

Cela élimine les nanotubes de carbone. Mais de la même manière que l'âge de Fer a suivi l'âge de Bronze, et que les nanotubes de carbone succéderont un jour à l'acier, nous pouvons espérer découvrir des matériaux encore plus résistants et plus légers. Mais les améliorations ne peuvent pas se poursuivre indéfiniment. Il y a une limite au progrès de l'ingénierie, imposée par les lois de la nature. En ce qui concerne l'ascenseur spatial près d'un trou noir, c'est la limite du rapport résistance à la traction/poids du matériau qui est le facteur déterminant. Ce rapport est insuffisant pour l'acier et les nanotubes, mais existe-t-il un matériau assez résistant ? La résistance maximale théorique, indépendamment du matériau, est calculable, et est une étonnante conséquence de la relation  $E = mc^2$  d'Albert Einstein.

Comment évaluer la résistance à la traction d'une corde pour éviter qu'elle ne casse ? La tension d'une corde indique combien d'énergie vous devez dépenser pour l'allonger : plus la corde est tendue, plus cela coûte en énergie pour l'allonger. Un élastique a une certaine tension parce que vous dépensez de l'énergie à réarranger ses molécules pour l'étirer : quand les molécules sont faciles à réarranger, la tension est faible ; quand il faut beaucoup d'énergie pour réarranger les molécules, la tension est élevée.

Réarranger les molécules n'est pas la seule façon d'allonger la corde. Il est aussi possible d'ajouter des molécules, une à une, à une extrémité (ce qui revient à coller un bout de corde à la précédente). L'énergie fournie pour créer les molécules que l'on colle est donnée par la relation d'Einstein,  $E = mc^2$  : l'énergie est égale au produit de la masse ( $m$ ) du nouveau segment de corde par le carré de la vitesse de la lumière ( $c^2$ ).

C'est une façon très coûteuse de rallonger une corde. On peut montrer que ce raisonnement fournit une limite supérieure au coût en énergie pour allonger une corde, et donc une limite théorique à la tension de la corde indépendamment de sa composition. Aucune corde ne pourra résister à une tension supérieure à la masse par unité de longueur multipliée par  $c^2$ .

Cette limite fondamentale de la résistance des matériaux laisse une grande marge

de progrès. La résistance de l'acier est des centaines de milliards de fois inférieure à cette limite théorique et, à masse égale, la résistance des nanotubes de carbone reste encore des centaines de millions de fois plus faible. Cette limite théorique signifie aussi que nous ne pouvons pas améliorer indéfiniment nos matériaux, tout comme nos efforts pour nous propulser plus rapidement sont limités par la vitesse de la lumière.

Il existe un matériau hypothétique qui atteint précisément la limite. Ce matériau n'a jamais été observé dans un laboratoire, et certains physiciens doutent même de son existence, mais il a déjà un nom : la corde

réaliser cet exploit, ce sont bien les cordes quantiques ; réciproquement, si les cordes quantiques n'y parviennent pas, les trous noirs n'ont rien à craindre.

À nouveau, nous rencontrons un obstacle : les cordes quantiques ne sont pas tout à fait assez solides pour l'usage que nous voulons en faire. Un rien plus solides et il serait « facile » de construire un ascenseur spatial, même autour d'un trou noir ; un peu plus fragiles, et le projet serait désespéré : la corde casserait sous son propre poids. Les cordes quantiques sont exactement à la limite : un câble constitué de cordes quantiques et qui pend vers la surface d'un trou noir a juste assez de résistance pour supporter son propre poids, mais il ne peut pas supporter la charge de l'ascenseur. La cage est de trop.

Le câble peut donc atteindre l'atmosphère dense du trou noir, mais il ne suffit pas pour l'exploiter. Une solution serait de descendre le câble seulement dans la haute atmosphère : la quantité d'énergie y est limitée, mais exploitable.

Cependant, ce régime maigre ne vaut pas beaucoup mieux que de simplement attendre que le trou noir s'évapore, le rendement étant quasiment le même. En braconnant quelques photons ici ou là, nous pourrions éventuellement raccourcir un peu la durée de vie d'un trou noir, mais nous ne parviendrions pas à mettre en place le type d'extraction industrielle qui serait nécessaire pour alimenter une civilisation affamée.

Le problème posé au départ est encore une fois « tiré par les cheveux », mais il nous a permis de nous aventurer aux limites de la physique, là où la vitesse finie de la lumière est un obstacle. Celle-ci nous empêche d'échapper à l'horizon d'un trou noir ou de construire un ascenseur cosmique, puisqu'une corde ne peut jamais être plus solide que le carré de la vitesse de la lumière multiplié par sa masse par unité de longueur.

Les trous noirs peuvent être tranquilles : on ne pourra pas leur soutirer de l'énergie plus vite qu'ils ne s'évaporent. Heureusement, l'humanité a encore de beaux jours devant elle pour profiter de la chaleur du Soleil. ■

**Les  
particules**  
**qui foisonnent à  
l'horizon d'un trou noir**  
constituent un réservoir  
d'énergie. Les récupérer  
est-il une utopie ?

quantique. Issue de la « théorie des cordes », les chercheurs l'étudient principalement car elle pourrait être le constituant fondamental de la matière. Pour nos besoins, ce n'est pas son caractère fondamental qui importe, mais sa résistance.

Les cordes quantiques sont solides. Il serait possible de suspendre l'Everest à un câble constitué de cordes quantiques de même taille et de même poids qu'un lacet. Les défis d'ingénierie les plus redoutables exigent les matériaux les plus performants. Si nous voulons construire un ascenseur spatial autour d'un trou noir, notre meilleur espoir est d'utiliser des cordes quantiques ; là où les nanotubes ont échoué, les cordes fondamentales réussissent peut-être. Si un matériau peut

# Intelligence

# Les babouins passent le test

Joël Fagot et Anaïs Maugard

Experts en analogies, capables de reconnaître leur ignorance, moins aptes à réfléchir quand ils sont stressés... Tel est le portrait des babouins que dressent des études d'un genre nouveau, où des tests cognitifs en libre accès sont mis à disposition des singes.





**L**es écrans tactiles arrivent... chez les singes ! En libre accès dans l'enclos des babouins, à la station de primatologie de Rousset, près d'Aix-en-Provence, ils permettent de proposer aux animaux toute une série de tests cognitifs. Et d'apporter de nouvelles preuves expérimentales de la continuité entre les facultés mentales de l'homme et celles des primates non humains, que Charles Darwin évoquait déjà en 1871 dans son ouvrage *La descendance de l'homme et la sélection sexuelle*.

Si les premiers contacts européens avec les singes remontent aux expéditions carthaginoises du V<sup>e</sup> siècle avant notre ère, leur étude scientifique ne commence qu'au XVIII<sup>e</sup> siècle. Les naturalistes, tel Georges-Louis Leclerc de Buffon, en donnent alors une description anatomique précise. Dans les années 1920, les éthologues organisent des expéditions en Afrique et en Asie afin de comprendre leur comportement et leur mode de vie. Ils ramènent quelques spécimens à des zoos ou des collectionneurs privés.

Depuis cette période, les travaux sur les facultés cognitives des primates ont suivi deux voies. La première consiste à observer le comportement des animaux dans leur milieu naturel, la seconde à les étudier en captivité, dans des environnements contrôlés. Chaque approche a apporté son lot de découvertes. Les recherches de terrain ont par exemple révélé l'extraordinaire complexité de l'organisation sociale des singes : la primatologue britannique Jane Goodall a ainsi observé que les chimpanzés de Tanzanie vivent en petits groupes dirigés par un mâle dominant et se coordonnent pour chasser de petits gibiers. En proposant aux singes de résoudre des tâches précises

## L'ESSENTIEL

- À la station de primatologie de Rousset, les babouins ont un accès libre à des tests cognitifs depuis leur enclos.
- Chaque singe y fait environ un millier de tests par jour.
- En augmentant peu à peu la difficulté des tâches, on découvre que les babouins sont capables de mettre en œuvre des capacités cognitives élaborées, auparavant considérées comme l'apanage de l'homme.
- On s'aperçoit aussi que le contexte social influence les performances.

© shutterstock.com/Christian Musat (page précédente)

et en récompensant les succès par de la nourriture, les recherches de laboratoire ont quant à elles révélé des capacités cognitives insoupçonnées chez ces animaux. En 1972, le chercheur américain David Premack a notamment appris à une femelle chimpanzé l'utilisation d'un langage simple en combinant des symboles en plastique.

## Un laboratoire où les singes vivent en groupe

Cependant, les animaux captifs ne déploient sans doute pas toutes les ressources cognitives qu'ils mobilisent dans leur milieu naturel. Dans notre équipe, nous avons élaboré une nouvelle stratégie, à mi-chemin entre les études de laboratoire et celles de terrain. Nous avons installé des dispositifs de tests en libre accès dans des compartiments accessibles depuis un enclos de babouins (voir la figure ci-dessous). Chaque singe peut choisir de quitter momentanément son groupe social pour entrer dans un compartiment. Il y trouve un écran tactile dispensant des tests informatisés et un distributeur de récompenses, qui délivre des grains de blé. Chaque babouin porte une puce électronique, grâce à laquelle nous déterminons son identité.

Cette méthode est inspirée du concept de conditionnement opérant, proposé par les psychologues américains Edward Thorndike, au XIX<sup>e</sup> siècle, et Burrhus Skinner, au milieu du XX<sup>e</sup> siècle : un animal (ou un homme) tend à reproduire les comportements qui ont une conséquence positive pour lui. Ainsi, quand on récompense les bonnes réponses, l'animal se prête volontairement aux tests. Comme nous avons placé le dispositif au sein de son milieu de vie, il l'utilise tout



## Le babouin sait qu'il sait... ou qu'il ne sait pas

**S**maragdin. Connaissez-vous le sens de ce mot ? Non ? Vous avez alors réalisé votre ignorance et, sans doute, saisi un dictionnaire pour la combler. Autrement dit, vous êtes capable de métacognition, c'est-à-dire de savoir si vous connaissez ou non la réponse et quelles informations vous manquent. Eh bien, les babouins aussi !

Pour le montrer, nous leur avons proposé un apprentissage qui leur a pris plusieurs semaines et des dizaines de milliers d'essais, lors d'une expérience réalisée avec Raphaëlle Malassis, de notre laboratoire, et Gilles Gheusi de

l'Institut Pasteur. Nous avons présenté aux singes une grille de 12 carrés sur un écran d'ordinateur. Au cours du premier affichage, qui ne durait que quelques millisecondes, deux carrés étaient verts et les autres blancs (a). Dans le

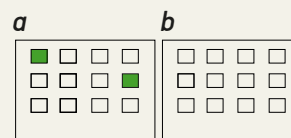
second affichage, tous les carrés de la matrice devenaient blancs (b). Pour obtenir une récompense, les babouins devaient toucher les deux carrés qui étaient en vert dans le premier affichage.

Toutefois, ils avaient la possibilité de ne pas répondre directement et de revoir la partie gauche ou droite du premier affichage, en touchant respectivement la lettre L (pour *Left*) ou R (pour *Right*) située en bas de l'écran. C'est ce qu'ils se sont mis à faire après la phase d'apprentissage, lorsqu'ils

avaient mal vu l'une ou l'autre partie du premier écran. Ainsi, ils savaient non seulement quand ils ignoraient la réponse, mais aussi quelles informations leur manquaient et comment les trouver.

Au fait, smaragdin est un adjectif qui signifie « d'un vert émeraude »...

- J. F. et A. M.



en restant dans son groupe social – ce qui permet notamment d'étudier l'influence du groupe sur sa cognition.

À l'inverse, dans la plupart des laboratoires, les lieux d'élevage sont séparés du lieu d'expérimentation et les singes sont déplacés pour les tests. Le chercheur choisit l'individu avec lequel il veut travailler et lui impose son rythme. Ici, la démarche est tout autre. Lorsque nous débutons une expérience, les tests sont proposés à l'ensemble des 24 animaux du groupe. Certains babouins apprennent la tâche et d'autres non, car ils n'ont pas tous la même capacité à comprendre les problèmes posés.

À l'ouverture du laboratoire, les singes ont vite découvert qu'ils pouvaient obtenir des récompenses en touchant les écrans

tactiles. Ils ont commencé à effectuer de nombreux passages quotidiens dans les compartiments expérimentaux et nous avons peu à peu augmenté la complexité des problèmes posés. Nous collectons quelque 25 000 essais par jour, ce qui correspond à une moyenne d'environ 1 000 participations quotidiennes par animal. De toute évidence, les singes aiment participer à nos expériences. Ils travaillent par séances de quelques minutes et les ordinateurs ne bouleversent pas leurs comportements spontanés ni leurs relations sociales.

En conséquence, nous avons pu proposer aux singes des apprentissages particulièrement complexes, nécessitant parfois plusieurs dizaines de milliers d'essais. Nous avons ainsi révélé des facultés cognitives insoupçonnées. Le babouin est par exemple capable de métacognition (*voir l'encadré ci-dessus*) : il sait qu'il sait – ou qu'il ne sait pas !

Ses capacités de raisonnement analogique (sa faculté à trouver le bon choix par analogie avec un modèle) se sont aussi révélées très élaborées. On sait depuis plus de 30 ans que les singes sont capables de distinguer des relations entre objets. En 1984, Anthony Wright, de l'Université du Texas, a par exemple appris à des singes macaques à appuyer sur un levier si on leur montre deux objets différents, et à ne pas appuyer si les objets sont identiques. Les animaux ont donc développé les concepts d'identité et de différence entre objets.

En utilisant le protocole de test en libre accès, nous avons montré que le babouin est

### ■ LES AUTEURS



Joël FAGOT est directeur de recherche au CNRS. Il dirige la plateforme Cognition et comportement du primate, à la station de primatologie de Rousset, et l'équipe Cognition comparée, de l'Université d'Aix-Marseille.

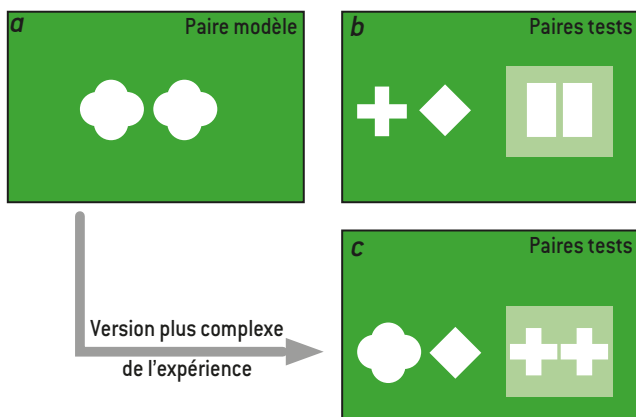
Anaïs MAUGARD est chercheuse à l'Université d'Aix-Marseille.



© CNRS Photographique - FRESSILLON Cyril (a.c.) - Joël Fagot

### DES TESTS EN LIBRE-SERVICE

sont mis à disposition des singes, qui vivent dans un enclos de 750 mètres carrés et peuvent entrer quand ils le souhaitent dans les bungalows adjacents (a). Chacun de ces derniers comporte cinq postes expérimentaux, équipés d'un écran tactile et d'un distributeur de récompenses (b). Une puce électronique permet d'identifier le singe qui se positionne devant l'écran. Le babouin interagit alors avec l'ordinateur (c) et reçoit une récompense alimentaire lorsqu'il donne la bonne réponse au test.



**LE RAISONNEMENT ANALOGIQUE**, autrement dit la faculté de trouver le bon choix par analogie avec un modèle, n'a pas de secret pour les babouins. Ils savent notamment reconnaître quand deux éléments ont la même relation au sein d'une paire « modèle » et au sein d'une paire « test ». Ici, les deux éléments de la paire modèle sont identiques (a) et les babouins doivent donc choisir la paire de droite sur l'écran de test (b, en surbrillance). Dans une version plus complexe de cette expérience, la « mauvaise paire » reprend l'un des deux éléments de la paire modèle et a donc un aspect visuel plus proche (c). Dans ce cas, le babouin choisit d'associer les paires en considérant les relations exprimées (il sélectionne toujours la paire dont les éléments sont identiques, même si elle ressemble moins au modèle), alors que les enfants de huit ans n'y parviennent pas spontanément.

capable d'associer des relations. De nombreux chercheurs considéraient jusqu'alors cette aptitude comme l'apanage de l'homme. C'est elle qui nous permet par exemple de rapprocher la relation qui existe entre un chat et une souris de celle qui existe entre un oiseau et un ver de terre : dans les deux cas, le premier mange le second.

Nous avons élaboré un protocole pour étudier ce type de raisonnement complexe chez le babouin. Dans un premier temps, nous affichons à l'écran une paire de formes identiques ou différentes (la paire « modèle »), que le babouin doit mémoriser et toucher (voir la figure ci-dessus). Nous présentons ensuite deux nouvelles paires de formes aux singes, l'une constituée de deux formes identiques et l'autre de deux formes différentes. Pour obtenir une récompense alimentaire, le babouin doit toucher la paire qui exprime la même relation que le modèle. Après la phase d'apprentissage (trop longue pour être possible avec un dispositif de tests classique), on teste les singes avec de nouvelles formes, qu'ils n'ont jamais vues. Dans ces conditions, quelques babouins réussissent la tâche, ce qui montre leur capacité à établir des relations entre relations : tandis que dans les travaux d'Anthony Wright, les babouins avaient juste besoin de comparer deux objets, ils devaient ici analyser la relation liant les objets de la paire modèle, puis celles existant entre les éléments de chaque paire test, et enfin déterminer que l'une de ces relations était identique au modèle.

Une autre version de cette tâche, plus difficile, consiste à rendre la « mauvaise » paire test – celle que le singe ne doit pas sélectionner – davantage ressemblante au modèle que la bonne (voir la figure ci-dessus).

Le singe a alors le choix entre deux réponses, l'une fondée sur la relation entre les éléments de chaque paire et l'autre sur leur aspect visuel global. Les babouins adoptent de préférence la première stratégie, c'est-à-dire qu'ils font un lien entre les relations.

En 2007, Dedre Gentner, de l'Université Northwestern, aux États-Unis, a soumis des enfants d'âges différents à ce test. Dès quatre ans et demi, les enfants savent associer les relations, mais ils ne le font que si on nomme les paires de formes, éventuellement à l'aide de mots imaginaires. L'expérimentateur montre par exemple la paire modèle et dit : « Regarde, c'est un truffet ! ». Puis, quand l'enfant est confronté aux paires tests, il lui demande : « Lequel, parmi ces deux-là, est aussi un truffet ? ». Lorsqu'on ne nomme pas les paires, c'est-à-dire dans des conditions comparables aux tests chez le babouin, les enfants de quatre et huit ans abandonnent les stratégies relationnelles pour ne regarder que les formes. Les babouins semblent donc avoir spontanément des stratégies cognitives plus complexes dans cette tâche que des enfants en classe de CE2 à qui on ne donne aucune clef verbale.

## Les babouins, plus doués que des enfants de CE2 ?

Seuls une dizaine de singes sur les 24 individus du groupe ont accompli avec succès cette tâche complexe d'association de relations. De façon générale, nous constatons souvent une grande variabilité entre les animaux. D'où vient-elle ? L'explication réside peut-être dans des différences

d'efficacité des fonctions exécutives. Ces fonctions cognitives permettent, par exemple, de diriger volontairement l'attention vers les éléments pertinents d'un problème, ou de décider de changer de stratégie face à un obstacle. Chez l'homme, plusieurs études ont montré que les caractéristiques de ce contrôle exécutif conditionnent les capacités à raisonner. Si ce système de contrôle est plus ou moins efficace chez les singes, cela expliquerait les différences de performances.



© Shutterstock.com/MatildaTH

Avec Élodie Bonté et Timothy Flemming, de notre laboratoire, nous avons mis ce postulat à l'épreuve chez le babouin, grâce à des tests sur ordinateur. Nous avons proposé aux singes une tâche dite de Wisconsin, où trois éléments sont affichés à l'écran et où l'animal doit en toucher un selon une règle particulière (par exemple, « toucher l'élément jaune, quelle que soit sa forme »); il apprend cette règle au fil des essais, grâce à l'obtention d'une récompense lors de chaque bonne réponse. Une fois que l'animal a compris la règle à suivre, on la change soudainement. Elle devient par exemple « toucher le triangle, quelle que soit sa couleur ». Les singes doivent alors faire preuve de flexibilité cognitive pour s'adapter rapidement.

Nous avons constaté que les babouins y parviennent d'autant mieux qu'ils sont jeunes (voir la figure ci-dessous) – un phénomène également observé chez l'homme. En outre, l'analyse croisée des performances dans la tâche d'association de relations et dans celle mesurant l'efficacité du contrôle exécutif a confirmé que ces caractéristiques sont liées: les singes qui ont la meilleure flexibilité cognitive sont ceux qui réussissent le mieux dans la tâche d'association de relations.

## Une source de bien-être

**Pour vérifier que les tests ne perturbent pas les babouins, les auteurs les ont entraînés à sucer des cotons, afin de collecter des échantillons de salive. Ils ont mesuré la concentration de cortisol salivaire, une hormone libérée en cas de stress. Cette concentration était plus faible quand les babouins avaient accès aux ordinateurs. Les écrans tactiles leur permettent de diversifier leurs activités, ce qui atténue leur stress et améliore leur bien-être général.**



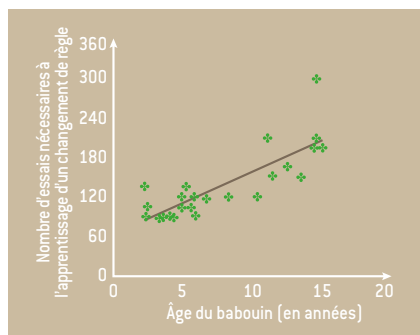
© Julie Gullstrand

Notre dispositif offre également une occasion unique d'examiner par une démarche expérimentale l'influence des interactions sociales sur les performances cognitives des singes. Dans la nature, ces animaux vivent en troupes hiérarchisées de quelques dizaines à quelques centaines d'individus, qui ont des interactions très riches. À la station de primatologie de Rousset, les babouins forment aussi des groupes sociaux, dont les tests ne les isolent pas.

## L'influence du groupe

Au cours de la journée, plusieurs singes travaillent parfois de conserve dans des compartiments de test adjacents, dont les parois sont en Plexiglas transparent, de sorte que chaque individu peut voir ses congénères à l'œuvre. À d'autres moments, seul un babouin est présent, tandis que les autres restent dans l'enclos. On peut donc mesurer l'effet des partenaires sociaux sur les performances des babouins.

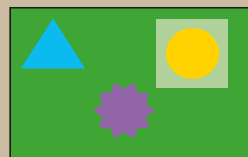
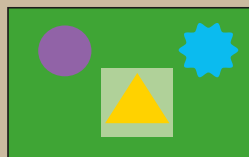
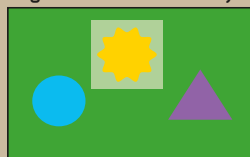
Dans une étude à paraître, réalisée avec Pascal Huguet, de notre laboratoire, et Isabelle Barbet, du CNAM (Conservatoire national des arts et métiers), nous avons proposé aux animaux une tâche simple:



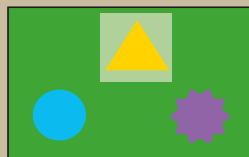
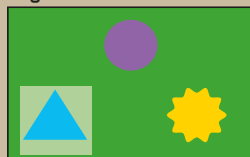
### LES « VIEUX » SONT MOINS FLEXIBLES

aussi chez les singes. Dans cette expérience, l'animal doit d'abord toucher l'objet de couleur jaune (ci-dessous, ligne du haut), puis la règle change: il doit désormais sélectionner le triangle (ci-dessous, ligne du bas). D'autres changements de règle ont lieu, et à chaque fois le nombre d'essais nécessaires pour que le singe se remette à répondre correctement est mesuré. Les jeunes ont besoin de bien moins d'essais que les plus âgés pour apprendre une nouvelle règle (ci-contre).

Règle 1 : sélectionner l'objet jaune



Règle 2 : sélectionner le triangle



Des  
**dizaines**  
de milliers d'essais  
sont parfois nécessaires  
pour un apprentissage.

s'ils voyaient d'abord un rond, ils devaient toucher la forme située à gauche de l'écran lors de l'affichage suivant; si c'était un polygone, ils devaient toucher la forme située à droite (*voir la figure ci-dessous*). Nous avons montré que la vitesse à laquelle ils répondent est liée à la présence de congénères dans les postes de travail adjacents: cette présence tend à accélérer la réponse, en particulier quand la tâche est bien apprise.

Ce n'est pas tout. Les interactions sociales influent sur les performances cognitives d'une autre façon: en modifiant l'état émotionnel. Chez l'homme comme chez l'animal, les échanges avec autrui apaisent, stressent, excitent, attristent, etc. En 2014, nous avons testé si les interactions spontanées des babouins modifient leurs performances dans des tâches informatisées (*voir l'encadré page ci-contre*).

Nous avons proposé aux animaux un test où ils devaient reconnaître et toucher un stimulus en forme de T à l'écran, caché au milieu de L d'orientations variées. Parallèlement, nous avons relevé la totalité des comportements sociaux manifestés dans l'enclos. Cette étude a confirmé que les performances sont modifiées par les événements

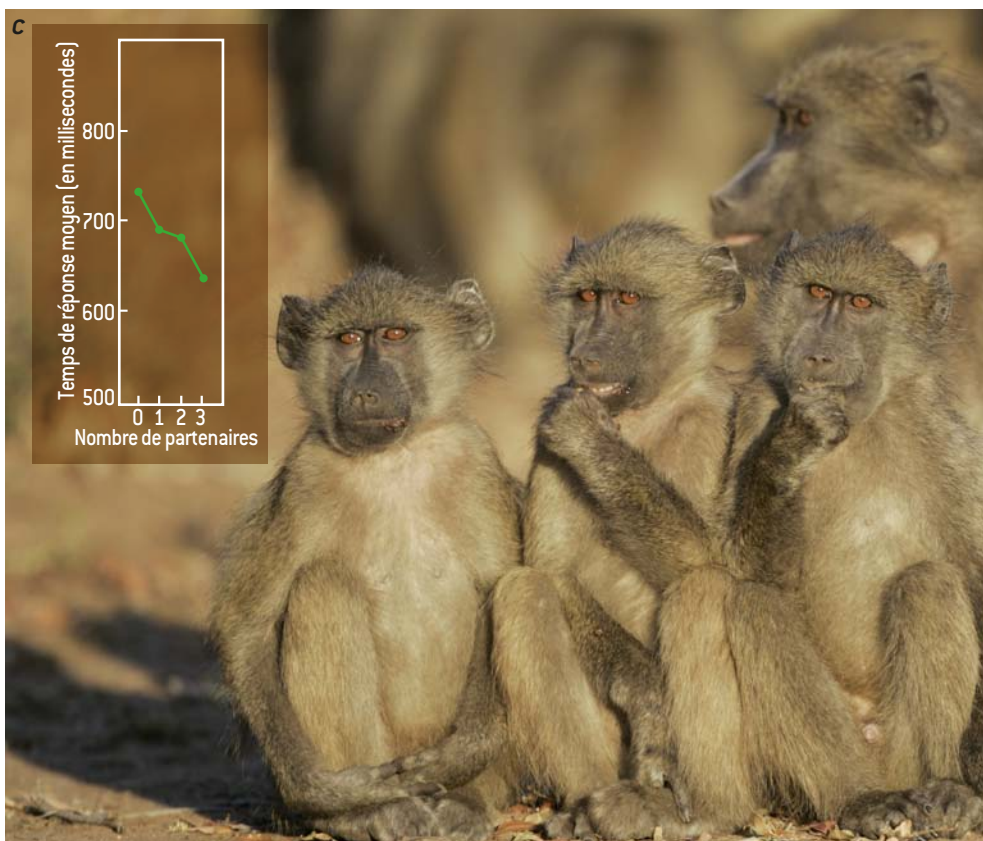
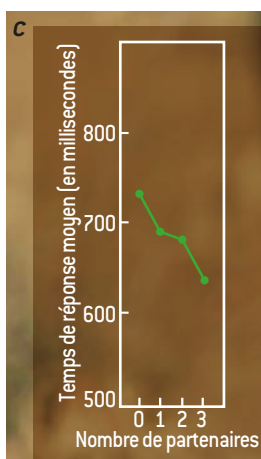
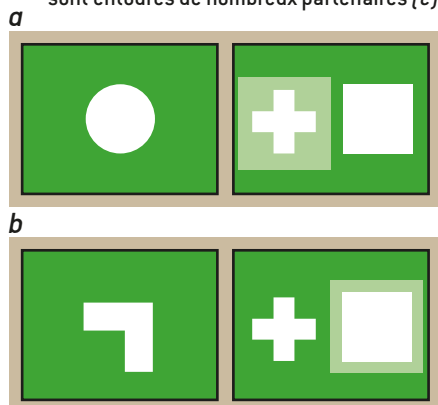
survenus quelques minutes avant la réalisation de la tâche. Ainsi, les singes sont plus rapides pour reconnaître la forme à l'écran après une interaction sociale positive qu'après un échange houleux avec leurs congénères. De même, plusieurs études ont montré l'influence d'échanges stressants sur les performances cognitives chez l'homme.

Nos résultats révèlent une interaction des fonctions cognitives qui gèrent la vie sociale avec celles impliquées dans la résolution de problèmes non sociaux. Jusqu'à présent, peu de travaux ont porté sur cette interaction. Ces données préliminaires montrent tout le potentiel de cette nouvelle approche expérimentale pour l'étude des influences sociales sur la cognition.

### Quand les cultures évoluent

En 2014, nous avons aussi étudié un autre aspect de la vie sociale: la transmission culturelle. Ce phénomène, observé chez de nombreux animaux, concerne divers aspects du quotidien: utilisation d'outils, chants particuliers, stratégies de recherche de nourriture... Mais les dépositaires successifs

**DES FANFARONS ?** Dans le test ci-dessous, quand le premier écran représente un cercle, le babouin doit choisir la croix sur le second (*a*). Quand c'est d'abord un polygone qui est affiché, le singe doit toucher le carré (*b*). Après quelques milliers d'essais, les babouins deviennent d'autant plus rapides pour cette tâche qu'ils sont entourés de nombreux partenaires (*c*).



**V**ous avez frôlé l'accident en voiture, vous vous êtes disputé avec un collègue ou vous avez échangé un geste tendre avec votre partenaire ? Vos performances cognitives s'en ressentiront. Avec Yousri Marzouki, Annabelle Goujon et Julie Gullstrand, de notre laboratoire, nous avons étudié si le même phénomène s'observe chez les babouins. Une interaction positive, tel un épouillage (a), les calme-t-elle et améliore-t-elle leurs performances aux tests informatisés ? Pour le déterminer, nous avons répertorié toutes les interactions sociales que les singes manifestent spontanément dans leur enclos (b). Nous les avons analysées en corrélation avec les résultats à un test informatisé, où les babouins devaient reconnaître un stimulus en forme de T parmi d'autres éléments



distracteurs. Cette étude a confirmé que les performances sont modifiées par l'état émotionnel du singe, qui dépend des événements survenus dans l'enclos quelques minutes avant

le test. Ainsi, les singes reconnaissent plus rapidement la forme à l'écran après une interaction sociale positive qu'après un échange houleux.

— J. F. et A. M.

améliorent-ils peu à peu ce qu'ils reçoivent ? Jusque-là, on n'avait constaté une telle évolution cumulative que chez l'homme...

Avec Nicolas Claidière, de l'Université d'Aix-Marseille, nous nous sommes demandé si les babouins en étaient aussi capables. Nous avons conçu une tâche informatisée où la production d'un participant est utilisée comme entrée pour le participant suivant. Chez l'homme, on applique par exemple cette méthode avec des langages simplifiés : le premier participant doit apprendre un langage puis le transmettre au deuxième, et ainsi de suite. On constate alors, au fil des transmissions, une amélioration des performances (les participants mémorisent de plus en plus fidèlement le langage), une structuration (des règles syntaxiques apparaissent) et une « spéciation » (chaque chaîne de transmission aboutit à un langage spécifique).

Dans notre étude, une grille comprenant quatre carrés rouges au milieu de douze blancs était présentée à un singe, puis tous les carrés devenaient blancs et l'animal devait toucher l'emplacement de ceux qui étaient rouges auparavant.

Il recevait une récompense s'il avait trois ou quatre bonnes réponses, puis le motif de quatre carrés qu'il avait touché était présenté au participant suivant.

Nous avons observé les trois caractéristiques d'une évolution culturelle cumulative : l'amélioration des performances (les participants successifs réussissaient de plus en plus souvent), la structuration (les motifs évoluaient, finissant fréquemment par se constituer de quatre cases adjacentes) et la spéciation (chaque chaîne de transmission aboutissait à un résultat différent). Les babouins ont donc les capacités cognitives pour faire évoluer ce qu'ils se transmettent.

Nos recherches révèlent l'intérêt d'enrichir le contexte de vie et d'étude de l'animal en laboratoire, et notamment son contexte social. D'autres équipes, au Japon, en Europe et aux États-Unis, se sont inspirées de notre approche et commencent à la mettre en œuvre. Il y a fort à parier que ce nouveau mode d'expérimentation se développera, car il permet l'étude des facultés cognitives dans leurs multiples dimensions, tout en protégeant le bien-être de l'animal. ■

## ■ BIBLIOGRAPHIE

Y. Marzouki *et al.*, Baboons' response speed is biased by their moods, *PLoS One*, vol. 9(7), e102562, 2014.

N. Claidière *et al.*, Cultural evolution of systematically structured behaviour in a non-human primate, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 281, 2014.

J. Fagot *et al.*, Effects of freely accessible computerized test systems on the spontaneous behaviors and stress level of Guinea baboons (*Papio papio*), *American Journal of Primatology*, vol. 76, pp. 56-64, 2013.

J. Fagot, Une nouvelle procédure d'expérimentation comportementale à l'interface entre les approches « Naturalistes » et « Généralistes » de la cognition du primate, *Revue de primatologie*, vol. 2, 2010.

En 1846, sur les indications d'Urbain Le Verrier, on découvre la planète Neptune. Pour l'astronome français, c'est la gloire. Ses contemporains et successeurs saluent sa performance et en oublient de vérifier la précision qu'il annonce...

Jacques Gapaillard

# NEPTUNE L'erreur de Le Verrier

« Cette étoile n'est pas sur la carte ! », s'exclame le jeune Heinrich d'Arrest sous la coupole de l'Observatoire de Berlin, alors qu'il assiste l'astronome Johann Galle dans une recherche insolite. La scène se déroule le 23 septembre 1846, peu avant minuit à l'heure de la capitale prussienne. Ce jour-là, Galle a reçu une lettre du Français Urbain Le Verrier, dont d'importants travaux en mécanique céleste ont assis l'autorité dans le domaine. Or cette lettre contient des indications sur la position d'une planète inconnue, qui serait responsable d'anomalies constatées dans le mouvement de la planète Uranus. Il n'était

pas dans les habitudes des observatoires de suspendre leurs travaux en cours, surtout pour rechercher un astre hypothétique issu de spéculations mathématiques. Pourtant, Galle s'est montré persuasif et a obtenu de son directeur, Johann Encke, l'autorisation d'entamer la recherche le soir même.

Dans la région du ciel à explorer, Galle ne détecte d'abord aucune « étoile » qui présenterait un diamètre apparent, et qui pourrait donc être la planète cherchée. Par ailleurs, aucune carte céleste dont dispose l'observatoire ne semble appropriée à cette recherche. D'Arrest suggère alors de regarder si, parmi les toutes nouvelles cartes de

Carl Bremiker éditées par l'Académie de Berlin et non encore diffusées, il ne s'en trouverait pas une qui couvrirait la partie du ciel où Le Verrier situe sa planète. C'est le cas ! Grâce à cette carte plus détaillée, la recherche est de courte durée. Bientôt, Galle énonce les coordonnées d'une étoile qu'il voit dans le champ de sa lunette et qui ne figure pas sur la carte. Le temps de vérifier, la nuit suivante, que l'étoile en surnombre s'est bien déplacée par rapport à ses voisines, et qu'elle n'est donc pas une étoile, Galle écrit à Le Verrier, le 25 septembre : « Monsieur, la planète, dont vous avez signalé la position, *réellement*

