

## Des planètes aux orbites chaotiques

*Les lois de la gravitation universelle imposent à certaines des planètes découvertes autour d'étoiles lointaines des comportements très différents de celui des astres du Système solaire.*

**E**n 1999, un système de trois planètes gravitant autour de l'étoile *Upsilon Andromedae* a été découvert par Paul Butler et ses collègues de l'Observatoire anglo-australien de Siding Springs. *Upsilon Andromedae* est une étoile semblable au Soleil située à 44 années-lumière ; elle est visible à l'œil nu dans l'hémisphère Nord. Ces trois planètes ont des masses importantes (respectivement de l'ordre de une, deux et quatre fois la masse de Jupiter). Il s'agit de planètes géantes qui gravitent relativement près de leur étoile (si ces planètes géantes étaient dans le Système solaire, toutes les trois seraient contenues à l'intérieur de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter). Ainsi, elles sont plus proches les unes des autres que les planètes géantes du Système solaire. De ce fait, les interactions gravitationnelles qui s'exercent entre ces trois astres sont considérables et doivent rendre leurs trajectoires fort complexes. Éric Bois et ses collègues de l'Observatoire des sciences de l'Université de Bordeaux ont construit une série de modèles de systèmes planétaires leur permettant d'étudier les orbites de ces planètes pour différentes configurations compatibles avec les observations faites sur ces systèmes. Leurs calculs montrent que les trajectoires des planètes au voisinage d'*Upsilon Andromedae* sont, dans la plupart des cas, chaotiques. Leurs résultats suggèrent que beaucoup de systèmes planétaires découverts autour d'étoiles lointaines sont dynamiquement très différents du Système solaire.

Dans le cas du Système solaire, les interactions entre les planètes sont faibles. De ce fait, on peut calculer l'orbite de chaque planète en ne considérant, dans un premier temps, que son interaction avec le Soleil : on obtient alors les orbites en forme d'ellipse découvertes par Johannes Kepler. On peut ensuite moduler ces ellipses à l'aide des effets complémentaires

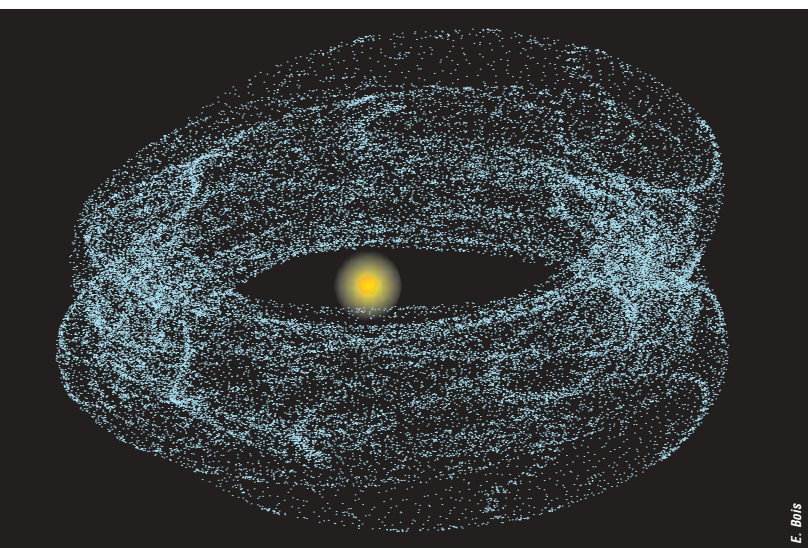
produits par la présence des autres planètes. Dans le cas du système d'*Upsilon Andromedae*, cette approche est impossible.

É. Bois, A. Maciejewski, B. Dauphole, K. Gozdziewski, L. Kiseleva et N. Rambaux ont utilisé un modèle numérique simulant les interactions gravitationnelles en jeu dans le système d'*Upsilon Andromedae*. Ils ont placé les trois planètes dans différentes configurations initiales compatibles avec les observations. En effet, les méthodes actuelles de détection des planètes autour d'étoiles lointaines ne permettent d'évaluer que leurs périodes de révolution et une valeur minimale de leurs masses. De ce fait, plusieurs paramètres, par exemple, les masses exactes des planètes et l'inclinaison dans l'espace de leurs orbites respectives, ne sont pas complètement déterminés par les mesures.

Le système *Upsilon Andromedae* est très instable : les caractéristiques des orbites varient de façon chaotique et sont radicalement modifiées en quelques milliers d'années. C'est le cas, par exemple, de leurs excentricités (un paramètre qui détermine l'aplatissement d'une trajectoire elliptique par rapport au cercle parfait). L'excentricité d'une orbite elliptique est comprise entre zéro (correspondant à une orbite circulaire) et une valeur inférieure à un (correspondant à une orbite parabolique). Si l'excentricité devient égale ou supérieure à un, la planète est éjectée du système. Alors que les orbites du Système solaire sont durablement stables et restent proches d'un plan moyen, les simulations montrent que l'excentricité de la deuxième planète d'*Upsilon Andromedae*, par exemple, peut assez rapidement balayer près de 60 pour cent de l'intervalle des valeurs de l'excentricité d'une ellipse. É. Bois et ses collègues ont même montré que, pour certaines conditions initiales compatibles avec les observations, le système est tellement instable qu'il se désintègre en éjectant sa planète la plus extérieure dès les premiers 1 000 ans.

Par ailleurs, les trajectoires de ces planètes ne peuvent pas être des figures planes. En mécanique, on montre que si la force qui s'exerce entre deux masses est portée par une droite passant par leurs centres de gravité respectifs, le mouvement qu'elles adoptent reste toujours dans un même plan. Cependant, si les deux corps ne sont pas rigoureusement sphériques, il faut, pour calculer leur attraction mutuelle, découper chaque astre en petits volumes élémentaires et calculer la somme de leurs interactions mutuelles. En général, la force résultante ne permet plus, en toute rigueur, que le mouvement des planètes soit confiné dans un plan, même si son effet est très faible. Toutefois, le système d'*Upsilon Andromedae* est chaotique et très sensible aux petites perturbations, de sorte que cette interaction élémentaire est suffisante pour empêcher les planètes de graviter dans un plan commun autour de leur étoile.

Ainsi, notre Système solaire, avec ses orbites durables, ne semble pas être un modèle universel. De nombreuses étoiles semblables au Soleil ont des températures et des longévités qui seraient favorables à l'apparition de la vie, mais si elles sont dotées de planètes semblables à celles d'*Upsilon Andromedae* – dont les conditions climatiques doivent varier brutalement au rythme de leurs trajectoires chaotiques – il est peu probable que la lente évolution chimique nécessaire au développement d'une biosphère puisse y avoir lieu. L'étude dynamique des nouveaux systèmes planétaires pourra peut-être, à l'avenir, fournir des indications aux exobiologistes qui cherchent à déterminer la fréquence à laquelle la vie apparaît dans l'Univers. Par ailleurs, avec les méthodes actuelles de détection, la détermination des masses et des orbites des planètes extrasolaires dépend d'une hypothèse implicite : on leur attribue des trajectoires elliptiques assez stables. Les comportements dynamiques mis en évidence par l'équipe de Bordeaux incitent à la prudence quant à la validité de cette hypothèse. La célébrité de Kepler ne saurait traverser tout l'Univers !



E. Bois

Les trois planètes qui gravitent autour de l'étoile *Upsilon Andromedae* (au centre) ont des trajectoires chaotiques, comme l'illustre cette simulation, réalisée à Bordeaux. Elle représente les 17 000 premières révolutions de la deuxième planète de ce système (les échelles n'ont pas été respectées).

## L'arche de Noé des vertébrés

*De nombreuses espèces de vertébrés auraient survécu au cataclysme qui a entraîné la disparition des dinosaures, sur le continent indien au cours sa dérive de l'Afrique vers l'Asie.*

Il y a 65 millions d'années, un cataclysme planétaire, vraisemblablement la chute d'un astéroïde combinée à une intense activité volcanique, mettait fin au règne des dinosaures et bouleversait le monde vivant. Jusqu'à présent, on admettait que la plupart des vertébrés terrestres avaient également été détruits au cours de cet épisode. Pourtant Michel Milinkovitch, de l'Unité de génétique de l'évolution, et Franky Bossuyt, de l'Unité d'écologie et de systématique, à l'Université libre de Bruxelles, ont échaudé un nouveau scénario d'après diverses données géologiques et génétiques : de nombreuses espèces se seraient multipliées sur le sous-continent indien lors de sa dérive entre l'Afrique et l'Asie, et auraient survécu, à bord de cette arche de Noé, au cataclysme survenu vers -65 millions d'années. La traversée aurait duré quelque 75 millions d'années (entre -130 et -55 millions d'années), du moment où le sous-continent indien s'est séparé de la plaque Africaine jusqu'à celui où il aurait touché la plaque eurasiennne. Alors certains vertébrés auraient recolonisé le monde selon ce nouveau scénario *Out of India*.

En analysant le patrimoine génétique des grenouilles *Ranidae* actuelles, F. Bossuyt et M. Milinkovitch ont montré que les grenouilles de Madagascar et d'Inde forment deux groupes qui ont divergé au moment où ces deux masses de terre se sont séparées. Cette séparation a eu lieu il y a 88 millions d'années. À partir de ce moment-là, les grenouilles qui se trouvaient du côté de Madagascar ont évolué vers les espèces actuelles typiques de cette région, tandis que celles restées sur la plaque qui allait devenir l'Inde

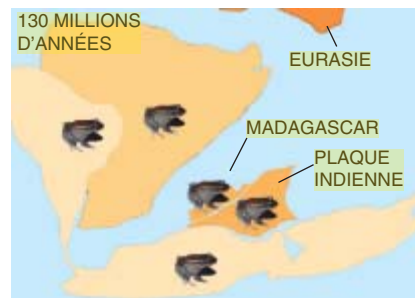
ont évolué vers les espèces actuelles endémiques d'Inde.

La séparation de l'Inde et de Madagascar est l'événement clé de l'histoire des *Ranidae* qui est à la base de la reconstruction de leur arbre généalogique. Cet arbre nous apprend ainsi que certaines lignées ancestrales de grenouilles se sont multipliées au cours du Crétacé sur la plaque indienne et sur celle de Madagascar. Certaines se sont éteintes au moment du cataclysme, mais d'autres ont subsisté jusqu'au moment de la collision de la plaque indienne et de la plaque asiatique, il y a 55 millions d'années : une fois la jonction établie, les espèces qui avaient été apportées par la plaque à la dérive ont commencé à coloniser le reste du monde. Ce scénario expliquerait pourquoi tant de lignées de *Ranidae* vivent en Indonésie, en Chine du Sud et aux Philippines : elles y sont beaucoup plus nombreuses que dans le reste du monde. Il justifierait aussi que les premiers fossiles du genre *Rana* apparaissent en Europe seulement il y a une trentaine de millions d'années (bien après la jonction Inde-Asie).

Toutefois, cette vision des vertébrés issus de l'Inde s'oppose à la théorie *Out of Africa*, qui postule que les animaux auraient colonisé le monde via l'Eurasie en partant d'Afrique après le cataclysme ayant abouti à l'extinction des dinosaures. Selon l'équipe de Bruxelles, ce dernier scénario a plusieurs points faibles : il n'explique pas le petit nombre d'espèces de *Ranidae* d'Afrique, ni les similitudes entre les *Ranidae* d'Inde et de Madagascar. On conçoit difficilement comment ces amphibiens, quittant les côtes africaines, auraient traversé l'océan sur plusieurs milliers de kilomètres, pour atteindre le continent indien.

Si la biodiversité des *Ranidae* a été préservée sur la plaque continentale de l'Inde lors de sa traversée d'Afrique vers l'Inde entre -130 et -55 millions d'années, alors des centaines d'autres espèces appartenant à divers groupes d'animaux, notamment des mammifères, ont vraisemblablement survécu de la même façon avant de débarquer sur le continent de l'Eurasie. Ce radeau à la dérive aurait été une planche de salut pour de nombreuses espèces.

Sébastien BOHLER



Il y a 88 millions d'années, une plaque s'est séparée de Madagascar, entraînant avec elles divers animaux, dont les grenouilles *Ranidae*. Durant le cataclysme qui eut lieu il y a 65 millions d'années et qui provoqua l'extinction des dinosaures, de nombreuses espèces disparurent. Lorsqu'il y a 56 millions d'années, la plaque, qui allait devenir l'Inde, toucha la plaque eurasiennne, les animaux qui y avaient survécu, notamment les *Ranae*, commencèrent à coloniser ce continent. Les espèces de *Ranidae* d'Inde et de Madagascar ont évolué indépendamment.

Vous cherchez de l'Information Scientifique et Technique ?



[//www.inist.fr](http://www.inist.fr)

L'Institut de l'Information Scientifique et Technique du CNRS

# Les caprices des marées

**BERNARD SIMON**

*Contrairement à une idée reçue, les marées ne sont pas des phénomènes périodiques. Grâce aux mesures recueillies par les marégraphes et par les satellites, elles sont désormais modélisées avec précision.*

**O**n consulte les annuaires des marées comme des annuaires téléphoniques, pourtant les marées constituent un véritable casse-tête. D'un port à l'autre, à quelques kilomètres de distance, les amplitudes varient parfois de plusieurs mètres. À travers le monde, les différences sont encore plus marquées : la marée atteint une hauteur de 16 mètres dans la baie de Fundy, au Canada, tandis qu'elle est imperceptible en mer Noire. Même en plein océan Atlantique, il existe des points où le niveau de la mer ne fluctue jamais ! Les origines astronomiques des marées (l'influence de la Lune et du Soleil) sont connues depuis longtemps, mais des paramètres terrestres, tels le relief des fonds sous-marins, la profondeur de la mer, le profil des côtes notamment, compliquent le phénomène.

Le niveau des mers croît et décroît au cours de la journée, mais aussi au cours des siècles. Au dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans, le niveau moyen des mers était sans doute situé 120 mètres au-dessous de celui d'aujourd'hui. Des marégraphes, situés le long des côtes, mesurent en continu le niveau de la mer, par exemple depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle à Brest ; on connaît ainsi son évolution moyenne sur de longues périodes. D'après les séries de mesures disponibles, le niveau moyen de la mer s'élèverait en de nombreux sites côtiers, mais il serait hasardeux d'en tirer une conclusion applicable à tous les océans. Aujourd'hui, techniques spatiales, marégraphes numériques et ordinateurs ultra-puissants, tout est mis en œuvre pour le suivi et la prévision de l'évolution du niveau des mers.

## La légende des marées

Avant notre ère, les marées, décrites par des voyageurs lointains, tel le Grec Pythéas, étaient souvent considérées comme des légendes ou, du moins, comme des phénomènes exagérés ! Avant Newton et la théorie de la gravitation, les marées ont parfois donné lieu à des interprétations hasardeuses, voire farfelues. Toutefois, dès le début de notre ère, Pliny l'Ancien fit une description correcte des marées, qui établit le lien avec le mouvement apparent de la Lune.

Sur les côtes européennes de l'Atlantique et de la Manche, la marée se manifeste comme une variation de la hauteur d'eau entre un minimum, la basse mer, et un maximum, la

VARIATION  
DU NIVEAU  
MOYEN DES MERS

23

22

21

20

19

18

17

16

15

14

13

12

11

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

0

-1

-2

-3

-4

-5

-6

-7

-8

-9

-10

-11

-12

-13

-14

-15

-16

-17

-18

-19

-20

-21

-22

-23

-24

-25

-26

-27

-28

-29

-30

-31

-32

-33

-34

-35

-36

-37

-38

-39

-40

-41

-42

-43

-44

-45

-46

-47

-48

-49

-50

-51

-52

-53

-54

-55

-56

-57

-58

-59

-60

-61

-62

-63

-64

-65

-66

-67

-68

-69

-70

-71

-72

-73

-74

-75

-76

-77

-78

-79

-80

-81

-82

-83

-84

-85

-86

-87

-88

-89

-90

-91

-92

-93

-94

-95

-96

-97

-98

-99

-100

-101

-102

-103

-104

-105

-106

-107

-108

-109

-110

-111

-112

-113

-114

-115

-116

-117

-118

-119

-120

-121

-122

-123

-124

-125

-126

-127

-128

-129

-130

-131

-132

-133

-134

-135

-136

-137

-138

-139

-140

-141

-142

-143

-144

-145

-146

-147

-148

-149

-150

-151

-152

-153

-154

-155

-156

-157

-158

-159

-160

-161

-162

-163

-164

-165

-166

-167

-168

-169

-170

-171

-172

-173

-174

-175

-176

-177

-178

-179

-180

-181

-182

-183

-184

-185

-186

-187

-188

-189

-190

-191

-192

-193

-194

-195

-196

-197

-198

-199

-200

-201

-202

-203

-204

-205

-206

-207

-208

-209

-210

-211

-212

-213

-214

-215

-216

-217

-218

-219

-220

-221

-222

-223

-224

-225

-226

-227

-228

-229

-230

-231

-232

-233

-234

-235

-236

-237

-238

-239

-240

-241

-242

-243

-244

-245

-246

-247

-248

-249

-250

-251

-252

-253

-254

-255

-256

-257

-258

-259

-260

-261

-262

-263

-264

-265

-266

-267

-268

-269

-270

-271

-272

-273

-274

-275

-276

-277

-278

-279

-280

-281

-282