, en séjour post-doctoral dans l'équipe, une estimation de l'épaisseur de l'anneau B par un tout autre biais, celui de leur émission thermique. L'anneau B est la zone la plus dense, située entre 92 000 et 117 000 km de la planète (figure 1). La densité atteint son maximum aux alentours de 107 000 km à tel point que l'anneau est complètement opaque à la lumière solaire. En supposant que le mouvement vertical des particules est très limité à de telles densités, on peut supposer que le transfert de chaleur de la face au Soleil (en l'occurrence la face sud à l'époque) vers la face à l'ombre, se fait soit par les contacts entre les

particules, soit par rayonnement des particules à travers les espaces qui les séparent. Le cycle des saisons dure environ 29 ans sur Saturne. Les variations de température liées à ces cycles peuvent atteindre des profondeurs de l'ordre de 60 m au vu des inerties thermiques mesurées, c'est-à-dire potentiellement plus grandes que l'épaisseur des anneaux. On peut donc espérer être renseigné sur cette épaisseur en regardant à quelle vitesse la température de la face à l'ombre répond aux variations de température de la face au Soleil, au cours des années. Un modèle permet de calculer la température de la face non éclairée en fonction de l'élévation du Soleil, de la structure de l'anneau (densité, épaisseur) et des particules (conductivité thermique, etc.). En comparant les températures du modèle à celles observées, on peut en déduire ces propriétés structurelles.

En charge de l'exploitation scientifique du spectromètre infrarouge CIRS pour le compte du Service d'Astrophysique du CEA, j'ai mis en place un programme de suivi de la température des anneaux en fonction des saisons, de 2004 à 2010, de l'été à l'automne austral saturnien, le Soleil étant du côté du pôle Sud et son élévation au dessous du plan des anneaux diminuant jusqu'au passage du Soleil dans le plan à l'équinoxe d'août 2009.



**Fig.5.** Épaisseur de l'anneau B de Saturne entre 98 000 km et 117 000 km de distance, telle que déduite des variations saisonnières de températures observées par le spectromètre infrarouge CIRS-Cassini. Les différentes zones de l'anneau B, B2, B3 et B4 sont mentionnées. Crédit : C. Ferrari.

La figure 5 montre l'épaisseur en fonction de la distance à Saturne qui a été déduite de ces variations de température. On constate que l'épaisseur obtenue à 105 000 km est de  $2,2 \pm 0,2$  m. Par ce type de mesure indirecte on trouve donc que thermiquement l'anneau B se comporte comme une couche de particules dont l'épaisseur est de l'ordre de 2 m. On s'attend à ce que l'anneau B soit effectivement moins épais car l'excitation verticale des particules est plus amortie par l'autogravitation que dans l'anneau C et la division de Cassini, où l'épaisseur estimée est de l'ordre de 2 à 6 m.

D'autres considérations permettent de proposer, à partir de cette estimation de l'épaisseur, une masse minimale pour cet anneau, de l'ordre de  $9 \times 10^{18}$  kg, et une masse minimale totale des anneaux de Saturne de l'ordre de  $1,4 \times 10^{19}$  kg. Cette valeur est très proche de la masse résiduelle d'un anneau qui se serait étendu par étalement visqueux pendant 4,5 milliards d'années, l'âge du Système solaire. Ceci résulte d'une étude conduite en 2010 par Julien Salmon, doctorant de Sébastien Charnoz et André Brahic, en collaboration avec Aurélien Crida. Sous l'effet d'une viscosité variable avec la distance à la planète et de l'autogravitation, l'anneau s'étale dans les deux directions, vers la planète et vers l'extérieur, où le matériau peut éventuellement former de petits satellites là où les effets de marée sont réduits. Il perd donc de la masse mais quelle que soit sa masse initiale, sa masse résiduelle tendra vers cette valeur, qui correspond à la masse minimale nécessaire pour que le disque soit autogravitant (sa densité de masse par unité de surface est alors suffisante pour que l'attraction gravitationnelle entre particules soit non négligeable).

La mission Cassini par des mesures indirectes a donc permis de s'affranchir des effets d'écran des anneaux extérieurs pour faire des estimations locales de l'épaisseur des anneaux principaux, soit en regardant les ondes se propager dans l'anneau soit en estimant la diffusivité de la chaleur à travers l'anneau entre la face éclairée par le Soleil et la face « sombre ». Ces récents travaux donnent, par des moyens totalement différents, une image finalement assez cohérente de l'épaisseur, de l'ordre de quelques mètres seulement, et donc tout à fait compatible avec l'étude pionnière menée par André Brahic à la fin des années 70. Il faut cependant garder à l'esprit que ce modèle standard simple n'incluait pas les interactions avec les satellites environnants, ni l'autogravitation entre les particules, qui jouent très certainement sur l'évolution dynamique du disque, mais peut-être moins sur son épaisseur, à l'échelle globale.

La sonde Cassini a entamé en novembre 2016, pour son Grand Final, une série de 20 orbites (<https://saturn.jpl.nasa.gov/resources/7365/>), dont l'apothéose sera la plongée de la sonde dans l'atmosphère de Saturne. Elle multipliera les passages au plus proche de la planète et des anneaux (quelques milliers de kilomètres seulement) avec un objectif essentiel, celui d'entrer dans une zone où sa trajectoire peut être sensible à la masse des anneaux, si elle est suffisante. Ceci constituera une mesure inédite et directe de la masse des anneaux et des images inédites aussi !

Je remercie Lucienne Gouguenheim pour son intérêt à relire cet article et ses judicieuses suggestions sur le fond. ■

# André Brahic et la modélisation de la formation planétaire

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

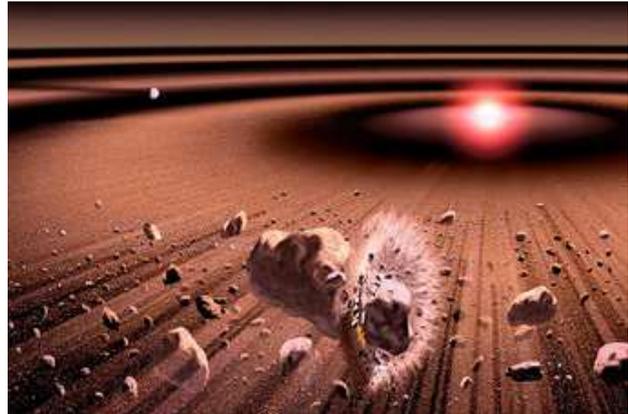
André Brahic est, à juste titre, connu pour ses travaux sur les anneaux et arcs planétaires, sujet auquel il a consacré une large part de sa carrière. Mais on oublie parfois qu'il a également été à l'origine de travaux sur un autre sujet majeur de la planétologie, celui de la formation des planètes. 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 ».



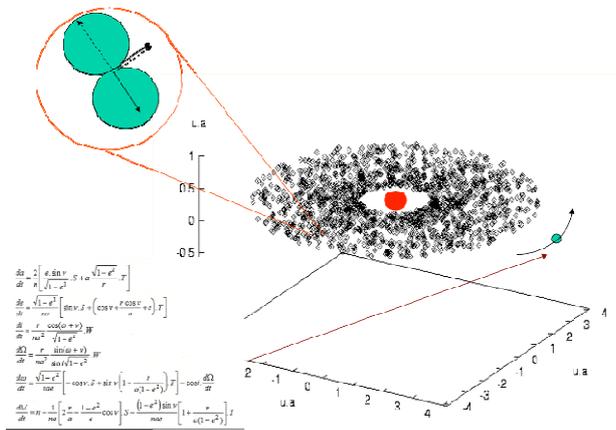
*Fig.1. Collisions entre planétésimaux dans le disque protoplanétaire : ceux qui cognent à trop grande vitesse s'érodent ou se fragmentent, tandis que ceux qui cognent plus doucement vont rester « collés » par gravitation mutuelle (crédit : Kouji Kanba / ISAS / JAXA).*

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  $v_{\text{coll}}$  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  $v_{\text{coll}}$  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.

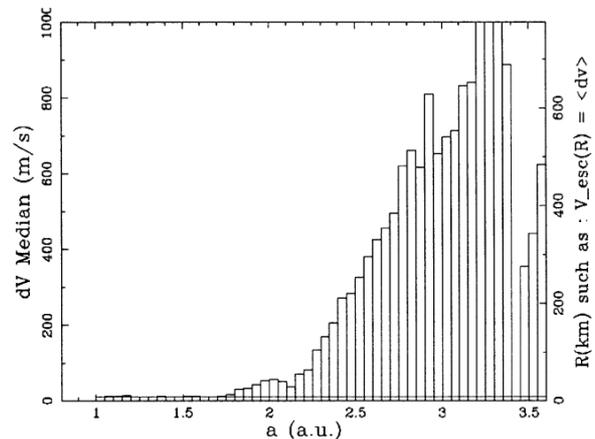


**Fig.2.** Présentation schématique du code collisionnel développé par P.Thébault & A.Brahic. Les planétésimaux sont représentés par des particules test indestructibles, en orbite autour d'un corps central (Soleil) et gravitationnellement perturbées par un corps extérieur (proto-Jupiter). Toutes les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

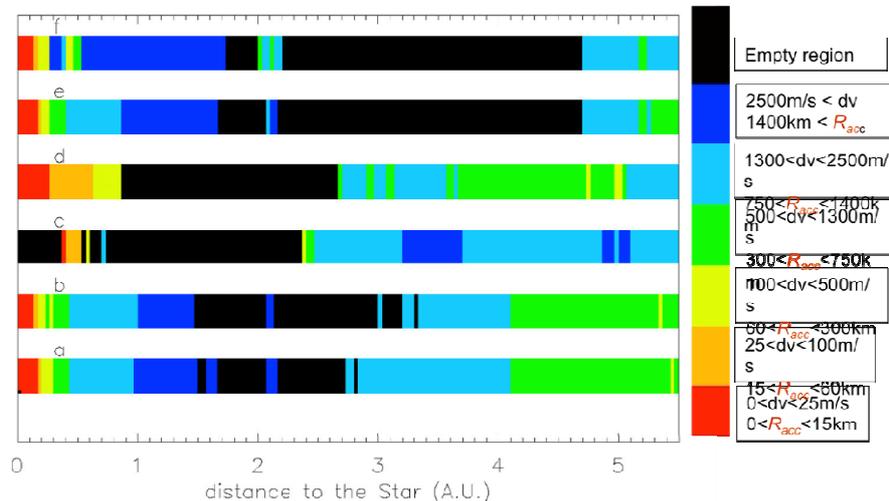


Fig.4. Zones favorables (vert/bleu) et hostiles (rouge/noir) à l'accrétion dans le système exoplanétaire « Upsilon Andromedae » tel qu'il était connu en 2002. (crédit : P.Thebault).

## 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  $\gamma$  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.

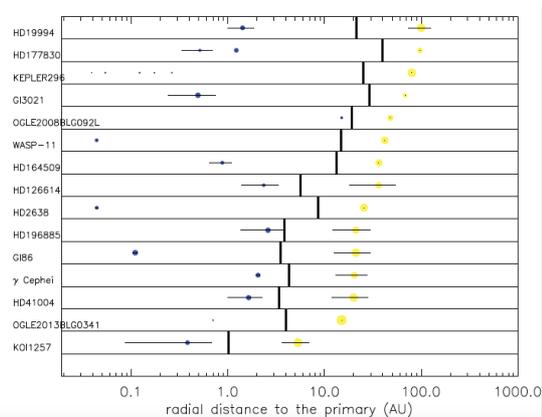


Fig.5. Exoplanètes dans des binaires de séparation <100 UA. Pour chaque système, l'étoile compagnon est représentée par un cercle jaune et la (ou les) exoplanète(s) par un cercle bleu, la taille de ces cercles étant proportionnelle à la masse des corps (la taille des planètes est « amplifiée » par rapport 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 » ( $\sim 20$  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 :

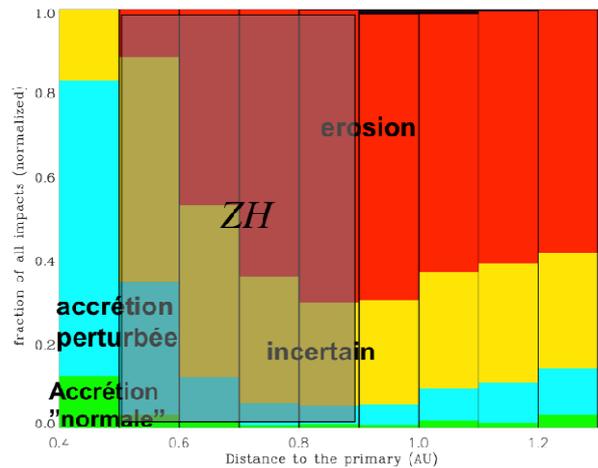
- les planètes se soient initialement formées plus près de l'étoile centrale, dans un environnement plus « calme », et ont ensuite migré vers l'extérieur une fois formées ;
- la binaire n'était pas aussi serrée dans sa « jeunesse », et les planètes ont là aussi pu se former dans un environnement plus 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' $\alpha$  Centauri B sous l'effet des perturbations d' $\alpha$  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  $\alpha$  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. ■