

suppl.
PER

A-522

sept. oct.

BNQ96

E u r ê k a !

sciences et chercheurs écrivent pour nous

1996



Des canards sans abri



Les dimensions secrètes de l'univers



Météorites, cadeaux du ciel!



Des épinettes millénaires... au Québec!



Des bébés, des mots et des choses



Le cerveau glouton

Les six meilleurs articles du concours 1996
de vulgarisation scientifique de l'Association
canadienne-française pour l'avancement des sciences



Marcel Darveau est attaché de recherche au Département des sciences du bois et de la forêt ainsi qu'au Centre de recherche en biologie forestière de l'Université Laval. Ingénieur forestier titulaire d'un doctorat en biologie, il se spécialise dans les domaines de l'écologie et de l'aménagement de la faune forestière.

Des canards sans abri | p. 3



Michel Gagnon est titulaire d'un doctorat en physique des hautes énergies. Il s'intéresse au concept d'espace à plus de trois dimensions depuis 1987. Au Laboratoire de physique théorique de l'Université Laval, il travaille actuellement, comme attaché de recherche, sur des modèles de théorie des cordes.

Les dimensions secrètes de l'univers | p. 5



Pierre Hudon termine actuellement son doctorat au Laboratoire de haute pression et de haute température du Département des sciences de la Terre et des planètes de l'Université McGill. Ses recherches portent sur la minéralogie du manteau terrestre et sur l'origine des magmas qui en sont issus.

Météorites, cadeaux du ciel! | p. 7



Marie-Josée Laberge est étudiante au doctorat en biologie au Centre d'études nordiques de l'Université Laval. Ses recherches portent principalement sur l'écologie de l'épinette noire dans le Québec subarctique.

Des épinettes millénaires... au Québec! | p. 10



Diane Poulin-Dubois a obtenu son doctorat en psychologie de l'Université de Montréal. Professeure agrégée à l'Université Concordia, elle y est également directrice du Centre de recherche en développement humain. Ses recherches ont pour objet le développement des processus cognitifs chez les jeunes.

Des bébés, des mots et des choses | p. 12



Elvire Vaucher, qui vient d'obtenir un doctorat de 3^e cycle en neurosciences de l'Université Paris VI, s'intéresse tout particulièrement au contrôle neurogène de la circulation sanguine cérébrale. Elle effectue ses recherches à l'Institut neurologique de Montréal ainsi qu'au CNRS à Paris.

Le cerveau glouton | p. 13

Le Concours de vulgarisation scientifique qu'organise chaque année l'Association canadienne-française pour l'avancement des sciences a pour but d'encourager les chercheuses et les chercheurs d'ici à rendre leurs travaux accessibles au grand public. L'Acfas souhaite ainsi sensibiliser et intéresser le plus de gens possible à différents domaines scientifiques, tout en éliminant certains préjugés à l'égard de la recherche.

Vulgariser son champ d'études est un exercice des plus exigeants. Pour y arriver, les scientifiques doivent consentir un important effort de simplification et de schématisation. C'est cet effort que vient récompenser chacun des prix de vulgarisation attribués.

Les lauréates et les lauréats de cette quatrième édition du Concours vous proposent des articles variés, dans le but de vous ouvrir leurs champs de connaissances respectifs et surtout de vous faire partager leur passion.

Soulignons que, cette année, les articles primés sont accessibles par le réseau Internet, sur le site de l'Acfas.

Patricia Legault, coordonnatrice du projet

JURY DU CONCOURS

MICHEL A. BOUCHARD: Université de Montréal, directeur du Département de géologie

JEAN-MARC CARPENTIER: Communications JMC inc., consultant, président du jury

LUC CHARTRAND: *L'Actualité*, journaliste

LAURENT DRISSEN: Université Laval, attaché de recherche au Département de physique

JEAN-MARC FLEURY: Centre de recherche pour le développement international (CRDI), directeur intérimaire des communications institutionnelles

BENOÎT GAUTHIER: Centre d'interprétation de l'industrie, coordonnateur - muséologie et muséographie

CAROLE THIBAudeau: *La Presse*, journaliste scientifique

Cet encart a été réalisé par:

 Association canadienne-française pour l'avancement des sciences
425, rue De La Gauchetière Est, Montréal (Québec) H2L 2M7
Téléphone: (514) 849-0045
courrier-é: concours.v-s@acfas.ca
Internet: http://www.acfas.ca

COORDINATION: Patricia Legault
RÉVISION JOURNALISTIQUE: Marie Chalouh
RÉVISION LINGUISTIQUE: Hélène Larue
GRAPHISME: Dominique Mousseau

L'Association canadienne-française pour l'avancement des sciences est un regroupement pluridisciplinaire de scientifiques de tous les milieux.

Des canards sans abri

MARCEL DARVEAU

Des canards qui s'abritent pour nicher! Une bizarrerie, un cas isolé? Pas vraiment, puisque cinq des vingt espèces de canards d'eau douce du Québec nichent dans des trous d'arbres. Depuis quelques années, ces canards, et particulièrement le garrot à œil d'or (*Bucephala clangula*),

inquiètent des biologistes. En fait, ce n'est pas tant parce qu'ils nichent dans des arbres, un phénomène connu depuis des siècles, mais plutôt parce que les populations de garrots à œil d'or du nord-est du continent sont à la baisse. Il semble que les grandes cavités de vieux arbres morts dans lesquelles nichent ces canards se fassent de plus en plus rares.

POURQUOI NICHER DANS UN TROU D'ARBRE?

On résume souvent la vie des animaux à deux activités: manger sans se faire manger et se reproduire le plus possible. Au cours de l'évolution, les oiseaux se sont adaptés au vol pour accéder plus facilement à des sources de nourriture inexploitées par les autres animaux, tout en développant un moyen efficace d'échapper aux prédateurs. Toutefois, le vol imposait en retour des contraintes quant au poids des oiseaux. Ceux-ci ont composé avec ces contraintes par une série d'adaptations.

Ainsi, le système reproducteur des oiseaux s'est graduellement distingué de celui de leurs ancêtres reptiliens par une plus grande rapidité à produire les œufs, lesquels mettaient cependant plus de temps à compléter leur développement hors du corps de l'oiseau. Ce système permettait de minimiser la période durant laquelle les déplacements en vol étaient restreints par le poids supplémentaire de l'œuf; par contre, il rendait l'œuf plus vulnérable aux prédateurs et plus sensible aux conditions météorologiques défavorables.

Les oiseaux ont compensé à nouveau en développant des comportements parentaux appropriés, dont celui de cacher l'œuf et de le couvrir dans un abri: le nid. Selon les espèces et les conditions du milieu, le nid varie d'une simple dépression dans le sol à une construction circulaire tissée d'herbes et accrochée au haut d'un arbre. Naturellement, certains types de nids constituent de meilleurs abris que d'autres et le succès de la nidification varie en conséquence.

En milieu forestier, les trous d'arbres constituent, de toute évidence, d'excellents sites de nidification. Les œufs y sont à l'abri de la majorité des prédateurs et il est plus facile d'y maintenir un microclimat favorable à leur développement. Les bénéfices retirés de la nidification dans un trou d'arbre sont suffisamment grands pour que les garrots, par exemple, nichent jusqu'à deux kilomètres d'un plan d'eau, lequel demeure essentiel pour leur

alimentation. Dans les deux jours suivant l'éclosion des œufs, les canetons sautent du nid et, guidés par leur mère, marchent jusqu'au plan d'eau. Les risques de prédation sont alors élevés, mais ils demeurent moindres que si le nid avait été localisé au sol près du plan d'eau.

QUAND ON COUPE LES GROS ARBRES...

Depuis le début de la colonisation par les Européens, l'aire québécoise de répartition du garrot à œil d'or a vraisemblablement peu changé, c'est-à-dire que le garrot a toujours occupé toute la zone allant du sud de la province jusqu'à la limite des forêts. Apparemment, le garrot était bien connu des naturalistes-explorateurs, qui ont rapporté sa présence un peu partout au Québec dès le XIX^e siècle. Malheureusement, on possède peu de données historiques sur son abondance parce que les premiers inventaires partiels remontent à peine à 1985 et que le premier inventaire complet ne date que de 1990.

Toutefois, la carte des zones d'abondance actuelles du garrot au Québec révèle un portrait fort éloquent quant à la situation qui prévalait probablement il y a quelques dizaines d'années. Cette carte se présente comme un morceau de gruyère qui aurait un gros trou correspondant à la portion dé-



boisée des basses terres du Saint-Laurent et plusieurs petits trous dans les régions forestières où il y a eu beaucoup de coupes de bois au cours des quinze dernières années...

Selon Daniel Bordage, biologiste à Environnement Canada et responsable du suivi des populations québécoises de garrots, la carte d'abondance du garrot à œil d'or pourrait être en train de changer rapidement. Des inventaires effectués par nos voisins américains dans les quartiers d'hivernage suggèrent une chute inquiétante des populations du Nord-Est. Après avoir oscillé autour de 80 000 de 1955 à 1969, le nombre d'oiseaux repérés annuellement dans le territoire de référence de la Côte atlantique a diminué graduellement pour passer sous la barre des 10 000 individus en 1993.

CANETON
DE GARROT
À ŒIL D'OR.

PHOTO: BEVOÏT HOUBE



GARROT À ŒIL
D'OR FEMELLE
DANS UN NICHOIR.

PHOTO: JEAN RODRIGUE

La récolte de garrots à œil d'or par les chasseurs sportifs québécois montre aussi une tendance à la baisse : 33 000 individus par an, en moyenne, dans les années 70 ; 18 000 dans les années 80 ; et 13 000 depuis 1990.

Devant ces chiffres, les biologistes ont commencé à s'interroger sur les principaux facteurs qui pourraient contribuer au déclin des populations de garrots à œil d'or. Parmi tous les facteurs liés à la disponibilité de nourriture et d'abris, tant dans les aires de migration que dans les quartiers d'hivernage et de reproduction, c'est surtout la non-disponibilité de sites de nidifi-

afin de faciliter le flottage du bois. On peut même se demander si les populations de garrots n'ont pas chuté dès ce moment-là.

DES GARROTS EN BOÎTE

Au cours de l'évolution, les espèces d'oiseaux qui se sont adaptées à la nidification dans les cavités sont devenues totalement dépendantes de celles-ci. D'instinct, certaines espèces – les pics, par exemple – en sont même venues à excaver leur propre cavité. Quant aux espèces non excavatrices comme le garrot, leur penchant pour les cavités les a manifestement bien servies puisqu'elles existent encore de nos jours. Par contre, il ne semble pas que le garrot puisse faire face seul au problème de la déforestation.

Les biologistes disposent de deux outils pour assurer la disponibilité de cavités pour le garrot. Le premier relève de la conservation de la biodiversité et du développement durable des forêts. Le deuxième consiste à mettre les garrots en boîte... en compensant la perte de cavités par des nichoirs !

Le nichoir à canards n'est pas une trouvaille récente. En 1753, Carl von Linné rapportait que les autochtones de la Finlande avaient coutume d'installer des nichoirs pour attirer les garrots. De nos jours, plusieurs populations de canards sont, de toute évidence, entretenues artificiellement grâce à des réseaux de nichoirs ; en Suède, on totaliserait 75 000 nichoirs, soit environ 1 par 6 km².

Malgré sa simplicité apparente, la technique des nichoirs comporte toutefois des désavantages. Ainsi, les coûts de fabrication, d'installation et d'entretien de nichoirs sont très élevés, surtout si l'on considère que le nichoir n'a qu'une seule fonction : servir d'abri. Par comparaison, la protection de quelques gros arbres au moment de coupes forestières peut être bien plus rentable financièrement et écologiquement, puisqu'un arbre remplit beaucoup plus de fonctions écologiques qu'un nichoir.

En dépit de leurs limites, les nichoirs sont devenus des outils populaires et plusieurs écologistes considèrent maintenant les programmes d'installation de nichoirs comme des pratiques de conservation. Ce qui n'est pas sans soulever l'indignation d'autres écologistes, qui ne considèrent les nichoirs que comme des outils temporaires à utiliser pour des programmes de rétablissement locaux.

Dans une perspective de conservation de la biodiversité, c'est un peu comme si on se querellait pour déterminer si les sans-abri ont besoin de gîtes de dépannage ou plutôt d'un programme de réintégration dans le milieu.

Pour en savoir plus :

BORDAGE, Daniel. «Le garrot à œil d'or» dans J. Gauthier et Y. Aubry, *Les oiseaux nicheurs du Québec : atlas des oiseaux nicheurs du Québec méridional*, Association québécoise des groupes d'ornithologues, Société québécoise de protection des oiseaux et Service canadien de la faune, Montréal, 1995, p. 328-331.

NEWTON, Ian. «The Role of Nest Sites in Limiting the Numbers of Hole-Nesting Birds: A Review», *Biological Conservation*, vol. 70, 1994, p. 265-276.



PAYSAGE TYPIQUE EN FORÊT BORÉALE : UNE LISIÈRE BOISÉE DE 20 M DE LARGEUR ENTRE UN LAC ET UNE COUPE À BLANC.

qui a retenu l'attention. La raison en est simple : on sait que, dans des conditions naturelles, le manque de trous d'arbres est souvent un facteur limitant les populations d'oiseaux. Dans le Nord-Est américain, les arbres sont particulièrement petits. Or les arbres où le garrot peut trouver des trous qui lui conviennent, doivent avoir un diamètre d'au moins 35 cm. Des études préliminaires ont révélé que les gros arbres avec des cavités étaient rares dans les forêts feuillues et conifériennes québécoises. Les pratiques forestières, orientées vers la production d'arbres sains et sans «défauts», c'est-à-dire notamment sans cavités, menacent de plus en plus le garrot.

Avec les arbres, il faut penser à long terme. Par exemple, en forêt boréale, le bouleau à papier met quelque 80 années avant d'atteindre un diamètre de 35 cm. Si l'arbre meurt à ce moment, il faudra attendre encore vingt ans avant qu'il pousse et qu'une grande cavité se creuse à l'intérieur. Ainsi, à l'été de 1995, une étude sur la disponibilité de trous d'arbres effectuée dans la forêt Montmorency, en pleine sapinière boréale dans la Réserve des Laurentides, révélait une absence de gros bouleaux à papier dans les lisières boisées bordant les lacs. Pour les forestiers, cela n'avait rien de surprenant puisque, dans les années 40, on coupait les arbres au bord des lacs

PHOTO : MARCEL DARVEAU

Les dimensions secrètes de l'univers

MICHEL GAGNON

L'idée d'une quatrième dimension spatiale fascine les grands esprits humains depuis déjà plus d'un siècle. Tour à tour, les mathématiciens, les physiciens, les philosophes et les artistes se sont approprié ce concept pour l'intégrer à leur ouvrage et le rendre accessible au grand public.

Aujourd'hui, la science-fiction nous a habitués à naviguer dans les autres dimensions de l'univers. Ainsi, ses héros peuvent atteindre des mondes parallèles et utiliser les distorsions de l'espace pour effectuer des voyages à travers le temps ou se déplacer plus vite que la lumière.

Évidemment, la science moderne ne nous permet pas encore de telles prouesses. Toutefois, la théorie la plus prometteuse pour unifier la matière et les interactions, la théorie des cordes, laisse présager des développements qui vont bien au-delà de toute imagination. Et nous ne faisons que commencer son exploration.

Les théories qui ont précédé la théorie des cordes nous présentaient les particules élémentaires comme des objets ponctuels sans dimension et caractérisés par une masse donnée. Maintenant, ces particules sont plutôt représentées par des cordes extrêmement petites, cent milliards de milliards de fois plus petites qu'un noyau d'hydrogène. Cela explique qu'on les confonde avec un point. Comme les cordes d'un violon, ces minuscules cordes peuvent vibrer à différentes fréquences appelées *résonances*. On explique donc la grande variété de particules connues par l'association à chaque type de particules d'une certaine résonance de la même corde microscopique. Les différentes particules perdent ainsi leur caractère fondamental, chacune correspondant à un état d'excitation particulier d'une seule et même corde.

Les mouvements d'une corde dans l'espace sont cependant beaucoup plus complexes que ceux d'un simple point (figure 1). En fait, si on veut arriver à décrire correctement le comportement des particules avec ce modèle de cordes, on doit postuler qu'elles se déplacent dans un espace à 10 ou à 26 dimensions. Lorsque les physiciens ont traduit cette condition sous forme d'équations, ils ont eu la surprise d'y retrouver aussi les équations de la relativité générale d'Einstein. Ainsi, le simple modèle d'une corde vibrante englobe à la fois les deux grandes théories de la physique moderne, jusque-là inconciliables : la relativité générale (théorie de la gravitation) et le modèle standard (théorie quantique des particules élémentaires). Pour mieux comprendre, voyons d'abord ce qui caractérise ces deux théories.

LA GÉOMÉTRIE DE L'ATTRACTION

Au milieu du XIX^e siècle, Georg Riemann est déjà convaincu que les interactions fondamentales entre les particules sont des conséquences de la géométrie de l'espace. Toutefois, Einstein sera le premier à proposer que ce soit

la présence de la matière qui détermine la courbure de l'espace-temps (trois dimensions pour l'espace et une pour le temps). Selon ses résultats, publiés en 1915 (la relativité générale), l'espace-temps dans lequel nous vivons est courbé par les objets qu'on y retrouve (figure 2). Ainsi, un rayon de lumière qui passe près d'un objet très massif, comme une planète, doit suivre une trajectoire arrondie parce que l'espace dans lequel il se déplace est lui-même courbé par la présence de la planète. Nous avons alors, avec la relativité générale, la première théorie purement géométrique de l'attraction.

Quelques années plus tard, en 1919, Theodor Kaluza utilise une cinquième dimension pour unifier les deux interactions connues à l'époque : l'électromagnétisme et la gravitation. Il réécrit simplement les équations d'Einstein en ajoutant une autre dimension spatiale et parvient ensuite à montrer que la théorie obtenue peut se scinder en deux secteurs distincts. Le premier correspond évidemment à la relativité générale d'Einstein, et le deuxième, à la théorie de l'électromagnétisme développée par James Clerk Maxwell en 1864. Ainsi, les équations de Maxwell sont cachées dans celles d'Einstein. La théorie de Kaluza préserve donc toute la beauté géométrique de la relativité générale, mais y ajoute la lumière (c'est-à-dire les champs électromagnétiques) en tant que vibration dans la cinquième dimension.

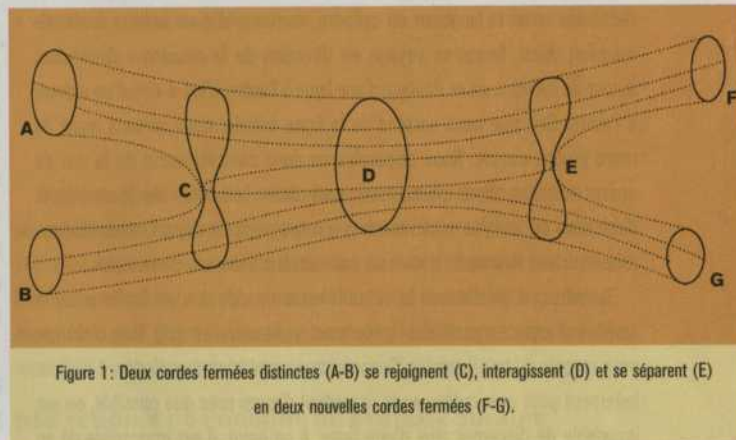


Figure 1 : Deux cordes fermées distinctes (A-B) se rejoignent (C), interagissent (D) et se séparent (E) en deux nouvelles cordes fermées (F-G).

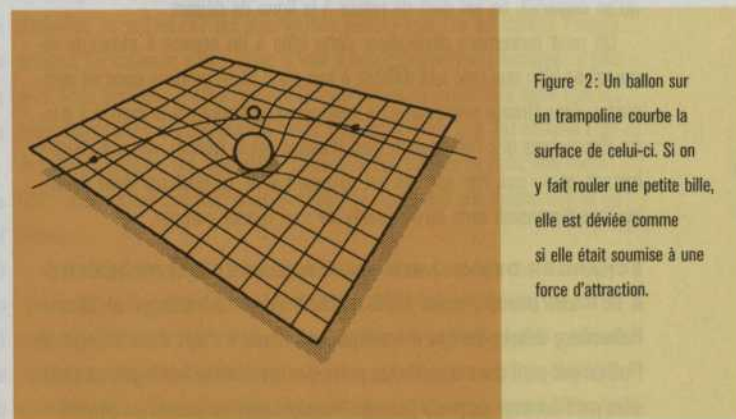


Figure 2 : Un ballon sur un trampoline courbe la surface de celui-ci. Si on y fait rouler une petite bille, elle est déviée comme si elle était soumise à une force d'attraction.

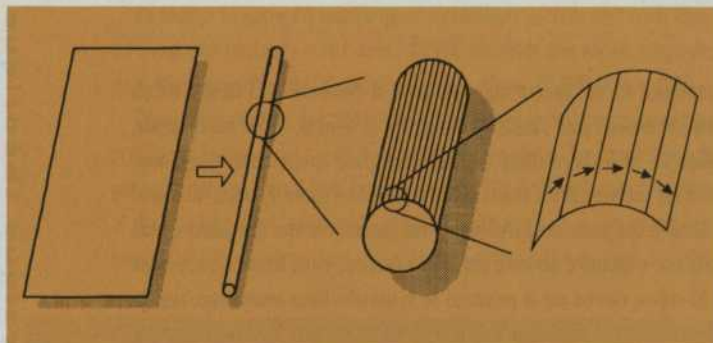


Figure 3: En nous déplaçant le long d'une dimension enroulée, nous passons par une succession de mondes parallèles.

DÉTOUR PAR LA CINQUIÈME DIMENSION

C'est Oskar Klein qui parvient, en 1926, à expliquer pourquoi on ne peut pas percevoir cette dimension supplémentaire. Il émet simplement l'hypothèse qu'elle est enroulée sur elle-même telle une feuille dont on fait un cylindre (figure 3). Il suffit alors que ce cylindre ait un rayon extrêmement petit pour devenir imperceptible et se confondre avec une simple ligne.

Dans cette analogie, la longueur du cylindre représente un monde à une seule dimension, alors que la circonférence représente une deuxième dimension. Lorsqu'on regarde de très près, chacune des lignes parallèles, dessinées selon la longueur du cylindre, correspond à un univers à une dimension. Ainsi, lorsqu'on voyage en direction de la deuxième dimension, autour du cylindre, on se déplace d'une ligne à l'autre, c'est-à-dire d'un univers à l'autre. Dès que nous sortons de la ligne initiale, nous sortons aussi de notre propre monde. Nous disparaissions donc complètement de la vue de nos semblables. Nous parcourons alors toute la boucle de la deuxième dimension et, lorsque nous revenons à notre point de départ, nous réapparaissions dans le monde que nous connaissons avec nos semblables.

Toutefois, si on diminue la circonférence du cylindre, on limite aussi le nombre d'espaces parallèles qu'on peut y dessiner et qu'il faut traverser pour revenir au tout premier. Si on continue à rétrécir le cylindre, il devient tellement petit que, même en le regardant d'aussi près que possible, on est incapable de discerner plus d'une ligne. À ce point, il est impossible de se rendre compte de ce qui se passe lorsqu'on voyage autour du cylindre. Dès qu'on disparaît, on est déjà de retour à la ligne de départ.

On peut facilement généraliser cette idée à un espace à plusieurs dimensions bien que cela soit difficile à imaginer. Klein propose donc de remplacer, dans l'image précédente, la longueur du cylindre par le monde à quatre dimensions que l'on connaît bien (l'espace et le temps). Ainsi, à chaque instant, et où que l'on soit, on est susceptible de se déplacer dans la cinquième dimension sans être capable de s'en rendre compte.

ÉCHANGER DES QUANTA POUR MIEUX SE RAPPROCHER

À la même période, entre 1920 et 1930, Erwin Schrödinger et Werner Heisenberg développent la mécanique quantique. Il s'agit d'une théorie de l'infiniment petit dans laquelle les particules de matière interagissent entre elles par l'échange de petits paquets d'énergie appelés *quanta*. La géométrie

de l'univers n'a donc plus aucun rôle. Ces nouvelles idées permettent de décrire l'électromagnétisme mais aussi les deux forces nucléaires qui sont encore mal connues. Ces trois interactions sont donc décrites par des théories très similaires, fondées sur l'échange de quanta, mais elles se distinguent par les symétries qu'on y observe. En effet, les particules associées à chaque interaction sont distribuées dans des structures distinctes à l'intérieur desquelles elles peuvent être permutées selon un ordre particulier sans changer les équations. C'est ce qu'on appelle une *symétrie* en physique théorique.

Le regroupement de ces trois théories, désigné sous le nom de *modèle standard*, permet de décrire la grande profusion de particules découvertes au milieu du siècle. Toutefois, nous avons perdu la beauté géométrique de la relativité générale ainsi que de la théorie de Kaluza et Klein. De plus, il n'y a aucune place pour la gravité, qu'on ne parvient pas à quantifier, c'est-à-dire à exprimer correctement par l'échange de quanta.

UN ESPACE SYMÉTRIQUE ET BIEN ROULÉ

Cette situation favorise le retour de la théorie de Kaluza et Klein. Mais, cette fois, le défi est de taille. Il faut non seulement réunir la gravitation et l'électromagnétisme, mais aussi les deux interactions nucléaires. Puisque ces trois dernières peuvent être décrites par la mécanique quantique, on peut imaginer la possibilité de les traiter de la même façon dans une autre théorie.

On se rappelle que l'électromagnétisme a été fusionné avec la relativité générale par l'ajout d'une cinquième dimension. On peut donc essayer d'ajouter de nouvelles dimensions pour les deux forces nucléaires. Comme les symétries observées dans celles-ci sont plus complexes, il faut ajouter un plus grand nombre de dimensions, disons N . On obtient alors une théorie similaire à celle de Kaluza et Klein, c'est-à-dire une théorie définie en $4+N$ dimensions et qui se sépare en deux secteurs (la relativité générale et le modèle standard) lorsque les N dimensions supplémentaires s'enroulent sur elles-mêmes. Cette théorie, appelée *supergravité*¹, marque le retour aux idées de Riemann et d'Einstein. En effet, elle permet d'inclure tout ce qui est connu (matière et interactions) dans un modèle purement géométrique.

Pour voir comment les symétries du modèle standard émergent de l'espace, considérons une toile tendue sur laquelle on dépose quelques objets. Si on fait vibrer sa surface, on obtient, pour certaines fréquences, un modèle de vibration régulier. Ces fréquences de résonance dépendent de la forme de la toile. Les objets se déplacent alors vers les endroits où les ondulations sont le plus faibles. Ils adoptent une disposition dictée par le modèle de résonance et, par conséquent, par la forme de la toile. Si celle-ci présente certaines symétries, il en sera de même pour la disposition des objets.

Il est possible de trouver des surfaces plus complexes (et enroulées sur elles-mêmes) qui présentent les symétries du modèle standard. Si des particules s'organisent sur de telles surfaces en résonance, elles héritent alors des symétries de celles-ci. Ainsi, la structure symétrique du modèle standard peut s'expliquer par la géométrie de l'espace. On retrouve donc toute la beauté géométrique de la relativité générale. Malheureusement, la plus grande symétrie permise par la supergravité est trop petite pour inclure toutes celles du modèle standard.

LORSQUE LES PHYSICIENS JOUENT À LA CORDE

Comme on l'a déjà mentionné, la théorie des cordes traite les particules comme de minuscules cordes, trop petites pour être distinguées et vibrant à des fréquences particulières. Elles ne peuvent exister que dans un espace à 10 ou à 26 dimensions. Actuellement, la version la plus prometteuse est celle des cordes hétérotiques². Celles-ci résultent de la combinaison de deux types de cordes. On parle alors de deux secteurs : le droit et le gauche. Les cordes du secteur droit vibrent dans le sens des aiguilles d'une montre et se déplacent dans un espace à 10 dimensions. Celles du secteur gauche vibrent dans le sens contraire et existent dans un espace à 26 dimensions. Les 10 premières dimensions de chaque secteur sont confondues avec celles de l'autre secteur. Par contre, les 16 autres dimensions du secteur gauche sont enroulées sur elles-mêmes et fixent les symétries du modèle standard. Heureusement, cette fois, la symétrie de cet enroulement est suffisamment large pour contenir toutes celles de la théorie d'Einstein et du modèle standard.

Ainsi, pour la première fois, la géométrie pure nous permet de donner une explication simple à toutes les interactions connues. On ne comprend cependant pas bien la théorie des cordes. Sa découverte s'est faite par hasard³ et non à partir de l'énoncé d'un principe fondamental. Nous avons donc une théorie dont nous ne connaissons pas les bases. C'est un peu comme si on plaçait un ordinateur moderne entre les mains d'une personne du siècle dernier. Elle pourrait arriver à lui faire exécuter quelques calculs. Mais, pour ce qui est de comprendre comment l'ordinateur y parvient, elle serait complètement dépassée par la technologie des processeurs. Elle serait incapable de la transférer vers d'autres applications.

De la même façon, la théorie des cordes permet de trouver des solutions élégantes dans le domaine de la physique connue, mais on ne sait pas comment l'utiliser pour expliquer ce qui reste inconnu. Ainsi, partout dans le monde, on assiste à une recherche frénétique pour trouver la clé de cette théorie qui dépasse nos capacités actuelles. Il y a de nombreuses routes à explorer. Chacune fait intervenir des mathématiques très puissantes et sophistiquées que les physiciens connaissent mal... Mais la solution repose probablement sur des concepts encore méconnus.


Malgré tout, on peut concevoir le schéma d'évolution de notre univers. À l'instant zéro, les dix dimensions sont équivalentes, mais l'espace est instable. Il bascule alors vers l'explosion initiale, le Big Bang, et se scinde en deux parties. L'une devient l'univers visible à quatre dimensions et prend rapidement de l'expansion. L'autre s'effondre et s'enroule sur elle-même. Il s'agit de l'hyperespace à six dimensions. On croit que, dans un avenir très lointain, l'univers visible cessera son expansion et commencera à se contracter, tandis que l'hyperespace se déroulera graduellement. Les physiciens du futur auront-ils alors maîtrisé l'hyperespace pour permettre à l'humanité de s'y enfuir avant le Big Crunch, l'implosion finale ?

RÉFÉRENCES :

1. FREEDMAN, D. Z., VAN NIEUWENHUIZEN, P. et S. FERRARA. *Phys. Rev.*, B13 (1976) 3214.
2. GROSS, D. J., HARVEY, J. A., MARTINEC, E. et R. ROHM. *Phys. Rev. Lett.*, 54 (1985) 502.
3. VENEZIANO, G. *Nuovo Cim.*, 57A (1968) 190.

Météorites, cadeaux du ciel !

PIERRE HUDON



Le mardi 14 juin 1994 vers 20 h, des milliers de personnes de l'Ontario, du Québec et du nord-est des États-Unis ont observé l'entrée spectaculaire dans l'atmosphère terrestre d'une boule de feu voyageant à une vitesse d'environ 70 000 km/h. Le bolide, pesant entre 10 et 100 tonnes, a peu après bruyamment explosé à une hauteur de 10 à 20 km au-dessus de la surface de la Terre. Une pluie de fragments s'est alors abattue près de Saint-Robert-de-Sorel, une petite ville située à environ 80 km au nord-est de Montréal. Jusqu'à présent, une vingtaine de ces fragments ont été retrouvés. Un tel événement est exceptionnel à plusieurs titres : seulement douze observations de la chute d'un bolide ont conduit à la récupération de fragments de météorite au Canada depuis 1887 ; c'est la première fois que cela se produit sous la forme d'une pluie de météorites dans l'est de ce pays ; enfin, ce sont les premiers échantillons de météorite rocheuse trouvés au Québec !

Pour les scientifiques, des météorites comme celle-là représentent une source inestimable de renseignements sur le système solaire. Ce sont de véritables fusées interplanétaires naturelles qui nous fournissent des échantillons de roches extraterrestres, nous évitant ainsi de coûteux voyages spatiaux ! Mais quel genre de renseignements tire-t-on de ces roches exactement ? Et quels secrets renferme la météorite de Saint-Robert ?

DES TÉMOINS DE L'ORIGINE DU SYSTÈME SOLAIRE

Deux observations, à elles seules, font des météorites des roches uniques en leur genre. La première concerne leur âge : environ 4 milliards 560 millions d'années, ce qui en fait les plus vieilles pierres que l'on ait datées jusqu'à présent. La seconde observation a trait à leur composition chimique : à peu près 85 p. cent des météorites ont une composition proche de celle que les astronomes ont mesurée pour le Soleil (exception faite des gaz comme l'hydrogène et l'hélium qui, abondants dans le Soleil, sont rares dans une roche). Cette observation suggère donc une origine commune aux météorites et au Soleil.

Or le Soleil représente à lui seul 99,8 p. cent de la masse totale du système solaire. Sa composition chimique doit être, par conséquent, voisine de celle du nuage primaire de gaz et de poussières à partir duquel le système solaire s'est formé. Comme les météorites ont une composition chimique comparable à celle du Soleil (ou du nuage primaire) et que ce sont les plus

vieilles roches connues, il apparaît donc raisonnable de penser qu'elles sont des échantillons du matériel brut et primitif à partir duquel des planètes comme la Terre se sont formées.

Ces météorites de composition quasi solaire sont appelées des *chondrites*. Elles tirent leur nom du fait qu'elles sont composées entre autres de petites billes rocheuses (pas plus grosses qu'un petit pois) que l'on nomme *chondres*. Aucune roche terrestre ne possède cette particularité et le processus de formation des chondres est donc à chercher là où les météorites se sont formées, c'est-à-dire dans l'espace.

Malgré le vif débat qui entoure encore aujourd'hui le mécanisme exact de la formation des chondres, les scientifiques s'accordent pour dire qu'ils se sont formés à la suite de la fonte et du refroidissement rapide et parfois incomplet d'agrégats de minéraux qui formaient le nuage de poussières primaire. Poussières minérales et chondres seraient ainsi parmi les premiers matériaux à s'être solidifiés dans le système solaire. Sous l'effet de la gravité, ils se seraient petit à petit agglomérés, assemblés les uns avec les autres, pour finalement donner de petites planètes, ou *planétoïdes*, de composition chondritique.

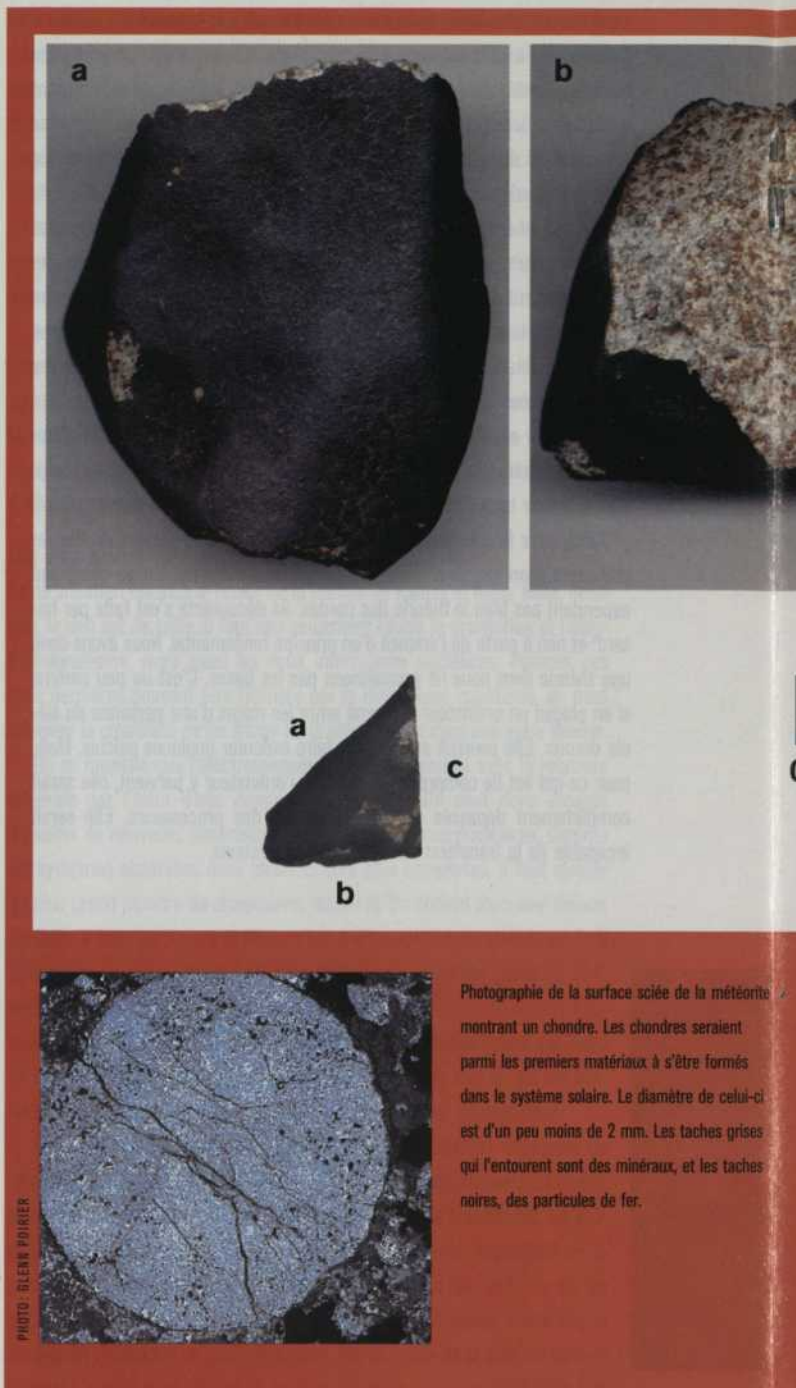
La météorite de Saint-Robert est une chondrite. L'examen de ses chondres au microscope électronique du Département des sciences de la Terre et des planètes de l'Université McGill a montré que ceux-ci étaient effectivement formés d'agrégats de minéraux partiellement ou totalement fondus. La météorite de Saint-Robert s'inscrit donc assez bien dans le scénario évoqué plus haut, mais elle nous réserve aussi d'autres surprises...

PETITE RECETTE POUR FABRIQUER DE « GROSSES » PLANÈTES

Une planète de dimension moyenne comme la Terre possède une structure comparable à celle d'un œuf dur. La coquille correspond à la croûte; le blanc, au manteau sous-jacent; et le jaune, au noyau. Cette structure a pu être mise en évidence grâce à l'étude des tremblements de terre, dont les ondes peuvent traverser le globe terrestre, «radiographiant» ainsi son intérieur.

La composition chimique de la croûte est assez bien connue. Celle du manteau a été déterminée grâce à des fragments de manteau transportés à la surface de la Terre par les magmas des volcans qui agissent comme des foreuses naturelles. La composition du noyau terrestre a, pour sa part, été précisée en 1961 par l'Américain Francis Birch. Reproduisant en laboratoire les conditions de très hautes pression et température régnant au centre de la Terre, celui-ci découvrit que l'élément chimique qui expliquait le mieux la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le noyau était le fer. Avec ces données, les géologues ont vite essayé de vérifier s'ils pouvaient, à partir d'une chondrite, reproduire la structure et la composition chimique de notre planète afin de tester le modèle chondritique. La réponse ne se fit pas attendre: oui!

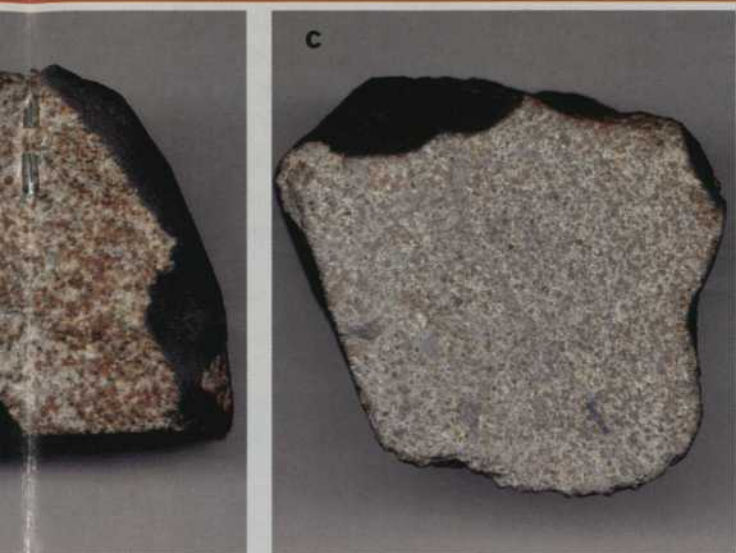
Prenons une chondrite, broyons-la et, avec un aimant, séparons la poussière de fer des autres minéraux. L'analyse de ces derniers montre qu'ils ont une composition chimique similaire à celle des roches du manteau terrestre. De plus, la proportion entre le fer extrait et les autres minéraux correspond à celle observée entre le noyau de fer et le manteau rocheux de la Terre! Le modèle chondritique se confirmerait donc. Lors de la formation



Photographie de la surface sciée de la météorite montrant un chondre. Les chondres seraient parmi les premiers matériaux à s'être formés dans le système solaire. Le diamètre de celui-ci est d'un peu moins de 2 mm. Les taches grises qui l'entourent sont des minéraux, et les taches noires, des particules de fer.

du système solaire, le matériel chondritique s'est suffisamment aggloméré à certains endroits pour former des planétoïdes; ces derniers étaient assez gros et chauds pour que le fer, très dense, se concentre en un noyau au centre, sous l'effet de la gravité, laissant autour de lui un manteau rocheux et, en surface, une croûte mince également rocheuse.

Ce scénario d'apparence simpliste est en fait très solide, car il est corroboré par des témoins de la formation du système solaire que nous avons jusqu'à présent négligés, à savoir les quelque 15 p. cent de météorites ayant



PHOTOS: PIERRE HODON

Profils d'un fragment de la météorite de Saint-Robert. a) La surface extérieure est recouverte d'une croûte noire résultant de la fusion superficielle de la roche. Cette fusion a été causée par la chaleur dégagée par la friction du bolide avec l'atmosphère terrestre. b) L'intérieur de la météorite est de couleur gris pâle. Les taches orangées sont des particules de fer qui, exposées à l'air, ont rouillé. c) On a scié la météorite afin de prélever un échantillon à analyser. Sur la surface sciée, on distingue les particules de fer, de couleur dorée, qui forment les noyaux des planètes comme la Terre. Les autres minéraux, de couleur grise, possèdent quant à eux tous les ingrédients nécessaires à la fabrication des manteaux et des croûtes de ces planètes.

une composition chimique différente de celle du Soleil. Ces météorites se répartissent en trois groupes dont la composition reflète justement celle d'un noyau, d'un manteau en formation et de la croûte d'une planète! Ce sont respectivement les *fers* ou *sidérites* (formés principalement d'un alliage de fer et de nickel), les *fers pierreux* ou *sidérolithes* (formés de minéraux enveloppés d'un alliage de fer et de nickel) et les *achondrites* (formés de minéraux et ne possédant pas de chondres). Les achondrites montrent des traces de fusion évoquant les phénomènes volcaniques que l'on retrouve à

la surface de la Terre. La seule différence réside dans le fait que la fusion dans les achondrites date du début de la formation du système solaire, tandis que le volcanisme terrestre se poursuit toujours!

Dans cette perspective, les météorites apparaissent comme des fragments de planétoïdes éclatés qui ont survécu à un long voyage à travers le temps et l'espace pour nous livrer l'enregistrement des diverses étapes de la construction des planètes. Étant une chondrite, la météorite de Saint-Robert provient donc probablement d'un planétoïde qui ne s'est pas séparé en noyau, manteau et croûte, faute de chaleur ou de temps pour le faire. Par contre, sa composition minéralogique et chimique, de même que l'observation microscopique de ses chondres et minéraux, montre que ceux-ci ont réagi chimiquement les uns avec les autres.

Cela suggère que le planétoïde à l'origine de la météorite de Saint-Robert a néanmoins subi un léger réchauffement, le préparant peut-être à se séparer en noyau, manteau et croûte. Pour des raisons encore mal comprises, il s'est ensuite cassé en morceaux. Un de ces fragments a récemment croisé l'orbite de la Terre pour s'écraser près de Saint-Robert. Mais d'où, dans le cosmos, ce fragment provient-il?

UN VISITEUR VENU DE LOIN

En s'éloignant progressivement du Soleil, la première planète que l'on rencontre est Mercure, suivie de Vénus, de la Terre, de Mars et de Jupiter. Entre Mars et Jupiter, se trouvent une multitude de corps rocheux de tailles variables formant une ceinture autour du Soleil: ce sont les *astéroïdes*. Le plus gros, Cérés, a 933 km de diamètre, les plus petits ont la taille de poussières. Or la chute de quelques météorites sur Terre a pu être photographiée de différents endroits simultanément. Leurs trajectoires autour du Soleil ont pu ainsi être mesurées avec précision. Elles croisent toutes l'orbite de la ceinture d'astéroïdes. De plus, ces météorites sont toutes des chondrites, comme celle de Saint-Robert! Celle-ci proviendrait donc vraisemblablement d'un astéroïde. Ce dernier s'est probablement éjecté de la ceinture d'astéroïdes par suite d'une collision avec un autre astéroïde ou aidé par la force de gravité de Jupiter, la planète géante.

Des géologues ont montré qu'il faut non pas une seule planète, mais au moins cinq planétoïdes (et jusqu'à plus de 70, selon certains scientifiques) pour expliquer les variations chimiques observées parmi toutes les météorites répertoriées. Ces planétoïdes n'auraient pas réussi à s'agglomérer en une planète unique à cause de la force de gravité de Jupiter. Mentionnons également que la ceinture d'astéroïdes n'est pas la seule source connue de météorites. Quelques-unes seraient des fragments de roche arrachés à la surface de la Lune ou de Mars à la suite d'une collision de météorites géantes, d'astéroïdes ou de comètes avec ces planètes. D'autres météorites, enfin, sont soupçonnées d'être des débris de comètes.

Ce qui fait l'originalité de la météorite de Saint-Robert, c'est la présence en son sein de particules de cuivre. Cela est peu commun et signifie qu'elle s'est peut-être formée dans des conditions particulières. La météorite de Saint-Robert n'a donc pas fini de nous livrer tous ses secrets. On peut toutefois d'ores et déjà dire qu'elle est un véritable cadeau du ciel!

Des épinettes millénaires... au Québec!

MARIE-JOSÉE LABERGE



CÔNES FEMELLES

D'ÉPINETTE

PHOTO: MARIE-JOSÉE LABERGE

En février 1995, des scientifiques australiens annonçaient la découverte en Tasmanie du plus vieil organisme vivant connu à ce jour, soit un clone¹ de pin huon (*Lagarostrobos franklinii*) âgé de 10 000 ans. Cette découverte fit bientôt la manchette des journaux spécialisés. L'absence de perturbation en forêt tasmanienne aurait été le principal facteur ayant permis à cet arbre d'atteindre un âge aussi avancé.

Lorsque la nouvelle de cette découverte me parvint, j'associé aussitôt l'extraordinaire longévité du pin huon aux températures clémentes et aux bonnes conditions de croissance offertes en Tasmanie. Pourtant, j'allais découvrir que j'avais tort. Bien que constituant un phénomène extraordinaire, l'impressionnante longévité du pin huon pourrait trouver son équivalent sous des latitudes plus septentrionales. À la limite des arbres, dans les étendues glacées du Québec subarctique, certaines formations conifériennes se maintiennent en place depuis plus de 2 000 ans. Comme quoi rigueur climatique et longévité ne sont pas nécessairement inconciliables. Bien au contraire...

LES MULTIPLES VISAGES

DE L'ÉPINETTE NOIRE (*Picea mariana*)

Le nord du Québec se présentant comme une région froide et inhospitalière, ses étendues subarctiques demeurent l'un des rares endroits, à l'échelle planétaire, encore relativement protégé de l'impact humain. L'espèce arborescente dominant le paysage est l'épinette noire. Au cours des millénaires, cette espèce omniprésente a su s'adapter à la rigueur du climat hivernal des hautes latitudes en modifiant son allure.

Possédant une grande plasticité morphologique, l'épinette noire peut adopter plusieurs formes de croissance en réponse à la rudesse du climat. Au cours de l'hiver, l'abrasion causée par les cristaux de glace soufflés à la surface de la neige endommage les aiguilles et les bourgeons terminaux, ce qui se traduit par l'adoption de formes de croissance complexes. Allant du port arborescent érigé à la forme rampante, ces multiples visages de l'épinette noire se dessinent en fonction des conditions d'exposition au froid et aux vents dominants : plus ils sont exposés, plus ils sont petits.

La forme la plus érodée rappelle celle des bonsaïs japonais, ces petits arbres inlassablement taillés dont l'allure devient sculpturale au fil des ans. Rampante, la tige suit la surface du sol, et les plants se propagent par enracinement des branches basses. Ces dernières atteignent peu à peu leur autonomie physiologique, constituant de nouveaux modules d'un même clone. Par la mortalité et le remplacement des tiges, les clones sont fréquemment fragmentés en unités distinctes possédant un bagage génétique identique. L'épinette noire rampante, qui occupe généralement des sites très exposés, se présente comme un îlot arbustif de forme circulaire.

À la suite d'une analyse génétique, je découvris que les dimensions du cercle constitué par ces formations clonales érodées pouvait être très importantes. En comparant l'empreinte génétique de plusieurs modules, je dus me rendre à l'évidence : il s'agissait en réalité d'une seule entité. L'étendue occupée par ce clone – situé près de la rivière Boniface, dans le Québec subarctique – atteignait plusieurs centaines de mètres carrés, envahissant complètement le sommet d'une colline. Devant une taille aussi impressionnante, il n'y avait qu'un pas à franchir pour conclure qu'un tel spécimen se devait d'être très âgé... pas que j'ai aussitôt franchi allègrement!

Mais comment connaître l'âge de ce clone? En raison du mode de croissance clonal, l'âge obtenu par décompte des anneaux de croissance annuelle est bien en-deçà de la réalité. Ce phénomène s'explique par la mortalité et le remplacement régulier des modules. Il est possible de déterminer l'âge et la durée de vie de chacune des tiges, sans pour autant établir l'âge réel de l'individu.

LE FEU : PERTURBATION NATURELLE ET OUTIL DE DATATION

Cet obstacle n'est pourtant pas insurmontable. Il suffit, en fait, de se pencher sur l'histoire du paysage végétal de la région. À la limite nord des forêts, le passage du feu est manifeste dans la plupart des endroits. La présence de charbons de bois dans les sols montre bien que les incendies ont modifié le couvert arborescent depuis son établissement il y a 5 000 ans. La végétation actuelle est en grande partie un produit de l'histoire des feux naturels.

Bien adaptée à ce type de perturbation, l'épinette noire se régénère au cours des premières années suivant le feu. Soumis à la chaleur de l'incendie, les cônes s'ouvrent, ce qui permet la dispersion des graines. Une fois au sol, les graines ne conservent leur viabilité que si elles germent rapidement; l'installation de nouvelles plantules est donc à peu près nulle en dehors des périodes de feu.

Quand on connaît l'époque du dernier feu sur un site, on peut déduire l'âge des formations clonales qui l'occupent actuellement. Il suffit de dater, au radiocarbone, le témoin du passage du dernier incendie, c'est-à-dire le charbon enfoui dans le sol. Pour chaque site, on obtient ainsi la date du dernier feu... et l'âge maximal de la formation clonale issue de la régénération ayant suivi l'incendie.

Selon cette méthode, l'âge d'un clone occupant plusieurs centaines de mètres carrés a été établi à plus de 2 000 ans. Bien que certaines formations paraissent beaucoup plus âgées de par leur étendue, il est actuellement impossible de connaître leur âge véritable. En effet, les charbons de bois se décomposent au bout de 2 500 ans, emportant avec eux leur secret.

LE CLIMAT COMME FONTAINE DE JOUVENCE

Cette extraordinaire longévité semble réservée aux bonsaïs naturels d'épinette noire. Sous les mêmes latitudes, les formes érigées montrent rapidement des signes de dégénérescence et s'éteignent après quelques siècles d'existence. De toute évidence, la forme rampante procure un certain avantage qui permet d'échapper aux lois du vieillissement. Mais où cet avantage se situe-t-il?

PHOTOS: MARIE-JOSÉE LABERGE



Bien avant que je me penche sur cette «épineuse» question, les horticulteurs japonais avaient, à leur façon, trouvé une partie de la solution. Par une coupe incessante de la tige, ils contraignaient les bonsais à conserver une taille réduite... augmentant ainsi leur longévité. Bien que le processus s'effectue de manière naturelle par la rigueur du climat nordique, les effets produits sont les mêmes chez l'épinette noire.

Pour bien comprendre le rôle du climat dans le rajeunissement de l'épinette noire, il faut se rapporter au modèle de croissance de l'espèce. Ce modèle génétiquement établi constitue la charpente de ce que deviendra l'arbre dans des conditions idéales de croissance. Chez l'épinette noire, le développement vertical est amorcé grâce au bourgeon terminal dominant, où les cellules sont encore indifférenciées. En cas de traumatisme, la dominance est transférée à une des branches, laquelle formera dès lors le nouvel axe principal.

Les bonsais naturels d'épinette noire constituent le stade ultime de ce modèle architectural. La détérioration soutenue de la masse foliaire par l'action des cristaux de glace au cours de l'hiver entraîne la destruction du bourgeon terminal dès que le plant dépasse le niveau de la neige. À la suite de cette perte de dominance, les branches secondaires situées près du sommet érodé prennent le relais. Chacune des branches ayant repris la dominance est appelée *réitérat*. Les jeunes réitérats connaissent une croissance très rapide. Ce développement accéléré entraîne la dégradation de la tige endommagée, car une part importante de l'énergie est désormais consacrée au développement des réitérats. L'ensemble du processus se répète à l'infini, au fur et à mesure que les réitérats dépassent la hauteur de la couche de neige protectrice et subissent, à leur tour, les affres de l'érosion hivernale.

L'apparition de chaque nouveau réitérat contribue au rajeunissement physiologique du clone. Ce renouvellement permet en outre une meilleure exploitation de la lumière, puisque l'activité photosynthétique² est optimale chez les nouvelles feuilles, alors qu'elle décroît avec leur vieillissement.

En augmentant la masse foliaire du clone, la réitération permet à ce dernier de conserver un bilan énergétique positif. Durant la croissance en hauteur, la production de tissus de soutien augmente avec la taille de l'arbre. Cette demande énergétique accrue doit être compensée par le développement de la masse foliaire. Lorsque la demande énergétique des tissus de soutien est supérieure à la capacité photosynthétique de l'individu, l'arbre montre des signes de sénescence. L'adoption du port rampant permet à l'épinette noire de conserver un rapport feuilles/bois élevé. Elle évite ainsi les écueils du vieillissement, ce qui lui permet de se maintenir pendant des millénaires, sans pour autant perdre son air de jeunesse!

En l'absence de feux, rien n'indique que les formations clonales d'épinette noire soient appelées à disparaître. Qui sait? Certaines d'entre elles parviendront peut-être à atteindre l'âge vénérable du pin huon tasmanien! Considérée comme l'espèce banale par excellence, d'aspect modeste, l'épinette noire réussit pourtant à défier le temps par une simple modification de son allure. L'extraordinaire longévité atteinte par ces petits bonsais naturels commande un certain respect. De quoi voir d'un œil neuf les humbles réalités qui peuplent notre décor...

NOTES:

1. Individu ou ensemble d'individus issus d'un être unique par reproduction asexuée.
2. Relatif à la photosynthèse: assimilation de la lumière par les plantes, favorisant la croissance de celles-ci.

L'ÉPINETTE NOIRE
SE RÉGÈNÈRE
AU COURS DES
PREMIÈRES
ANNÉES SUIVANT
LE FEU.

Des bébés, des mots et des choses

DIANE POULIN-DUBOIS



On cite fréquemment les habiletés langagières, particulièrement celles des jeunes enfants, comme un trait distinctif de l'espèce humaine. Un jeune enfant émet son premier mot vers l'âge de 12 mois et, quelques mois plus tard, il possède déjà un vocabulaire d'environ 500 mots et maîtrise les rudiments de la syntaxe de sa langue maternelle. Comment peut-on expliquer cette prodigieuse capacité d'apprentissage? Depuis les années 60, les recherches sur l'acquisition du langage se sont développées et, avec elles, de nouvelles méthodes expérimentales qui permettent aux psycholinguistes d'étudier les performances langagières de bébés de plus en plus jeunes.

Notre équipe de recherche explore, depuis plusieurs années, les stratégies qui guident l'acquisition du sens des mots chez le bébé et le jeune enfant. Un phénomène «mystérieux» sur lequel nous nous sommes penchés concerne l'explosion du vocabulaire, qui s'observe vers l'âge de 18 à 20 mois. Vers cet âge, en effet, la plupart des enfants commencent à enrichir leur vocabulaire à un bon rythme (8 mots et plus par semaine), après avoir mis plusieurs mois à acquérir lentement leurs premiers mots.

Comment expliquer ce changement soudain? Nous avons suivi, de façon assidue, le développement du vocabulaire chez un groupe de 16 enfants anglophones et francophones âgés de 12 à 24 mois; cette observation nous a permis de découvrir que l'explosion du vocabulaire coïncidait avec la capacité de se représenter mentalement des catégories d'objets, c'est-à-dire notamment de comprendre que les chiens et les chevaux appartiennent à deux classes d'animaux différentes. Les résultats de notre étude suggèrent que l'enfant comprend soudainement que chaque nom désigne une catégorie... ou que chaque catégorie doit pouvoir être dénommée.

PHOTO: SERVICE DE RECHERCHE, UNIVERSITÉ CONCORDIA

JEUNE ENFANT
PARTICIPANT À
LA RECHERCHE
SUR LE
LANGAGE.



UN OISEAU SANS AILES OU UN SANGLIER QUI FAIT LA ROUE...

Chez l'adulte, il n'existe pas vraiment de critères essentiels pour définir les membres d'une catégorie naturelle. Ainsi, un oiseau sans ailes est toujours un oiseau... Cette définition des catégories naturelles est-elle en place dès les premiers stades du développement lexical ou se développe-t-elle avec l'expérience? Pour répondre à cette question, nous avons présenté à des groupes de bébés âgés de 12, 15 et 18 mois des paires d'images d'objets et d'animaux sur des écrans d'ordinateur; nous avons mesuré leur temps de fixation visuelle sur chaque image à partir du moment où une voix leur demandait de trouver l'objet correspondant à un mot (p. ex., «Où est le chien?»).

Dans certains cas, la paire d'images comprenait un membre de la catégorie dénommée par le mot (p. ex., un chien) et un membre d'une autre catégorie (p. ex., une automobile). Dans d'autres cas, la paire d'images comprenait un membre typique de la catégorie énoncée ainsi qu'un autre membre identique, à une exception près: une de ses parties caractéristiques avait été éliminée (p. ex., un oiseau sans ailes). Dans ces derniers cas, nous avons observé que les bébés considéraient le membre incomplet comme bizarre dès l'âge de 18 mois. Ils ont en effet exploré visuellement cet objet beaucoup plus longtemps que l'autre. Nous avons découvert par la suite que ce comportement n'était pas simplement attribuable à la nouveauté des objets incomplets, car la présentation des mêmes images sans le contexte verbal n'a entraîné aucune préférence visuelle.

Si l'absence de certaines propriétés des objets est remarquée dès l'âge de 18 mois, se peut-il que ces propriétés servent de point d'ancrage pour l'acquisition de nouveaux mots? Notre équipe a voulu répondre à cette question en enseignant des mots nouveaux à des enfants âgés de 20 mois. Parmi les nouveaux mots enseignés, certains correspondaient à des catégories ne possédant pas de caractéristiques saillantes (p. ex., *pigeon*), alors que d'autres mots référaient à des objets possédant de telles caractéristiques (p. ex., *paon*). Nous avons posé l'hypothèse que le second groupe de mots serait acquis plus facilement que le premier si ces caractéristiques servaient de points d'ancrage pour les enfants. Et c'est exactement ce que nous avons observé.

Mais attention! Les enfants de cet âge, comme les adultes, n'ont pas conclu que le mot *paon* dénommait uniquement la queue du paon, puisqu'ils ont choisi un paon sans sa queue lorsqu'on leur a demandé par la suite de trouver le paon parmi une série d'images. Ils ont par ailleurs aussi compris que la queue du paon représentait un bon indice de la catégorie puisqu'ils ont choisi l'image d'un sanglier auquel une queue de paon avait été ajoutée, préférablement à des images d'autres animaux non familiers.

CHERCHER LE «DAX»...

L'acquisition d'un nouveau mot implique que l'enfant réussisse à circonscrire le sens que donne à ce mot la communauté linguistique à laquelle il appartient. Par exemple, comment un bébé arrive-t-il à la conclusion que le mot «oiseau» réfère à une catégorie d'animaux, lorsqu'il voit l'adulte pointer vers un animal perché sur une branche d'arbre au moment où le mot lui est présenté? D'autres sens sont possibles, tels que «un animal sur une branche», «des plumes», «un petit animal», etc. Nos recherches indiquent

que les bébés ont déjà élaboré des stratégies afin de limiter le nombre de sens possibles. L'une de ces stratégies, le principe taxonomique, semble même être en place dès l'âge de 18 mois.

Des recherches ont démontré que lorsqu'on demande à des enfants d'âge préscolaire d'apparier l'image d'un objet familier (p. ex., un biberon) avec soit celle d'un objet ayant un lien catégoriel avec le premier (p. ex., un bol), soit celle d'un objet ayant un lien thématique (p. ex., une chaise haute), ils choisissent, en l'occurrence, la chaise haute, privilégiant ainsi le lien thématique. Cependant, si les mêmes images sont présentées à un autre groupe d'enfants du même âge, mais qu'on leur désigne le biberon sous un nom inventé (p. ex., *dax*), les enfants privilégient alors la relation catégorielle; en effet, ils choisissent le bol lorsqu'on leur demande de trouver l'autre «*dax*».

Nous avons constaté que c'est plutôt la forme de l'objet qui guide l'enfant plus jeune dans son effort de généralisation des nouveaux mots. Ainsi, lorsqu'on a demandé à des enfants de 18 et de 24 mois de généraliser un pseudo-mot (*dax*), ils ont été enclins à l'apparier davantage en fonction de la forme (p. ex., banane-combiné de téléphone) que de l'appartenance catégorielle (p. ex., banane-fraise). Il semble donc que les jeunes enfants soient prêts à transgresser les barrières catégorielles lorsqu'ils généralisent les mots, contrairement aux adultes et aux enfants plus âgés.

Pourquoi? Nous pensons qu'il s'agit là d'une stratégie très efficace aux premiers stades du développement verbal. Après tout, la plupart des noms font référence à des catégories d'objets qui se ressemblent et que l'on appelle «catégories de base» (*chien, chaise, voiture*). Ces premières catégories lexicales sont celles que les adultes trouvent les plus importantes, et les mots qui les désignent sont ceux qu'utilisent les parents avec leurs jeunes enfants. Ce n'est qu'après avoir acquis un vocabulaire minimal que les enfants commencent à acquérir des termes qui dénomment des catégories plus «abstraites» (p. ex., *animal, meuble, véhicule*).

DU PAIN SUR LA PLANCHE... DES PSYCHOLINGUISTES!

La plupart des études portant sur le développement du vocabulaire sont

effectuées auprès d'enfants unilingues et en bonne santé. Récemment, nous avons orienté nos efforts de recherche vers d'autres populations d'enfants, afin de mieux comprendre les principes à l'origine du développement lexical. Par exemple, on sait qu'avant l'âge de 3 ans, les jeunes enfants unilingues refusent d'accepter un autre mot pour désigner un objet dont le nom leur est déjà familier. Ils refusent, par exemple, qu'on utilise le mot *animal* pour désigner un chien. Ce principe, appelé «principe de l'exclusivité mutuelle», est-il abandonné plus rapidement chez les enfants exposés à deux langues dès leur naissance? C'est ce que nous saurons bientôt grâce à une étude en cours dans notre laboratoire, qui porte sur l'apprentissage de nouveaux mots par des enfants unilingues et des enfants bilingues âgés de 26 à 34 mois.

Nous posons l'hypothèse que les enfants bilingues démontreront une capacité à rejeter le principe de l'exclusivité mutuelle plus précocement que les enfants unilingues. Il est également possible que cette précocité langagière se généralise au domaine non verbal. Elle pourrait se manifester par une compréhension plus précoce du concept de perspective visuelle, c'est-à-dire du fait que deux personnes peuvent avoir une perception différente d'un même objet selon leur angle de vision.

Comment une lésion cérébrale survenant au cours de la deuxième année entrave-t-elle la poussée de vocabulaire observée vers l'âge de 18 à 20 mois? L'explosion du vocabulaire est-elle retardée pendant que l'enfant récupère le vocabulaire acquis avant la lésion, ou les deux développements se font-ils de façon parallèle? La composition du vocabulaire est-elle la même avant et après la survenue du traumatisme, ou certains types de mots sont-ils plus susceptibles de disparaître du vocabulaire? Ce ne sont que quelques-unes des questions auxquelles une autre étude en cours nous permettra de répondre.

À ce jour, nos recherches indiquent donc que les bébés établissent des hypothèses sur la nature des liens entre les mots et les choses dès les premières étapes de leur développement verbal. L'origine de ces stratégies, ainsi que les conditions qui facilitent ou entravent leur éclosion, n'ont pas fini d'occuper les psycholinguistes.

Le cerveau glouton

ELVIRE VAUCHER

Le cerveau. Sa complexité fascine, la multitude de ses fonctions ébahit. Les philosophes grecs le considéraient déjà comme l'organe de la pensée, de l'âme; certains neurobiologistes actuels l'ont consacré «super-ordinateur». Mais, entre l'immatérialité des processus psychiques et la rigidité des câblages neuronaux, il y a tout un monde biologique.

Biologique, donc vivant. Et, c'est bien connu, le monde vivant a besoin d'éner-

gie pour fonctionner. Le cerveau, aussi prestigieux soit-il, n'échappe pas à cette loi. Il doit puiser dans le sang tous les éléments nutritifs nécessaires à son bon fonctionnement. Il est même très bon vivant puisqu'il consomme à lui seul 18 p. cent de l'oxygène disponible pour le corps entier. Très récemment, des chercheurs ont découvert qu'il serait capable de gérer lui-même son propre apport de sang, localement, pour assouvir son appétit. Cette découverte se fonde sur l'observation de la communication entre les cellules du cerveau et les vaisseaux sanguins.

DU FONCTIONNEMENT CELLULAIRE...

Avant de plonger dans le vif du sujet, effectuons le tour du cerveau. Masse ovoïde familière à tous, cet organe possède des milliards de cellules. Les plus connues sont les neurones. Ceux-ci sont composés d'un corps cellulaire prolongé de fibres nerveuses, à l'image d'un transformateur et de ses fils électriques (*figure 7*). Leur prolongement principal, l'axone, peut par-

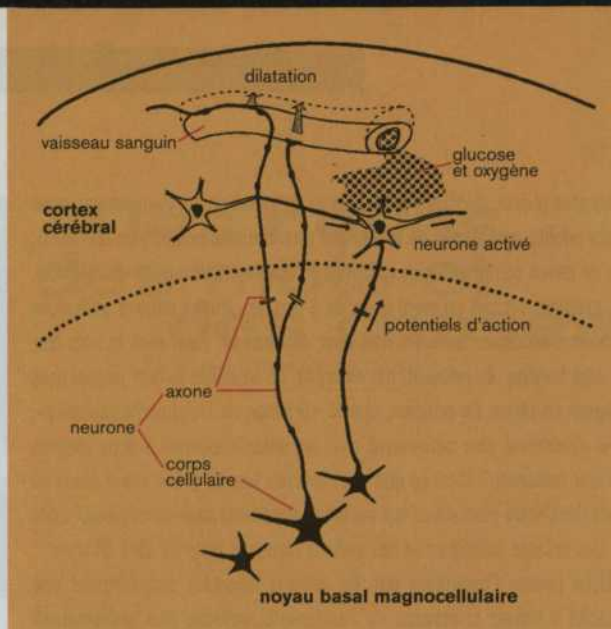


Figure 1: Schéma récapitulatif de l'action des neurones du NBM sur les vaisseaux du cortex cérébral.



CNRS URA 641

Figure 2: Effets de la stimulation du NBM sur le débit sanguin (droite) et la consommation de glucose (gauche) à différents niveaux du cerveau de rat. Les couleurs représentent les valeurs mesurées par autoradiographie, technique équivalente à la tomographie par émission de positons (en rouge, valeurs élevées; en bleu, faibles valeurs).

courir de très longues distances: jusqu'à plus d'un mètre, dans le cas des motoneurones de la moelle épinière! Cet axone se ramifie et contacte d'autres cellules, situées souvent dans une région cérébrale éloignée. Un seul neurone peut établir jusqu'à 50000 connexions!

La communication neuronale est codée par des signaux électriques, les potentiels d'action. Ces potentiels d'action sont générés par des échanges de particules chargées entre le neurone et son milieu extérieur. Émis par le corps cellulaire, ils parcourent l'axone jusqu'aux cellules cibles. Plus le neurone est activé, plus leur fréquence d'émission est grande et plus ils stimulent les cellules contactées. La fréquence des potentiels d'action re-

présente donc un code, entre le morse et le langage binaire, destiné à transmettre l'information nerveuse d'une cellule à l'autre.

Mais les neurones ne se contentent pas de télégraphier; ils communiquent aussi par voie chimique. Tout le long de l'axone, ainsi qu'à son extrémité, il existe des petits renflements qui contiennent des molécules chimiques, les neurotransmetteurs. Déversés au passage des potentiels d'action, les neurotransmetteurs vont modifier l'activité électrique des cellules adjacentes, par l'intermédiaire de récepteurs. À son tour, le neurone cible émet des potentiels d'action à destination d'autres neurones. L'information nerveuse est ainsi transmise de régions en régions. Ces cascades de réactions électriques et chimiques nous permettent de percevoir, de ressentir, de mémoriser, de parler, de créer, de manger, de rêver ou de rire...

Pour effectuer toutes ces réactions, ces petits travaux perpétuels, la cellule utilise, tout comme nous, de l'énergie et de l'oxygène. Elle trouve les deux dans le sang: son unique source énergétique est le glucose, un sucre issu des aliments; son oxygène provient des poumons. Des organes prévoyants, comme le foie, stockent le glucose sous forme de glycogène et se constituent ainsi de précieuses réserves d'énergie pour les journées de dur labeur.

Le cerveau, lui, est incapable d'un tel stockage, il consomme tout au fur et à mesure. Pour fonctionner, ce glouton est tributaire d'un afflux constant de glucose et d'oxygène, donc de sang. De plus, lorsque les cellules sont activées en réponse à une stimulation nerveuse, leur consommation énergétique s'élève. Il faut alors que l'apport de sang augmente aussi. Inversement, si le sang vient à manquer – au moment d'une attaque cérébrovasculaire, par exemple –, les neurones, privés d'énergie, meurent. Il n'y a alors plus de communication de cellule en cellule, la chaîne de l'information nerveuse est interrompue; c'est pourquoi ces attaques sont généralement suivies de troubles de la parole, de paralysies, etc.

En médecine, une technique d'imagerie cérébrale exploite cette relation proportionnelle entre afflux de sang et activité neuronale. Malgré son nom ronflant, la «tomographie par émission de positons» est assez simple: un traceur radioactif est injecté dans la circulation sanguine; grâce à un scanner et après traitement informatique, les zones cérébrales denses en radioactivité sont détectées (figure 2). Ces zones correspondent aux régions possédant un fort débit sanguin, donc à celles qui réclament beaucoup de glucose parce qu'elles sont engagées dans une intense activité neuronale. Si l'on soumet le sujet à une tâche comme la lecture, la parole, etc., les régions du cerveau intervenant dans cette tâche sont ainsi localisées.

La tomographie par émission de positons nous révèle donc le cerveau comme un immeuble pendant la nuit: lorsqu'il y a de l'activité dans une des pièces, la lumière s'allume et nous, observateurs extérieurs, pouvons localiser l'endroit de l'action. Ainsi, dans le cerveau, chaque région – chaque pièce – prend part à une fonction donnée. Par exemple, lorsque nous lisons, c'est le cortex – la structure la plus externe du tissu cérébral – à l'arrière du cerveau qui s'active; si nous écoutons de la musique, c'est le cortex latéral; si nous nous rappelons des mots, c'est au niveau du cortex frontal que le débit augmente. Dans notre immeuble plein de vie, les pièces s'allument, s'éteignent, furtivement ou longuement, séparément ou en harmonie, selon l'activité des locataires...

... À LA RÉGULATION DU DÉBIT SANGUIN

Jusqu'à présent, tout est simple: un neurone reçoit de l'information nerveuse; excité, il transmet l'information par voie électrique et chimique à des milliers d'autres cellules; la région cérébrale en cause est activée; ses neurones, en plein fonctionnement, ont alors besoin d'énergie, laquelle leur est fournie par une augmentation du débit sanguin. Mais quels mécanismes déclenchent l'augmentation de débit sanguin ?

Cette question, les chercheurs se la posent depuis 1890, date à laquelle Roy et Sherrington ont proposé la théorie de la régulation métabolique de la circulation sanguine. Lorsque les neurones d'une zone du cerveau s'activent (par exemple, dans le cortex latéral à la suite de l'écoute d'une musique), ils consomment l'oxygène et le glucose, et les digèrent en quelque sorte. Les facteurs métaboliques – produits de cette digestion – comme le gaz carbonique ou l'adénosine sont rejetés de la cellule. La voracité des neurones entraîne rapidement l'accumulation des facteurs métaboliques. Ce sont ces derniers qui, selon Roy et Sherrington, agiraient sur les fibres musculaires des vaisseaux sanguins et provoqueraient leur dilatation: le diamètre du vaisseau s'agrandit, le débit sanguin augmente.

Cette théorie a régné pendant presque un siècle en neurosciences. Mais, depuis une dizaine d'années, des groupes en recherche cérébrovasculaire proposent d'autres explications à la régulation du débit sanguin cérébral.

Pourquoi? Tout simplement parce que, dans certains cas, les chercheurs ont détecté des augmentations de débit sanguin sans trace de facteurs métaboliques. Cela suggère que, dans ces cas, un autre mécanisme agit pour commander la dilatation des vaisseaux. Les chercheurs sont naturellement allés voir du côté des neurones. Si ces derniers étaient capables d'induire l'activation d'autres cellules, alors pourquoi n'agiraient-ils pas aussi sur les vaisseaux? Et l'on a justement découvert que les neurones intracérébraux communiquaient aussi avec les artères (*figure 1*).

Par exemple, on a montré que les neurones localisés à la base du cerveau dans le «noyau basal magnocellulaire» (NBM) – le sous-sol de notre immeuble – sont connectés par leur axone – l'escalier principal – à des cellules et à des vaisseaux sanguins situés à la surface du cerveau, dans le cortex – les combles de l'immeuble. Si les neurones du NBM sont activés expérimentalement chez le rat, une forte augmentation de débit sanguin apparaît dans le cortex. C'est un des cas d'augmentation de débit sanguin non couplée à un accroissement de l'activité neuronale (*figure 2*). En effet, les cellules du cortex ne consomment pas de glucose, dans la même situation. Grâce à leur axone, les neurones du NBM commandent donc directement la dilatation des vaisseaux sanguins du cortex.

Cette découverte récente jette un éclairage nouveau sur la régulation du débit sanguin cérébral. Pour bien en comprendre l'intérêt, permettons-nous une petite parenthèse. Il faut savoir que les neurones du NBM entrent en activité au moment de l'accomplissement de tâches faisant intervenir l'attention, l'apprentissage et la mémoire. Ce sont eux qui permettent, en partie, l'acquisition de nouvelles données sensorielles; ils perçoivent le stimulus sensoriel et transmettent l'information nerveuse au cortex cérébral qui, lui, a pour fonction d'élaborer une réponse adéquate. Par exemple, c'est grâce au NBM qu'un singe va apprendre qu'à la présentation de tel point lu-

mineux (le stimulus sensoriel), il doit appuyer sur un levier (la réponse) en échange d'un fruit. Fermons la parenthèse.

Les neurones du NBM sont donc doués de deux fonctions: ils activent les cellules du cortex et, parallèlement, provoquent une augmentation de débit sanguin dans cette région. Grâce à ce mécanisme, les cellules du cortex sont capables de traiter avec efficacité de l'information nerveuse, sans manquer de glucose pour s'exécuter.

Ainsi, à l'intérieur du cerveau, il existerait des systèmes neuronaux (comme le NBM) capables de contrôler l'apport de sang dans d'autres régions cérébrales (ici, le cortex). La communication cellulaire d'une aire cérébrale à l'autre ne se limiterait donc pas au traitement de l'information nerveuse, comme le ferait un ordinateur; les cellules seraient, en plus, capables d'anticiper la demande énergétique de l'aire avec laquelle elles communiquent. Elles élèveraient en conséquence l'afflux de glucose et d'oxygène pour préparer cette zone à l'accroissement imminent de son activité neuronale.

Ces cellules agiraient comme un interrupteur placé dans le sous-sol de notre immeuble de nuit, qui, simultanément, favoriserait l'activation de telle ou telle pièce et fournirait la lumière pour ce faire. Toujours en appétit, le cerveau serait capable – et ce, de façon autonome – de subvenir à ses besoins énergétiques avant même qu'un manque se fasse ressentir. C'est une première dans le monde des organes!

GARE À LA DIÈTE!

Et si cette communication entre neurones et vaisseaux sanguins venait à faillir? Si les neurones, devenus non fonctionnels, n'engendraient plus d'augmentation de débit sanguin? Si les vaisseaux sanguins, devenus rabougris, ne fournissaient plus de glucose ni d'oxygène aux cellules? Sans être devins, nous pouvons prévoir que cette situation aboutirait à la mort certaine de milliers de neurones, incapables de survivre sans leur dose constante d'énergie. Et mort neuronale signifie dégénérescence du cerveau.

Malheureusement, ce sinistre tableau pourrait apparaître plus souvent qu'on ne le croit. Et pourquoi pas aussi dans la maladie d'Alzheimer? Chez les personnes atteintes de cette maladie, les neurones du NBM sont détruits, ce qui entraîne la perte de mémoire, d'attention, etc., puisque ces neurones contribuent à l'acquisition et à la mémorisation de l'information nerveuse. Mais des études récentes démontrent que la structure des vaisseaux sanguins cérébraux est, elle aussi, altérée.

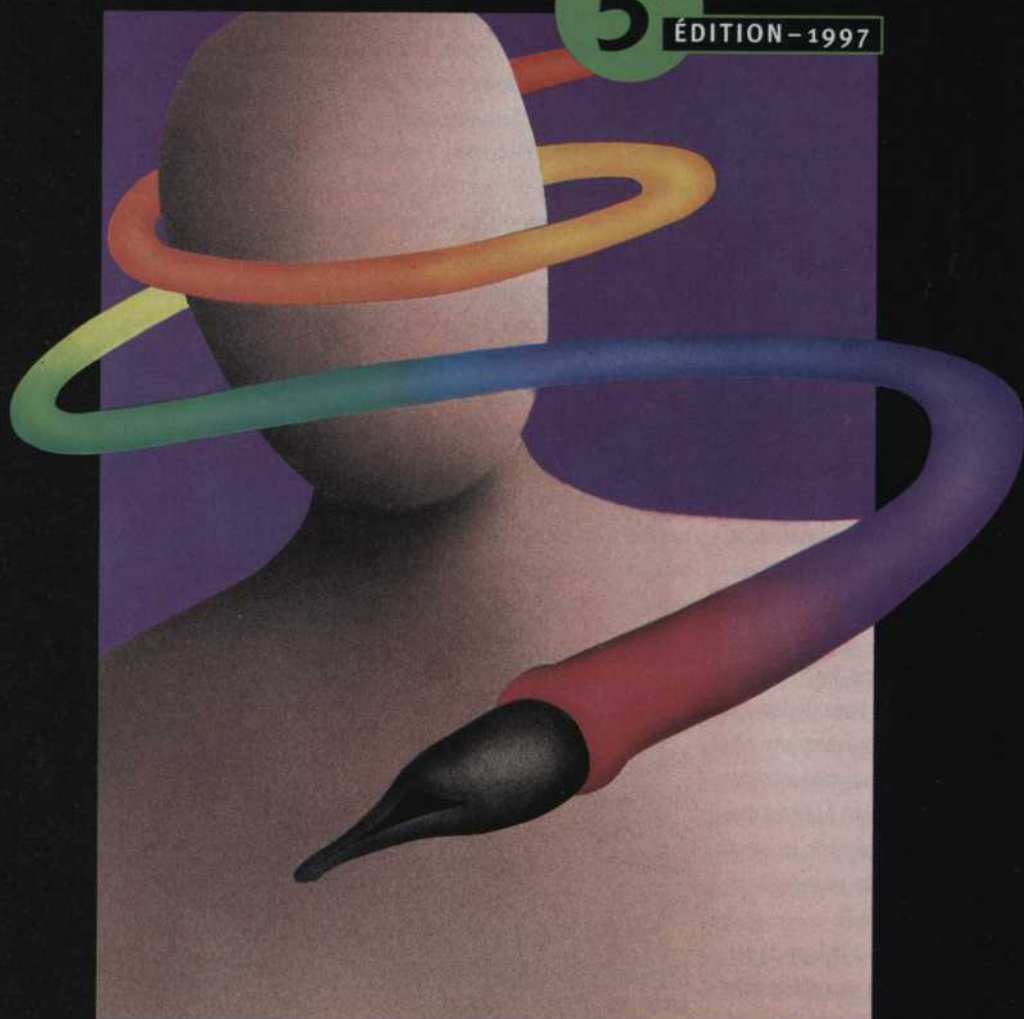
Existe-t-il une relation de cause à effet entre la destruction systématique des neurones du NBM et celle des vaisseaux sanguins, dans la maladie d'Alzheimer? La réponse à cette question est encore inconnue. Mais elle pourrait engager les recherches dans une nouvelle voie. Une voie pour conserver notre cerveau actif et bien vivant.

RÉFÉRENCES:

- EDVINSSON, L., MacKENZIE, E. T. et McCULLOCH, J. *Cerebral Blood Flow and Metabolism*, New York, Raven Press, 1993.
- KALARIA, R. N. «The Blood-Brain Barrier and Cerebral Microcirculation in Alzheimer Disease», *Cerebrovasc. Brain Metab. Rev.*, 4, 1992, p. 226-260.
- REIS, D. J. et IADECOLA, C. «Regulation By the Brain of Its Blood Flow and Metabolism: Role of Intrinsic Neuronal Networks and Circulating Catecholamines», *Neural Regulation of Brain Circulation* (C. Owman et J.E. Hardebo, éd.), Amsterdam, Elsevier, 1986, p. 129-145.

Concours de Vulgarisation Scientifique de l'Acfas

5^e ÉDITION - 1997



Date de clôture du concours:
1^{er} février 1997

Pour qui?

- Les professeurs et professeurs des cégeps et universités ainsi que toute autre personne faisant de la recherche dans ces établissements;
- Les chercheuses et chercheurs des centres de recherche publics et privés;
- Les étudiantes et étudiants universitaires des 2^e et 3^e cycles.

De plus, le concours est ouvert aux francophones du Canada résidant à l'extérieur du Québec ainsi qu'aux étudiants et travailleurs étrangers en séjour au Québec.

Comment participer?

- Soumettre un article traitant de son sujet de recherche. Cet article doit comporter un maximum de cinq feuillets à interligne double. Joindre un bref curriculum vitæ.
- La qualité de la rédaction, la rigueur scientifique, le souci de vulgarisation et l'originalité du traitement seront les critères de base retenus par le jury pour la sélection des gagnantes et gagnants.

Prix:

- Six prix de 2000\$ répartis dans les trois catégories de participantes et participants, ainsi que la publication des textes primés.

Le Concours de vulgarisation scientifique de l'Acfas est l'occasion de rendre accessible au grand public tous les domaines dans lesquels travaillent nos chercheuses et chercheurs, qu'il s'agisse d'histoire, de démographie, de nutrition, de biotechnologie, d'océanographie ou de sciences de l'environnement, etc.

Un guide de vulgarisation scientifique peut être obtenu sur demande.

Pour recevoir le formulaire d'inscription au concours et le guide de vulgarisation, s'adresser à:



Association canadienne-française
pour l'avancement des sciences

425, rue 132, LaSalle (Québec) Est
Montréal, Québec
H3L 2M1

Tél. (514) 848-0045

Télex: 35741-848-0045

Courriel électronique: concours@www.acfas.ca