

quelque 250 galaxies supplémentaires présentant des décalages vers le rouge compris entre 6 et 8, et une poignée d'autres dont le décalage pourrait aller jusqu'à 11.

Un nouveau projet nommé *Frontier Fields* pour *Hubble* va permettre aux astronomes de chercher des galaxies lointaines et peu lumineuses, situées derrière six amas particulièrement massifs. « Dans les trois années à venir », dit Jennifer Lotz, membre du projet, « nous allons regarder chaque amas pendant 140 orbites de *Hubble* environ (chaque orbite correspond à 45 minutes de temps d'observation), ce qui nous permettra de sonder l'Univers plus profondément que nous ne l'avons jamais fait. »

Un autre phénomène pourrait aider les astrophysiciens à sonder les débuts de l'Univers. Quand ils ont été découverts dans les années 1960, les sursauts gamma (de courtes salves de rayonnement à hautes fréquences qui apparaissent dans des directions aléatoires) étaient un mystère total. Aujourd'hui, les astronomes pensent que beaucoup d'entre eux apparaissent quand des étoiles massives meurent : elles s'effondrent en formant un trou noir et émettent des jets de rayonnement gamma. Quand ces jets heurtent les nuages de gaz environnants, ils déclenchent une émission secondaire de lumière visible et infrarouge si intense qu'elle peut être détectée par les télescopes classiques.

Nouvel espoir

Toutefois, la détection des sursauts n'est pas chose aisée. Elle commence avec l'Observatoire orbital *Swift* qui surveille le ciel, lance immédiatement une alerte en cas de détection d'un sursaut gamma et transmet les coordonnées du sursaut aux télescopes au sol qui effectuent les mesures de décalage vers le rouge. Le temps de réaction est crucial.

L'intensité des sursauts gamma surpasse celle de tous les autres objets cosmiques. Edo Berger, un astrophysicien de Harvard spécialiste des sursauts souligne « qu'ils sont probablement plus brillants que les galaxies d'un facteur un million, et qu'ils sont 10 à 100 fois plus brillants que les quasars juste après leur apparition ». Il n'y a pas besoin d'un long temps d'exposition pour les voir avec *Hubble*. En 2009, un télescope à Hawaï a mesuré pour un sursaut un décalage vers le rouge de 8,2, ce qui le place à 600 millions d'années après le Big Bang.

La cartographie des nuages d'hydrogène

Les radioastronomes ne sont pas en reste dans l'étude de l'âge sombre. Ils ont prévu de cartographier les nuages d'hydrogène neutre. Ceux-ci émettent des ondes radio qu'il sera possible de détecter avec des réseaux d'antennes tel le LOFAR (Low Frequency ARray), qui comporte 50 000 antennes réparties sur cinq pays d'Europe.

Les astronomes devraient voir les nuages d'hydrogène neutre disparaître progressivement lors de la réionisation au cours du premier milliard d'années de l'histoire de l'Univers.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Loeb, L'Univers à l'âge des ténèbres, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

R. Barkana, The first stars in the universe and cosmic reionization, *Science*, vol. 313, pp. 931-934, 2006.

V. Bromm et R. B. Larson, The first stars, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 42, pp. 79-118, 2004.

J. Miralda-Escudé, The dark age of the Universe, *Science*, vol. 300, pp. 1904-1909, 2003.

L'éclair était si brillant qu'il aurait pu être vu à un décalage vers le rouge de 15 ou même 20, ce qui le placerait moins de 200 millions d'années après le Big Bang, non loin de l'époque où les toutes premières étoiles brillaient. En outre, ces étoiles massives peuvent probablement produire des sursauts gamma encore plus brillants quand elles meurent.

Les sursauts gamma ont un avantage. Les quasars n'apparaissent que dans les galaxies dotées d'un trou noir supermassif et seules les galaxies les plus brillantes sont visibles pour *Hubble*. Les sursauts, eux, sont tout aussi puissants dans les petites galaxies que dans les grandes.

Des sursauts difficiles à détecter

Mais ils présentent un inconvénient : 99 pour cent des jets qui produisent les sursauts gamma ne sont pas dirigés vers la Terre, ce qui nous empêche de les voir. Et parmi ceux qui restent et que détectent les satellites (un par jour environ), seule une minuscule fraction présente un décalage vers le rouge élevé. Pour recueillir un échantillon représentatif de sursauts à décalage vers le rouge extrêmement élevé, il faudrait une décennie, voire davantage. Il faudrait alors penser à un satellite qui remplacerait *Swift* et transmettrait les coordonnées des sursauts au télescope *James Webb* ou aux instruments au sol de la classe des 30 mètres qui devraient entrer en service dans la prochaine décennie.

Dans tous les cas, dès que le télescope *James Webb* et la prochaine génération de télescopes géants au sol commenceront à observer le ciel, les astronomes seront en mesure de cataloguer des objets beaucoup plus vieux et moins lumineux qu'aujourd'hui.

Quand les astrophysiciens ont détecté pour la première fois le rayonnement du fond diffus cosmologique en 1965, cela leur a donné une nouvelle méthode pour comprendre l'histoire de l'Univers de sa naissance jusqu'à aujourd'hui. Mais certaines périodes se sont révélées plus difficiles à étudier que d'autres. L'âge sombre en fait partie, mais les différents programmes d'observation des quasars, des sursauts gamma et des galaxies suggèrent que, d'ici quelques années, on comprendra mieux ce qui s'est passé à cette époque. ■

MÉMOIRE: un effet Google

Daniel Wegner et Adrian Ward

?

Les gens ont depuis
toujours compté les
uns sur les autres pour
mémoriser et retrouver
les informations qui leur
sont utiles.

Aujourd'hui, on s'en
remet souvent à Internet,
ce qui influe sur la
mémorisation et sur
la perception de soi.

Un couple reçoit une invitation à une soirée d'anniversaire. Grâce à une longue vie commune, les deux partenaires se partagent intuitivement les tâches. L'un d'eux retient le type de la soirée (habillée ou décontractée), l'autre le lieu et l'heure.

Dans une certaine mesure, nous délégons tous des tâches mentales aux autres. Nous répartissons de façon automatique la responsabilité de mémoriser les nouvelles informations entre les membres du groupe social auquel nous appartenons, n'en retenant qu'une partie nous-mêmes. Quand nous échouons à retrouver un nom ou à réparer un appareil en panne, nous demandons à un proche qui est compétent.

Votre voiture fait un bruit anormal ? Vous appelez Charles, un ami passionné de mécanique. Vous avez oublié qui joue dans *Casablanca* ? Philippe, cinéphile averti, le saura certainement. D'innombrables connaissances sont disponibles parmi les membres d'une entité sociale, que celle-ci soit un couple ou le service de comptabilité d'une multinationale. Nous ne disposons pas juste des données stockées dans notre cerveau ; nous savons aussi quelles informations trouver dans celui des autres.

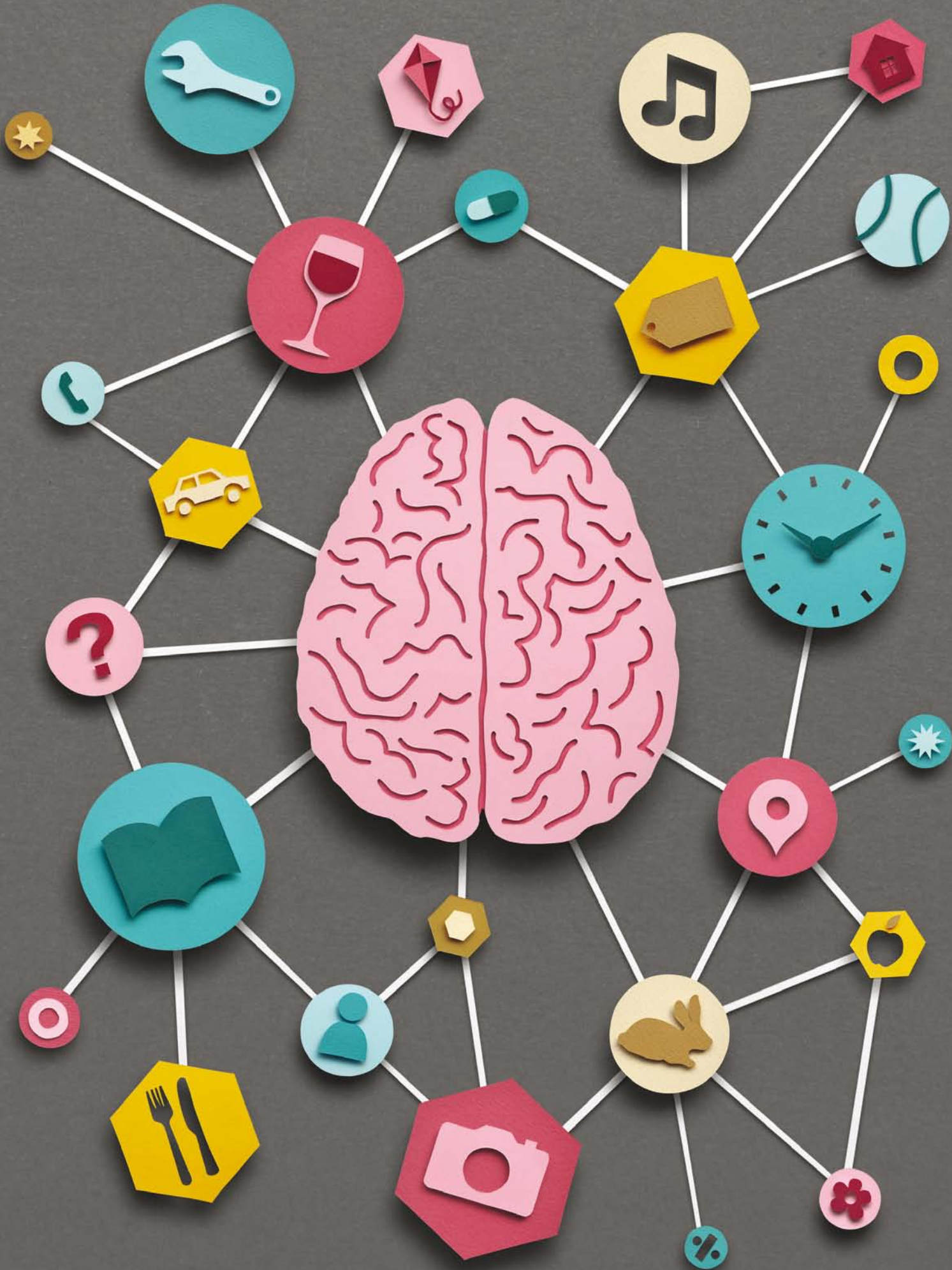
Cette division du travail permet d'éviter une multiplication inutile des efforts et d'étendre les capacités mémorielles de l'ensemble du groupe. Quand on délègue à d'autres la responsabilité de certains types d'informations, on libère des ressources cognitives, que l'on utilise en partie pour accroître ses connaissances dans le domaine dont on s'occupe. Ainsi, chacun a accès à un savoir plus étendu et plus approfondi que s'il ne comptait que sur lui-même. La mémoire distribuée lie le groupe, sans lequel ses membres passeraient à côté d'informations essentielles. Séparé, notre couple d'invités à la soirée d'anniversaire serait en mauvaise posture : l'un des partenaires errerait dans les rues en smoking, tandis que l'autre arriverait à l'heure, mais en T-shirt.

Cette tendance à répartir l'information dans ce qu'on nomme un système de mémoire transactive s'est développée dans un monde d'interactions directes, où le cerveau humain était le meilleur système de stockage. Or le développement d'Internet a changé la donne. Nos travaux suggèrent que nous traitons ce réseau presque de la même façon qu'un partenaire humain de notre mémoire transactive. Nous lui livrons

L'ESSENTIEL

- Jadis, la mémorisation d'informations était partagée entre les membres d'un réseau social : on recourait à ses amis et ses connaissances pour savoir comment cuire un rôti ou réparer une fuite.
- Internet a changé la donne. Désormais, il est fréquent d'effectuer une recherche rapide sur le Web plutôt que d'appeler un ami.
- La nouvelle accessibilité des informations modifie la perception subjective de soi, car les frontières entre les souvenirs personnels et ce qui est sur le Web commencent à se brouiller.

© Owen Giffen



nos souvenirs aussi naturellement qu'à un proche. Cependant, Internet diffère d'un partenaire humain : il en sait davantage et répond plus vite. Presque toute l'information connue y est aujourd'hui accessible grâce à une simple recherche. Internet pourrait être en train de remplacer non seulement notre réseau humain de sources externes de mémoire, mais aussi nos facultés cognitives. Ainsi, il éliminerait le besoin de partenaires avec qui partager l'information et éteindrait le réflexe de garder les faits importants en mémoire. C'est ce que nous nommons *l'effet Google*.

En 2011, une expérience a révélé à quel point l'ordinateur a déjà commencé à se substituer aux amis ou aux membres de la famille pour partager les tâches quotidiennes de mémoire. Betsy Sparrow, de l'Université Columbia, Jenny Liu, alors à l'Université du Wisconsin-Madison, et l'un d'entre nous (D. Wegner) ont demandé aux participants d'écrire sur un ordinateur 40 faits notables, tels que : « L'œil d'une autruche est plus gros que son cerveau ». Ils ont indiqué à la moitié des participants que leur travail serait sauvegardé et à l'autre moitié qu'il serait effacé. En outre, ils ont demandé à la moitié de chaque groupe de mémoriser les informations.

Les chercheurs ont ainsi constaté que ceux qui croyaient que l'ordinateur avait sauvegardé la liste de faits les restituaient beaucoup moins bien. Les participants semblaient traiter l'ordinateur comme les partenaires de mémoire transactive que nous avons commencé à étudier il

y a plusieurs décennies : ils se déchargeaient des informations sur lui plutôt que de les stocker en eux-mêmes. Cette tendance persistait même chez ceux à qui l'on avait explicitement demandé de garder

Il est parfois plus rapide d'extraire une information d'Internet que de consulter sa propre mémoire.

les informations à l'esprit. La propension à se reposer sur les ressources numériques semble si forte que les gens sont souvent incapables de mémorisation précise dès lors qu'ils sont en présence d'un « compagnon informatique ».

Dans une autre expérience, nous avons étudié à quel point le recours à Internet est un réflexe quand on essaie de répondre à une question. Pour le déterminer, nous avons utilisé ce que les psychologues nomment une tâche de Stroop : les participants examinent une série de mots écrits en diverses couleurs et doivent nommer leur couleur sans se préoccuper de leur signification.

S'ils mettent du temps à nommer la couleur, on en déduit qu'ils peinent à ignorer le sens du mot, car il se rapporte à quelque chose qui occupe leurs pensées. Ainsi si le mot *rouge* est écrit en rouge, ils nomment très vite la couleur. En revanche, ils sont plus longs à répondre si le mot *rouge* est écrit en bleu, par exemple. Ou encore, des personnes affamées sont plus lentes

à nommer la couleur d'un mot relatif à la nourriture que des personnes repues.

Dans notre expérience, les participants exécutaient deux tâches de Stroop : l'une après avoir répondu à des questions faciles de culture générale, l'autre après avoir été confrontés à des questions difficiles, auxquelles ils ne savaient pas répondre par eux-mêmes (par exemple : « Les drapeaux de tous les pays ont-ils au moins deux couleurs ? »). Les mots des tâches de Stroop étaient liés soit à Internet (tels *Google* ou *Yahoo*, écrits respectivement en rouge et en bleu), soit à des marques (*Nike* en jaune ou *Target* en vert, par exemple).

Après avoir répondu aux questions difficiles, les participants étaient notablement plus lents à donner la couleur des mots quand ces derniers étaient liés à Internet, mais pas quand ils se rattachaient à une marque quelconque. Cela suggère qu'Internet vient rapidement à l'esprit quand on ne sait pas répondre à une question. Notre première réaction semble alors de penser à lui, notre « ami » qui sait tout et à qui on peut demander n'importe quoi par une simple pression du doigt ou une commande vocale.

Cependant, en transférant à Internet la responsabilité de toutes sortes d'informations, nous remplaçons peut-être d'autres partenaires potentiels de mémoire transactive, tels des amis, des membres de la famille ou des spécialistes.

Au premier abord, cette transition d'une information répartie entre membres d'un réseau social vers une information confiée

Internet et mémoire : des effets controversés

Si Internet semble bien changer la perception de soi, comme le décrit cet article, son influence négative sur la mémoire est sujette à débat. Les auteurs se fondent sur les expériences de B. Sparrow et ses collègues, qui montreraient que l'on mémorise moins bien les faits quand on pense pouvoir les retrouver. Cependant, dans ces expériences, les faits à mémoriser sont communiqués aux participants par les chercheurs ; il faudrait aussi effectuer des tests de mémoire sur des informations obtenues par une recherche sur le Web. En outre, les différences sont de dix pour cent ou moins, ce qui est peu signifi-

catif dans le domaine de la mémoire, où divers paramètres peuvent faire varier notablement les résultats. Enfin, l'une des expériences nuance le supposé effet négatif : quand on présente une seconde fois les propositions à mémoriser aux participants en leur demandant si elles ont été déclarées sauvegardées ou effacées, ils répondent plus souvent de façon correcte pour les informations déclarées sauvegardées (66 pour cent) que pour celles qui ont été déclarées effacées (51 pour cent). Si l'information elle-même paraît être un peu moins bien retenue quand on sait qu'elle est enregistrée, son sta-

tut (sauvegardé ou non) serait donc mieux mémorisé.

Les effets négatifs d'Internet sur la mémoire semblent également contredits par une enquête récente, où nous avons étudié l'impact des loisirs numériques sur les performances scolaires et cognitives des adolescents. L'enquête portait sur un échantillon représentatif de 27 000 adolescents français de 14 ans et demi, en classe de troisième. De nombreux tests ont été pratiqués, concernant la mémoire des connaissances (dans divers domaines, tels que l'histoire et les sciences), la lecture, le raisonnement... Or les collégiens qui naviguent régulièrement sur

Internet ont une mémoire des connaissances supérieure de 25 pour cent à la moyenne. Les causes restent cependant à déterminer et pourraient être liées à la catégorie socioprofessionnelle des parents, en moyenne plus élevée chez les utilisateurs réguliers du Web.

Des études complémentaires sont donc nécessaires pour préciser les effets d'Internet sur la mémoire. Pour l'instant, en tout cas, celle-ci reste performante et n'est pas prête d'être remplacée par les ordinateurs et les téléphones intelligents.

Alain Lieury

Professeur émérite de psychologie cognitive de l'Université Rennes 2

au nuage numérique peut sembler logique. Les données dispersées sur le Web présentent des ressemblances avec le contenu du cerveau d'un ami. Internet stocke de l'information, l'extrait en réponse aux questions et interagit avec nous de façon étonnamment humaine, par exemple via l'application Siri (un logiciel de commande vocale d'Apple).

Cependant, Internet ne ressemble à aucune personne réelle : il est toujours présent et fonctionnel, et il sait presque tout. L'information accessible avec un smartphone est bien plus riche que ce que peuvent enregistrer des individus, voire des groupes entiers. Elle est constamment mise à jour et, à moins d'une panne, elle n'est pas sujette aux déformations et aux oublis qui touchent les souvenirs mémorisés par le cerveau.

L'efficacité d'Internet contraste avec les méthodes de recherche plus anciennes. Pour demander une information à des amis, il faut les contacter, espérer qu'ils aient la réponse, et attendre qu'ils rassemblent leurs souvenirs. De même, pour rechercher l'information dans un livre, on doit parfois aller à la bibliothèque et parcourir les rayonnages. Avec Google et Wikipédia, elle est disponible en un instant.

Une estime de soi modifiée

Internet perturbe la distinction entre les connaissances internes et externes. Il est parfois plus rapide d'en extraire une information que de consulter sa propre mémoire. Un téléphone renvoie un résultat de recherche si vite que cela peut brouiller la frontière entre les souvenirs personnels et les immenses gisements numériques distribués sur la Toile.

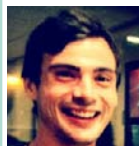
Récemment, à l'Université Harvard, nous avons étudié dans quelle mesure les gens incorporent Internet à leur sens d'eux-mêmes. Pour ce faire, nous avons conçu un questionnaire déterminant la qualité que chacun attribue à sa propre mémoire. Quelqu'un qui est d'accord avec les affirmations « Je suis intelligent » et « Je mémorise bien les choses » a ainsi une bonne estime de ses capacités cognitives.

Nous avons posé aux participants une série de questions, auxquelles ils devaient répondre avec ou sans l'assistance de Google, puis nous leur avons soumis le questionnaire. L'estime de soi cognitive était notablement plus élevée chez ceux qui venaient d'utiliser Internet. Même si les réponses étaient

■ LES AUTEURS



Daniel WEGNER (1948-2013) était professeur de psychologie à l'Université Harvard, à Cambridge, aux États-Unis.



Adrian WARD est postdoctorant à l'Université du Colorado, à Boulder. Il a obtenu son doctorat en 2013 à l'Université Harvard, sous la direction de D. Wegner.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Lieury et al., *Loisirs numériques et performances cognitives et scolaires : une étude chez 27 000 élèves de la 3^e des collèges*, *Bulletin de Psychologie*, à paraître, 2014.

B. Sparrow et al., *Google effects on memory : Cognitive consequences of having information at our fingertips*, *Science*, vol. 333, pp. 776-778, 2011.

D. Wegner, *Transactive memory : A contemporary analysis of the group mind*, dans *Theories of Group Behavior* (éds. B. Mullen et G. R. Goethals), Springer, 1986.

récupérées mot pour mot sur la Toile, ils avaient l'impression de les avoir obtenues grâce à leurs propres capacités mentales !

Nous avons ensuite vérifié que le surcroît d'intelligence ressenti par les utilisateurs de Google ne provenait pas juste du fait qu'ils avaient répondu à davantage de questions. Pour ce faire, nous avons répété l'étude en indiquant de façon mensongère aux participants dépourvus du moteur de recherche qu'ils avaient trouvé la bonne réponse à presque toutes les questions. Même quand les membres des deux groupes croyaient avoir réussi de façon égale, ceux qui s'étaient servis d'Internet se déclaraient plus intelligents.

Ces résultats suggèrent que le renforcement de l'estime de soi cognitive ne résulte pas juste de la rétroaction positive immédiate (« J'ai fourni les bonnes réponses »). Google donne à ses utilisateurs le sentiment qu'il fait partie de leur propre boîte à outils cognitive. Les participants à l'étude percevaient un résultat de recherche comme une information non pas tirée d'Internet, mais extraite de leur mémoire. Ainsi, ils s'attribuaient le mérite d'une connaissance qui n'était que le produit d'un algorithme de recherche de Google.

L'impact psychologique de ce nouveau fonctionnement de la mémoire, à cheval entre Google et le cerveau, ne manque pas d'ironie : l'ère de l'information semble avoir créé des individus qui ont l'impression d'avoir plus de connaissances que quiconque auparavant, alors qu'ils en savent de moins en moins sur le monde qui les entoure, comme le révèle leur dépendance vis-à-vis d'Internet.

En nous libérant de la nécessité de mémoriser les faits, nous pourrions sans doute consacrer le supplément de ressources mentales disponibles à d'autres tâches. Nous développerons peut-être une nouvelle forme d'intelligence, qui ne serait plus ancrée dans les mémoires locales, hébergées par chaque cerveau. Elle pourrait réunir la créativité de l'esprit humain et l'étendue des connaissances d'Internet.

À mesure que les progrès de l'informatique brouilleront les frontières entre l'esprit et la machine, nous dépasserons sans doute certaines limites de la mémoire et de la pensée. Cela ne signifie pas que nous perdrons notre identité. Nous sommes juste en train de former un nouveau partenariat transactif, qui ne se limite plus à d'autres humains, mais inclut une source d'information plus puissante que le monde ait jamais connu.

Les notes de Ramanujan

un trésor inépuisé

Ariel Bleicher

Au début du XX^e siècle, le prodige indien Srinivasa Ramanujan a couvert plusieurs carnets de résultats mathématiques étonnants. Les mathématiciens s'en inspirent encore pour faire de nouvelles découvertes.

Un samedi matin de 1984, alors que Ken Ono est encore lycéen, il ouvre la boîte aux lettres familiale à Baltimore, aux États-Unis, et y trouve une enveloppe fine comme du papier de riz et couverte de timbres colorés. Elle est destinée à son père, un mathématicien japonais peu expansif. Quand K. Ono lui tend ce courrier, son père lève les yeux du bloc-notes jaune sur lequel il est occupé à griffonner des équations et pose son stylo. Délicatement, il décachette l'enveloppe et déplie la lettre qu'elle contient.

« Cher Monsieur », commence-t-elle, « J'ai appris [...] que vous avez contribué à la sculpture en mémoire de feu mon mari [...]. J'en suis heureuse. » Et elle est signée « S. Janaki Amal », que l'en-tête à l'encre rouge identifie comme la veuve de « (Feu) Srinivasa Ramanujan (Génie Mathématique) ».

C'est la première fois que le jeune K. Ono entend parler de Ramanujan. Autodidacte indien, le prodige mathématique Ramanujan a énoncé il y a presque un siècle des propriétés qui « semblaient à peine

L'ESSENTIEL

- L'autodidacte indien Srinivasa Ramanujan avait noté plus de 3 000 formules et propriétés liées à la théorie des nombres. Beaucoup se sont révélées exactes et ont inspiré les générations suivantes de chercheurs.
- Ken Ono et d'autres mathématiciens ont récemment découvert dans certaines des notes de Ramanujan d'autres idées fécondes.
- Ces travaux de mathématiques pures pourraient aussi servir dans d'autres domaines, tels que la cryptographie.

Pages des carnets : Jon Smith, Trinity College, Université de Cambridge. Photo de Ramanujan : Science Source

croyables », comme l'écrivait son collègue britannique Godfrey Harold Hardy. Pourtant, ses travaux ont inspiré des domaines entièrement nouveaux des mathématiques et des théories qui, dans plusieurs cas, ont valu à leurs concepteurs la médaille Fields, l'équivalent pour les mathématiques du prix Nobel.

Pendant ses études de mathématiques, K. Ono, aujourd'hui professeur de théorie des nombres à l'Université Emory, en Géorgie, n'a jamais eu de raison de prêter particulièrement attention à Ramanujan. À sa connaissance, le « Génie Mathématique » n'avait laissé derrière lui aucune intuition nouvelle en rapport avec sa spécialité en théorie des nombres, les « formes modulaires », des objets abstraits quadridimensionnels dotés de remarquables propriétés de symétrie (voir l'encadré page 53).

Ramanujan fit toutefois une réapparition spectaculaire dans la vie de K. Ono en 1998, quand il avait 29 ans. Alors qu'il rassemblait les travaux du prodige pour en présenter une anthologie, Bruce Berndt, mathématicien de l'Université de l'Illinois