

Quand Jupiter et Saturne ont fini par se frayer le chemin du retour après leur incursion dans le système interne, le disque environnant de gaz et de poussière était sur le déclin. La paire résonante Jupiter-Saturne a fini par rencontrer Uranus et Neptune récemment formées, ainsi peut-être qu'un autre corps de taille similaire. Les interactions avec le gaz aidant, le duo dynamique a enfermé ces géantes plus modestes dans des résonances orbitales.

Ainsi, juste au moment où l'essentiel du gaz du disque disparaissait, la région interne du Système solaire ne comportait probablement qu'un anneau de débris rocheux au voisinage de l'orbite actuelle de la Terre.

Dans la région externe, un groupe compact et résonant d'au moins quatre planètes géantes occupait des orbites presque circulaires, la plus proche se situant à peu près au niveau de l'orbite actuelle de Jupiter et la plus lointaine environ à mi-chemin de l'actuelle orbite de Neptune. Au-delà de l'orbite la plus externe, les planétésimaux glacés du disque externe s'étendaient jusqu'aux confins du Système solaire.

Puis, en plusieurs centaines de millions d'années, les planètes telluriques se sont formées, et les planètes externes jadis agitées se sont assagies, trouvant une stabilité que l'on aurait pu croire définitive. Mais le hasard en a voulu autrement : ce n'était pas encore la phase finale de l'évolution du Système solaire.

Le grand tack et la grande attaque contemporaine ont préparé le terrain à un dernier sursaut de violence interplanétaire dans l'histoire ancienne du Système solaire, une touche finale qui place le cortège planétaire dans une configuration très proche de celle d'aujourd'hui, des milliards d'années plus tard. Ce dernier sursaut est connu sous le nom de grand bombardement tardif. Durant cette période (il y a entre 4,1 et 3,8 milliards d'années), le Système solaire s'est momentanément transformé en stand de tir, théâtre d'un mitraillage permanent par des planétésimaux. Nous en voyons encore aujourd'hui les cicatrices avec les énormes cratères qui criblent la surface de la Lune.

En collaboration avec plusieurs collègues de l'observatoire de la Côte d'Azur à Nice, en 2005, l'un d'entre nous (Alessandro Morbidelli) a conçu le modèle dit de Nice pour expliquer comment les interactions des planètes géantes ont pu produire le grand bombardement tardif. Là où le grand tack prend fin, le modèle de Nice prend la relève.

À la fin du grand tack, les planètes géantes étaient en résonance les unes avec les autres sur des orbites proches et ressentaient aussi les tiraillements gravitationnels des planétésimaux glacés au-delà de leurs orbites. Malgré les résonances, elles étaient en fait en équilibre précaire, au bord de l'instabilité. En cumulant leurs effets sur des millions d'orbites et des centaines de millions d'années, les tiraillements insignifiants des planétésimaux externes ont peu à peu décalé le mouvement des géantes, grignotant lentement le délicat équilibre des résonances qui les liaient. Le point de

## Le grand tack de Jupiter et Saturne aurait déclenché la grande attaque, à laquelle d'éventuelles superterres n'auraient pas survécu

basculer correspond au moment où l'une des géantes est sortie de la configuration de résonance avec une autre, détricotant l'équilibre et déclenchant une série chaotique de perturbations qui a légèrement poussé Jupiter vers l'intérieur tout en éparpillant les autres plus à l'extérieur.

Dans un bref intervalle cosmique de quelques millions d'années, le Système solaire externe a ainsi subi une inconfortable transition, passant d'un état ramassé et quasi circulaire à une vaste configuration désordonnée, caractérisée par des planètes qui suivent d'immenses orbites de forte excentricité. Les interactions des planètes géantes étaient si violentes qu'une ou plusieurs d'entre elles ont pu être dispersées, éjectées vers l'espace interstellaire.

Si l'évolution dynamique s'était arrêtée là, l'architecture du Système solaire externe aurait bien reproduit les tendances observées avec les exoplanètes géantes, dont beaucoup décrivent des orbites excentriques autour de leur étoile. Mais le disque de planétésimaux glacés qui était à l'origine du désordre a aussi contribué à le supprimer par ses interactions ultérieures avec les orbites excentriques des planètes géantes. Un à un, la plupart des planétésimaux en orbite proche ont été éjectés par Jupiter et les autres planètes géantes, ce qui a progressivement ponctionné de l'énergie orbitale des planètes et rendu à nouveau circulaires leurs orbites. Une partie des planétésimaux

ont donné lieu au grand bombardement tardif, d'autres ont été éjectés au-delà de la portée gravitationnelle du Soleil et une petite fraction d'entre eux se sont maintenus sur des orbites liées, formant l'anneau de débris glacés situé aujourd'hui au-delà de l'orbite de Neptune, la ceinture de Kuiper.

Des travaux d'observation patients nous révèlent petit à petit la structure complète de la ceinture de Kuiper, et des caractéristiques inattendues se dévoilent peu à peu. En particulier, les astronomes ont repéré un motif particulier parmi les objets les plus lointains de la ceinture de Kuiper. Malgré des distances au Soleil variées, les orbites de ces objets sont regroupées dans une certaine région, comme s'ils étaient tous soumis à une même perturbation de grande ampleur.

Des simulations numériques effectuées par Konstantin Batygin et Michael Brown, de l'Institut de technologie de Californie, ont montré que cette situation se produit naturellement s'il existe une neuvième planète, une dizaine de fois plus massive que la Terre et évoluant sur une orbite très excentrique autour du Soleil, avec une période d'environ 20 000 ans. Une telle planète a peu de chances de s'être formée si loin, mais on peut en rendre compte si l'on suppose qu'il s'agit d'une exilée, éjectée d'une orbite plus rapprochée dans l'enfance du Système solaire (voir l'encadré pages 25-27).

## À la recherche de la neuvième planète

Si l'existence de cette planète autour du Soleil était confirmée, cela resserrerait fortement les contraintes de notre vision du Système solaire. En ce moment même, les astronomes se préparent à mettre à contribution certains des plus grands télescopes afin de rechercher activement cette hypothétique planète.

L'histoire du Système solaire qui s'esquisse ainsi, avec les restructurations parfois brutales du grand tack, de la grande attaque et du modèle de Nice, et l'existence soupçonnée d'une planète supplémentaire, promet de devenir l'une des plus belles réussites de la science moderne, et sans contester l'une des plus belles histoires qui puissent jamais être contées. ■



**LES RAYURES NOIRES** ornant la robe d'un tigre constituent une sorte de code-barres, qui permet d'identifier l'individu de façon certaine.

# Mieux recenser les tigres pour les sauver

Ullas Karanth

**Les techniques de suivi des populations de tigres ont connu de grands progrès au cours des dernières années. Encore faut-il que les organismes chargés de la protection du grand félin asiatique les appliquent.**

**L**e grand félin *Panthera tigris* rôde dans le Malnad – le « Pays des pluies ». Quand j'étais écolier dans cette zone de collines boisées de l'État du Karnataka, au sud-ouest de l'Inde, le tigre me fascinait, mais je n'en avais jamais vu. Les nombreux rituels hindous figurant ce grand fauve alimentaient ma fascination. Au cours du grand festival d'automne, le Dasara, des danseurs interprétaient par exemple le *hulivasha*, la danse rituelle du tigre. Le corps peint de motifs ocre, blancs et noirs, ils imitaient au rythme des battements de tambours les gracieux mouvements du félin, célébrant ainsi une tradition propre au Karnataka. Pour autant, l'avenir du tigre était sombre : tandis qu'éleveurs de bétail et chasseurs tuaient les derniers tigres sauvages, les bûcherons abattaient sans relâche les arbres des forêts afin d'en tirer du bois de construction. À tel point qu'une fois adolescent, dans les années 1960, j'ai abandonné tout espoir de voir un jour de mes propres yeux un tigre sauvage.

Quelques années plus tard, cependant, un événement inattendu se produisit : en réponse aux pressions grandissantes des partisans de la protection de l'environnement, Indira Gandhi, notre Première ministre de l'époque, fit voter des lois strictes. Plusieurs réserves naturelles furent établies. Dans

## L'ESSENTIEL

- Aujourd'hui, l'aire de répartition des tigres ne représente plus que 7 % de sa surface historique.
- La survie du tigre, *Panthera tigris*, repose sur une cinquantaine de populations concentrées, qu'il faut suivre en permanence et protéger.
- Toutefois, de nombreux organismes de protection comptent leurs tigres par des méthodes désuètes, qui ne produisent pas de résultats dignes de confiance.
- L'exploitation statistique et systématique des images enregistrées par des pièges photographiques fournit des estimations plus fiables, à même d'orienter les actions.

les décennies qui suivirent, la protection du tigre prit de l'ampleur. De nombreux pays en interdirent la chasse. Ils tentèrent de concilier le besoin qu'ont les tigres de disposer de vastes espaces forestiers et la pression humaine sur cet habitat. L'Inde a fait mieux que la plupart des autres nations concernées : bien que son territoire n'englobe que 20 % de l'habitat résiduel de *P. tigris*, 70 % des tigres du monde y vivent. Étant donné les pressions exercées dans ce pays par ses 1,2 milliard d'habitants, la pauvreté persistante et le développement de l'activité industrielle, ce n'est pas un mince exploit.

## L'habitat des tigres s'est réduit de 93 %

En dépit de tous ces efforts, les populations de tigres n'ont cessé de décliner à travers l'Asie. Il y a seulement deux siècles, la zone habitée par les tigres sauvages s'étendait des roselières de la mer Caspienne aux forêts tropicales humides d'Indonésie, en passant par la taïga sibérienne. Aujourd'hui, cet immense espace a perdu 93 % de sa surface. Seules quelques populations isolées persistent au sein d'une poignée de pays. Et les seules qui ont des chances raisonnables de redressement n'occupent que 0,5 % de l'aire de répartition initiale du tigre.

Les 40 à 50 populations correspondantes sont nommées « populations sources », car ce sont les seules qui soient assez grandes pour assurer la reproduction de *P. tigris*. Or même pour elles l'avenir n'est pas assuré, tant elles sont isolées et entourées de territoires hostiles peuplés d'humains. Comme des patients en soins intensifs, les populations sources de tigres doivent être étroitement suivies. Pourtant, malgré les efforts de protection consentis depuis longtemps, le suivi de ces populations est plutôt l'exception que la règle. C'est pourquoi les chercheurs savent encore mal comment les tigres vivent et survivent. Les méthodes traditionnelles de surveillance des populations suffisent au mieux à prouver en quels endroits d'Asie survit *P. tigris*, mais elles ne produisent pas d'estimations fiables des effectifs tigres restants. Les effectifs brandis par les protecteurs de l'environnement dans les médias s'appuient en réalité sur peu d'indices.

Il est extrêmement difficile de déterminer combien de tigres vivent et où, car ces grands félins sont fort discrets, très mobiles et habitent d'immenses territoires. Ces caractéristiques ont rendu vaines toutes les campagnes de recensement à partir de traces de pas, effectuées en Inde, au Népal, au Bangladesh et en Russie depuis les années 1960. On supposait que, de même que les empreintes digitales humaines sont uniques, les empreintes de pattes de tigre l'étaient aussi. Mais ces traces sont difficiles à trouver et à distinguer. En Inde, les jeux de données peu fiables engendrés par cette méthode ont fait croire à l'augmentation du nombre des tigres, alors même que les risques pesant sur *P. tigris* se multipliaient.



© DR

## L'AUTEUR



K. Ullas KARANTH, biologiste de la conservation, étudie les tigres depuis plus de trente ans.

Il travaille dans l'organisation non gouvernementale Wildlife Conservation Society, dont le siège est à New York.

**LE MALNAD, OU MALENADU**, est une région montagneuse couvrant les pentes occidentales et orientales de la chaîne des Ghats occidentaux, dans l'État indien du Karnataka. Le Malnad inclut le sanctuaire de faune sauvage du Bhadra et six parcs naturels accueillant des tigres, dont celui de Nagarahole mentionné par l'auteur.



© Raghu Nak

Heureusement, pendant que les autorités de protection comptaient les pattes – leurs traces du moins –, les progrès de la photographie, de la statistique et de l'informatique appliquées à l'écologie donnaient naissance à de nouvelles méthodes de comptage, enfin précises et fiables.

## Les tigres du parc de Nagarahole à l'étude

Dans les années 1980, au cours de la préparation de ma thèse de doctorat à l'université de Floride, j'ai étudié ces nouvelles approches. J'espérais pénétrer grâce à elles le monde si secret des tigres et mieux saisir leur comportement. Le cas de la population de tigres du parc national de Nagarahole, qui a connu un renouveau après la création de cette réserve dans le Malnad à l'époque d'Indira Gandhi, me motivait particulièrement. En 1990, je saisis ma chance, en rejoignant la Société pour la conservation de la faune sauvage (la Wildlife Conservation Society), afin de réaliser la première étude radiotéléométrique des tigres indiens. L'idée était que la surveillance rapprochée de quelques individus pourrait nous en dire plus sur le comportement de ces grands fauves.

Je me souviendrai toujours de ce matin frais et clair du 29 janvier 1990. Perché à 5 mètres du sol dans un arbre, un fusil à fléchettes chargées de sédatif en mains, j'attendais l'arrivée d'un tigre de 220 kilogrammes. Les membres de mon équipe étaient en train de le rabattre vers l'extrémité d'un large entonnoir en tissu tendu dans la forêt. Soudain, à 50 mètres, je repérai une lueur dorée : calmement, le tigre s'avancait vers moi. Quand ses épaules puis ses flancs apparurent dans la mire de mon fusil, j'appuyai doucement sur la détente. Lorsque la fléchette empennée de rouge alla se fichir dans sa cuisse, il laissa échapper un léger grognement.

Nous le découvrîmes ensuite endormi à l'ombre d'un arbre. Là nous pûmes lui accrocher un collier équipé d'un émetteur de la taille d'un poing. Captés à l'aide d'une antenne portative, ses signaux radio allaient permettre de localiser ce tigre à tout instant. Quelques heures plus tard, T-04, le nom donné à cet individu, se relevait et s'ajoutait aux trois tigres déjà équipés dans cette réserve de 645 kilomètres carrés.

Au cours des six années suivantes, ce suivi téléométrique m'a permis de passer



**L'AUTEUR INSTALLE UN PIÈGE PHOTOGRAPHIQUE** dans une forêt (à gauche), qui prendra automatiquement des images des animaux défilant devant lui. Les tigres réagissent diversement au flash de cet



appareil : certains deviennent curieux et s'approchent volontiers des pièges (à droite) ; d'autres, au contraire, deviennent méfiants et les évitent, ce qui n'est pas sans incidence sur les statistiques.

bien moins de temps à traquer des tigres à l'aveuglette et bien plus à les observer. Pour la première fois, nous avons mesuré à quel point ces fauves sont mobiles. Les femelles résidentes que je pistais à Nagarhole occupaient un territoire d'environ 18 kilomètres carrés, les mâles d'environ 50. Les tigres sont des animaux territoriaux, ils s'évitent les uns les autres, sauf lors de la reproduction. Ces superficies relativement réduites suggéraient une densité de tigres plus élevée que celles estimées jusqu'alors dans les réserves.

La télémétrie nous a aussi révélé ce que les tigres du Malnad mangeaient, car elle m'a permis de retrouver leurs proies. Ces observations et les collections de fèces, encore plus puantes que les restes d'animaux prédatés, nous ont appris que les tigres tuent à peu près une grande proie par semaine, dont ils consomment les deux tiers en trois à quatre jours, avant de reprendre leur errance. Ces nouvelles connaissances sur le régime alimentaire du grand félin impliquaient que la réduction du nombre des proies due aux chasseurs était un facteur décisif dans le déclin des populations de tigres. Cela donnait déjà une première orientation pour agir en faveur de *P. tigris*.

En 1993, j'ai conçu un moyen d'estimer le nombre de grosses proies d'un tigre, c'est-à-dire le nombre de cerfs, de sangliers et de bovidés sauvages présents dans une zone donnée. J'ai adopté la méthode d'échantillonnage mise au point par les biologistes animaliers américains : deux chercheurs progressent discrètement à travers la forêt le long d'étroites pistes rectilignes de 3,2 kilomètres de long et comptent les proies qu'ils aperçoivent. À l'aide d'un télémètre, ils mesurent en outre à quelle distance de la piste chaque animal se trouve. Même si beaucoup d'individus passent inaperçus, le comptage et la télémétrie permettent d'évaluer le nombre de proies potentielles sur le terrain.

## Des proies abondantes

Mes résultats furent les premiers de ce type en Asie. En les étudiant, j'ai été frappé par l'abondance de proies que présentent les forêts protégées du Malnad : de 16 à 68 ongu-lés sauvages – cerfs, sangliers et bovins – par kilomètre carré, soit une densité supérieure à celles des riches savanes d'Afrique de l'Est. Une bonne nouvelle pour les tigres ! Ainsi, quoique relativement petites comparées aux parcs nationaux d'Amérique du Nord ou

d'Afrique, les réserves naturelles de l'Inde peuvent subvenir aux besoins d'un grand nombre de tigres. Grâce à ces évaluations des effectifs des proies, les biologistes ont commencé à estimer combien de tigres chaque forêt d'Asie peut nourrir.

Toutefois, au milieu des années 1990, les tigres des réserves indiennes ont subi un braconnage intensif pratiqué par des bandes criminelles, à la suite de l'augmentation de la demande de parties de tigres (peaux, os, certains organes...) due à la multiplication des nouveaux riches chinois. Dès lors, les protecteurs de l'environnement avaient besoin d'évaluer l'impact de ce braconnage sur les populations sources en effectuant des décomptes précis. Combien de tigres restait-il ? Combien en perdait-on ou en gagnait-on chaque année ? Leur nombre fluctuait-il naturellement ? Leur densité variait-elle d'une région à l'autre ?

Pour répondre à ces questions, j'ai entrepris d'identifier et de compter les tigres d'une façon nouvelle pour l'époque : en exploitant systématiquement les clichés pris par des pièges photographiques placés le long des pistes. Tout animal passant devant un tel piège déclenche ce dernier ; on pouvait alors identifier sans erreur chaque tigre en examinant le « code-barres »