

France Culture et Pour la Science

**vous invitent
au Palais
de la découverte
à l'enregistrement
de l'émission**

**les
Inattendus
de la
Science**

**Samedi 8 mars 1997
à 15h**

*Les inattendus
en neurophysiologie*

avec Henri Korn,
directeur de recherche
à l'INSERM

**Invitations à demander
au 08 36 68 10 99 (2,23F/mn)**



Palais de la découverte

**POUR LA
SCIENCE**

tamine, les maladies apparaissent. Ce nombre dépasse même 100 dans les cas des maladies de Huntington les plus précoces et les plus graves.

Pourquoi l'excès de glutamine est-il toxique? La présence d'un long motif polyglutaminique confère-t-elle des propriétés nouvelles à ces protéines, qui deviendraient neurotoxiques? La mutation n'est présente que sur une des deux copies du gène incriminé, de sorte que la protéine normale est toujours synthétisée à partir du gène normal. En revanche, le gène muté code une nouvelle protéine anormale, qui est responsable de la maladie. Selon Howard Green, de l'Université Harvard, la protéine mutée serait anormalement sensible à la transglutaminase neuronale, une enzyme qui catalyse la formation de liaisons fortes entre protéines : la mort neuronale résulterait d'une accumulation d'agrégats de protéines stabilisés par les liaisons covalentes formées par la transglutaminase.

Avec H. Green, nous avons apporté des arguments importants en faveur de cette hypothèse. Aucune des protéines responsables de maladie neurologique n'avait été purifiée, mais nous connaissions leurs séquences d'après celles des gènes qui les codent. Nous avons étudié l'action de l'enzyme transglutaminase sur des fragments de ces protéines (des peptides) contenant des quantités variables de glutamine : la transglutaminase agit sur les peptides qui contiennent plusieurs motifs glutamine, mais elle n'agit pas sur les peptides qui ne contiennent qu'une seule glutamine. En présence de transglutaminase et de protéines cérébrales, les peptides qui contiennent plusieurs motifs glutamine forment des agrégats insolubles, stabilisés par des liaisons covalentes. Ainsi, toute protéine qui acquiert un motif polyglutaminique devient une cible pour la transglutaminase et peut former des agrégats.

Toutefois, les sept protéines sont synthétisées dans tous les tissus et l'on s'interroge : pourquoi les neurones sont-ils les seules cellules détruites? Peut-être en raison de la présence d'ions calcium : l'activation de la transglutaminase requiert des ions calcium et la concentration neuronale en ions calcium est élevée pour assurer la transmission de l'influx nerveux. De surcroît, contrairement aux autres cellules de l'organisme, les neurones ne se renouvellent pas et les agrégats protéiques s'y accumulent progressivement.

D'autres questions restent ouvertes : quelles sont les protéines cérébrales qui s'agrègent aux protéines contenant des motifs polyglutaminiques? Les inhibiteurs de la transglutaminase traversent-ils la barrière qui protège le cerveau et sont-ils efficaces pour empêcher la formation des agrégats? Pourra-t-on dissoudre les agrégats déjà formés? Des modèles animaux de ces maladies ont été élaborés récemment et devraient aider les neurobiologistes à répondre à ces questions.

Philippe DJIAN – Centre de recherche sur l'endocrinologie moléculaire – CNRS

RMN et vipères

**Des techniques d'exploration
médicale sont utilisées
en écologie.**

Les ressources des animaux sont limitées et réparties entre la reproduction, la croissance et la maintenance de l'organisme. Des compromis s'établissent ainsi entre des voies physiologiques et comportementales concurrentes.

La diversité des stratégies de reproduction exprime les solutions adoptées par les diverses espèces. Certains animaux constituent d'abord des réserves corporelles, qu'ils utilisent ultérieurement pour la reproduction ; d'autres investissent directement les ressources tirées de l'environnement dans la reproduction, sans stockage intermédiaire. Les premières doivent avoir un mode de vie qui préserve les réserves accumulées, tan-

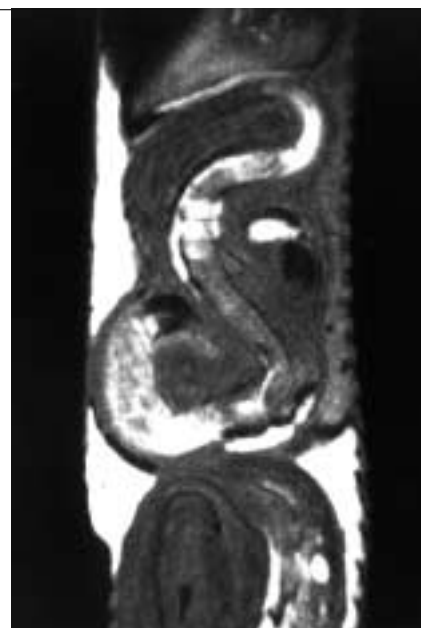


Image RMN d'une femelle en fin de gestation : on observe, de haut en bas, le reste d'un œuf qui a régressé, et deux vipéreux sur le point de naître.

X. Bonnet et S. Alakia



X. Bonnet et S. Akoka

Mise bas d'un vipéreau.

dis que les secondes doivent avoir un mode de vie plus actif, parce qu'elles doivent trouver continuellement des ressources dans l'environnement.

La vérification de tels comportements est difficile, parce que l'identification et l'estimation des réserves corporelles nécessite l'autopsie des animaux. Les mesures de la résistance électrique d'animaux vivants ne discernent pas les réserves, et la mesure de la dissolution du cyclopropane (un gaz très soluble dans les graisses) permet d'estimer la quantité totale de lipides corporels chez certaines espèces, mais l'animal reste alors une boîte noire : on ne sait pas si les valeurs mesurées se rapportent aux réserves maternelles ou aux lipides déposés dans les œufs en formation.

Aussi connaissait-on mal la physiologie de nombreuses espèces, tels les serpents. Ces animaux discrets intéressent peu de biologistes, alors qu'ils sont utiles pour le test des idées théoriques : comme ils ne prodiguent aucun soin parental aux nouveau-nés, et que les embryons se développent exclusivement à partir des réserves accumulées dans les œufs, le succès reproducteur des femelles dépend de leurs capacités à fabriquer le plus grand nombre possible d'œufs, de la meilleure qualité possible, afin de produire des serpenteaux autonomes.

En étudiant la vipère aspic, espèce vivipare, nous avons récemment démontré que la résonance magnétique nucléaire (RMN) permet de relier le mode de vie et la morphologie des serpents avec leur stratégie de reproduction. La résonance magnétique nucléaire est classiquement utilisée en imagerie de l'hydrogène : on dresse des cartes de la répartition en noyaux d'hydrogène (et donc en eau, qui en contient) dans les échantillons. Tou-

tefois les biophysiciens ont également mis au point des appareils de spectroscopie, qui, se fondant sur la présence de phosphore et de carbone, par exemple, permettent de déterminer la nature des molécules et de distinguer l'eau des lipides. On obtient ainsi des images de la composition chimique des corps vivants.

Pouvait-on, tout d'abord, identifier et mesurer les réserves corporelles de femelles adultes ? Par RMN, nous avons visualisé les réserves que les femelles accumulent, durant plusieurs années, avant d'atteindre une condition physique suffisante pour se reproduire. Puis, à l'aide de mesures de spectrométrie, nous avons déterminé la quantité de lipides corporels et mis au point un indice de condition corporelle, fondé sur la longueur et sur la masse corporelle des animaux (indice ultérieurement utilisable sur le terrain, sans RMN). Ces données ont été confrontées à des résultats antérieurs, issus d'autopsies : la parfaite concordance des deux méthodes valide les observations faites par RMN.

Comment les réserves maternelles sont-elles investies, au cours de la croissance des œufs ? Pour étudier cette question, nous avons capturé des femelles de vipère aspic dès le début de la saison de reproduction, avant l'utilisation des réserves maternelles pour la reproduction ; certains de ces animaux avaient pu s'accoupler, d'autres non. La RMN a montré que les réserves maternelles «fondaient» au cours des trois mois que durent la formation des œufs. Ainsi, chez certaines espèces, la reproduction dépend des réserves accumulées par la mère avant la reproduction (là encore, les résultats ont été validés par des autopsies).

Au cours de leur captivité, certaines femelles qui n'avaient pas été fécondées

ont cessé de former des œufs, tandis que d'autres ont ovulé. Cette observation a permis de résoudre un problème du type de la poule et de l'œuf : l'accouplement est-il nécessaire pour que les œufs se forment, ou bien la croissance folliculaire rend-elle les femelles attrayantes pour les mâles, qui s'accouplent alors avec elles ? La RMN, en permettant un suivi individuel des animaux, a montré qu'il existe des tactiques différentes selon les femelles d'une même espèce : certaines renoncent prudemment à la reproduction, d'autres espèrent trouver un mâle jusqu'au dernier moment.

Enfin nous avons voulu connaître l'évolution des œufs, au cours de la gestation, qui dure trois mois chez la vipère aspic. Les quantités considérables d'énergie et de matière investies par les femelles

pour former des œufs étaient-elles complètement transformées en vipéreaux ? Le suivi individuel par RMN a clairement révélé des phénomènes qui étaient restés purement hypothétiques : par exemple, une femelle a ovulé en juin quatre œufs quasi identiques, mais, trois mois plus tard, seuls deux vipéreaux sont nés. Nous avons ainsi la preuve directe que deux œufs sur quatre ont régressé pendant la gestation. La RMN a révélé que, très tôt après l'ovulation, les deux œufs qui se sont développés étaient pourvus d'embryons, ce qui n'était pas le cas des deux autres. Il reste à comprendre pourquoi 50 pour cent seulement des œufs de cette femelle étaient fécondés.

Enfin nous avons observé que les vipéreaux sur le point de naître, mais qui sont encore dans les voies génitales de la

femelle, avaient eux-mêmes accumulé d'importantes réserves de lipides. Cette accumulation est nécessaire, car les vipéreaux ne s'occupent pas des vipéreaux, qui doivent survivre durant les six à huit premiers mois de leur vie sans s'alimenter.

Les techniques mises au point pourraient être appliquées à d'autres serpents, mais aussi à d'autres groupes animaux, tels les oiseaux ou les mammifères. Signalons enfin que ces recherches d'écologie évolutive que nous menons ne coûtent pas cher, car nous utilisons les appareils de RMN médicaux aux heures creuses de fonctionnement des hôpitaux, et que ces machines ne doivent jamais être stoppées.

Xavier BONNET, Centre d'études biologiques de Chizé, CNRS
Serge AKOKA, Faculté de médecine de Tours, INSERM

Graine et dynamo

Depuis les années 1950, l'idée s'est imposée que le champ magnétique de la Terre est entretenu par des courants dus à des mouvements de fer liquide dans le noyau terrestre. En raison de l'augmentation de pression avec la profondeur, le fer du noyau terrestre, liquide entre 2 900 et 5 200 kilomètres de profondeur, est solide jusqu'au centre, à 6 370 kilomètres : c'est la graine. Or, à mesure que la Terre se refroidit, la graine grossit ce qui libère l'énergie nécessaire à l'entretien du champ magnétique. À l'aide de simulations numériques, nous avons trouvé qu'à partir d'une taille critique de la graine, la production du champ magnétique s'arrête.

La graine n'occupe que quatre pour cent du volume du noyau. Pourtant, sa cristallisation qui libère la chaleur latente de solidification, est la principale source d'énergie pour les mouvements de convection qui agitent le fluide conducteur. Ces mouvements transportent le fluide à travers le champ magnétique baignant le noyau, ce qui crée des courants induits. À leur tour, ces courants engendrent un champ magnétique qui entretient le champ magnétique de la Terre tant que les mouvements continuent : c'est la dynamo.

Pour modéliser la dynamo terrestre, nous cherchons les solutions des équations de la magnétohydrodynamique qui possèdent, comme le champ magnétique de la Terre, une symétrie de révolution autour de l'axe de rotation. On calcule ainsi l'évolution des mouvements du fluide, des courants électriques et du champ magnétique en fonction des différents paramètres physiques (viscosité du fluide, vitesse de rotation, rayon de la graine etc.).

Dans un premier temps la graine est petite. Dans des couches limites, à proximité de la fron-

tière noyau-manteau, l'intensité du champ magnétique est importante et le fluide conducteur subit d'importantes forces magnétiques. De plus, le fluide est également soumis à des forces dues à la rotation de la Terre. L'action combinée de ces forces crée des mouvements de convection qui transportent le fluide d'une couche limite de l'hémisphère Nord à une couche limite de l'hémisphère Sud, et vice versa.

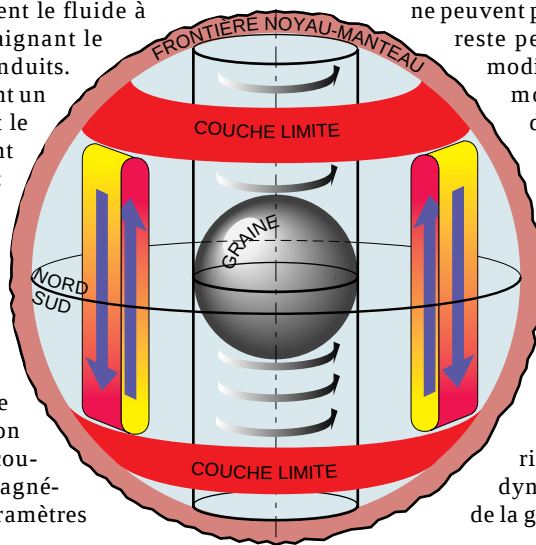
À mesure que la graine croît, les mouvements du fluide sont modifiés de deux manières. D'une part, dans le cylindre tangent à l'équateur de la graine, la vitesse est partout égale à celle de la surface de la graine. Ce cylindre est donc en rotation solide avec la graine.

D'autre part, la présence de la graine empêche la circulation entre les hémisphères Nord et Sud du noyau liquide. Les couches limites, privées de leur alimentation par un flux de matière provenant des profondeurs du noyau liquide, ne peuvent plus se développer. Tant que la graine

reste petite, la dynamo n'est presque pas modifiée. En revanche, lorsque cette « zone morte » devient trop importante, la dynamo cesse de fonctionner.

Ce mécanisme expliquerait le faible champ magnétique de Mercure qui posséderait une graine importante. Aujourd'hui, la Lune n'a plus de champ magnétique car son noyau est complètement cristallisé. Toutefois, la diminution progressive du champ magnétique lunaire, attesté par des échantillons anciens, s'expliquerait également par ce mécanisme. Pour la Terre, l'étude numérique indique l'interruption de l'effet dynamo lorsque le rapport entre le rayon de la graine et le rayon du noyau est légèrement supérieur à celui de la Terre actuelle. Le champ magnétique terrestre disparaîtra-t-il bientôt ?

Dominique JAULT,
Institut de physique du Globe, Paris



Dans le noyau terrestre, près des couches limites, les forces magnétiques intenses et la rotation engendrent des mouvements verticaux (flèches violettes). La croissance de la graine solide gêne ces mouvements entre les hémisphères ce qui entraîne l'arrêt de la génération du champ magnétique de la Terre par effet dynamo.

Chats et souris à la Schrödinger

*Une souris atomique mesure la
durée de vie d'un chat quantique.*

Les systèmes quantiques peuvent coexister dans plusieurs états. Pourquoi ce comportement étrange ne se manifeste-t-il pas à notre échelle ? Pourquoi le fameux «chat de Schrödinger» ne peut-il à la fois être mort et vivant ? Une expérience apporte un élément de réponse en organisant l'entrevue entre un chat quantique et une souris atomique.

Aussi bizarre que cela paraisse, le monde quantique tolère qu'un système physique occupe, au même instant, plusieurs états possibles. Il a bien fallu nous habituer à cette étrangeté pour des objets microscopiques, et personne aujourd'hui ne songerait à mettre en doute la validité de la mécanique quantique. En revanche, nous avons beaucoup de difficultés à imaginer ces «superpositions d'états» pour des objets macroscopiques. Schrödinger a illustré l'absurdité de ces superpositions en imaginant que le destin d'un chat est lié à l'évolution d'un système microscopique, la désintégration d'un atome radioactif, par exemple. Si l'atome est intact, le chat reste vivant. Il meurt si l'atome se désintègre. L'atome est, à un instant quelconque, dans une superposition quantique des deux états possibles, à la fois intact et désintégré. Le chat serait-il alors à la fois *mort et vivant* ? La nature, nous le savons bien, saura forcer le chat à choisir entre un état et un autre, à être mort *ou* à être vivant.

Au-delà de son aspect anecdotique, ce malheureux chat pose tout le problème de la mesure en mécanique quantique. Après tout, le chat «mesure» l'état de l'atome. Pourquoi donc un appareil de mesure ne se trouve-t-il pas dans une superposition de toutes les indications possibles, quand il mesure un système microscopique ? Un élément de réponse théorique a été avancé ces dernières années sous le nom de décohérence. Un système macroscopique interagit nécessairement avec un environnement complexe (au moins l'air ambiant pour maintenir vivante la «moitié» du chat). Il subit un grand nombre d'interactions (de chocs) microscopiques. Chacun ne le modifie que très peu, mais l'accumulation de ces interactions brouille rapidement la superposition *chat mort et chat vivant*. Il ne reste qu'un chat *mort ou vivant*, dont l'état est décrit par des probabilités ordinaires. S'il garde un caractère indéterminé, c'est seulement tant que nous

Le pouvoir des druides

JEAN-LOUIS BRUNAUX

Les prêtres celtes, qui célébraient leur culte dans de vastes sanctuaires, n'étaient pas de simples magiciens. Ils détenaient une partie du pouvoir politique en Gaule avant la conquête romaine.

Les druides fascinent les descendants des Celtes que nous sommes. Les Français se contentent, aujourd'hui, de l'image rassurante du Panoramix de la bande dessinée, plus médecin et magicien que prêtre. Les Anglo-Saxons, depuis le XIX^e siècle, reconstituent des confréries druidiques plus proches de la secte que d'une authentique tradition.

Malgré la modernité de ses formes, cette attirance n'a rien d'une mode passagère : l'engouement pour les sages gaulois existait déjà dans l'Antiquité. Pendant la période alexandrine, les Grecs, après avoir connu la philosophie la plus brillante avec Platon et Aristote, s'intéressèrent aux sages exotiques : égyptienne, indienne, mais aussi gauloise. Diogène Laërce, auteur de l'une des premières histoires de la philosophie au début du III^e siècle avant notre ère, prétendit même que les druides et les brahmanes de l'Inde avaient inventé la philosophie.

Depuis la redécouverte et l'édition au XVI^e siècle des auteurs grecs et latins, les érudits, les intellectuels et les artistes se passionnent pour les druides, personnages mystérieux. Ainsi, en 1585, Noël Taillepied fait paraître l'*Histoire de l'Estat et République des Druides*, où il présente les druides comme des jurisconsultes qui conseillent le sénat et le peuple. Au siècle des Lumières, les druides sont les emblèmes d'une théocratie modèle, d'une utopie où la raison l'emporte sur le droit régalien. Après l'échec, sous la Révolution, d'une religion philosophique, les romantiques se réclament à nouveau des druides, mais pour les assimiler à de lointains précurseurs, des mages fondateurs d'une juste harmonie entre la nature et les humains.

Qui étaient les druides ? Quel était leur rôle dans la société celtique ? Les pro-

grès accomplis depuis un siècle dans l'étude des textes des auteurs grecs et latins permettent de replacer chronologiquement les informations qu'ils contiennent. En combinant ces résultats avec les découvertes archéologiques, nous reconstituons l'histoire du druidisme, de son apparition probable sur les rives orientales de la Méditerranée à son extinction dans les forêts de Grande-Bretagne et d'Irlande. La connaissance des cultes pratiqués, obtenue ces dernières années par la fouille de grands sanctuaires du Nord de la France, confirme aussi ce que les comparaisons linguistiques et mythologiques avaient pressenti dès le début du XX^e siècle : le druidisme a de nombreux points communs avec les autres traditions indo-européennes.

Retour aux sources

Que nous apprennent les textes antiques sur les druides ? Le récit qui a le plus retenu l'attention des historiens anciens et populaires est celui de la cueillette du gui, par Pline l'Ancien. Illustré dans plusieurs générations de livres d'histoire, ce texte décrit comment le gui, considéré comme panacée, était recueilli par des druides avec la plus grande solennité. Seul le gui poussant sur le chêne, phénomène naturel rare, avait les vertus recherchées. À une date précise du calendrier lunaire, un druide vêtu de blanc coupait la précieuse plante à l'aide d'une faucille d'or. Le gui ne devait pas tomber au sol : d'autres druides le recueillaient dans un linge blanc. Pour remercier ou dédommager la divinité, deux jeunes taureaux blancs étaient sacrifiés au pied de l'arbre.

D'un texte riche et complexe, qui évoque une symbolique subtile des couleurs et des éléments, on ne retenait que

la vision poétique de nos sages ancêtres vêtus d'aubes blanches, s'enfonçant dans de profondes forêts en quête d'une plante magique. On oubliait que l'opération s'accompagnait d'un sacrifice animal, en tous points semblable à ceux que préconisaient les religions grecque et romaine. On en vint à croire que les Gaulois n'avaient pas d'authentiques sanctuaires, mais se contentaient de sites naturels : forêt, cime montagneuse, source.

César, dans un passage de la *Guerre des Gaules*, dépeint des druides assez différents des magiciens inspirés décrits par Pline. Les druides apparaissent avant tout comme des prêtres institutionnels au service d'une religion d'état, organisés en un corps sacerdotal hiérarchisé. Parce qu'ils sont des savants omniscients, leurs compétences ne se limitent pas au seul domaine religieux. Philosophes, ils développent une doctrine morale qui s'applique à la justice et se prolonge naturellement dans l'enseignement. Les druides détiennent une grande part du pouvoir : ils forment l'une des «deux classes d'hommes qui comptent», l'autre étant celle des «chevaliers» ou nobles guerriers.

Ce texte est précieux, parce qu'il est le seul témoignage disponible sur de nombreux documents de cette époque aujourd'hui disparus. Il synthétise ce qu'un intellectuel romain du I^{er} siècle avant notre ère pouvait savoir de la question, à travers la littérature, les récits de voyages ou les grands essais historiques. Son seul défaut est, justement, d'être trop synthétique. César, en bon

1. LA CUEILLETTE DU GUI, décrite par Pline l'Ancien, a été l'une des scènes favorites des livres d'histoire pendant plusieurs décennies. Aujourd'hui, l'image des druides est utilisée, entre autres, par des sectes et par la bande dessinée. Les prêtres celtes étaient bien différents de ces clichés.