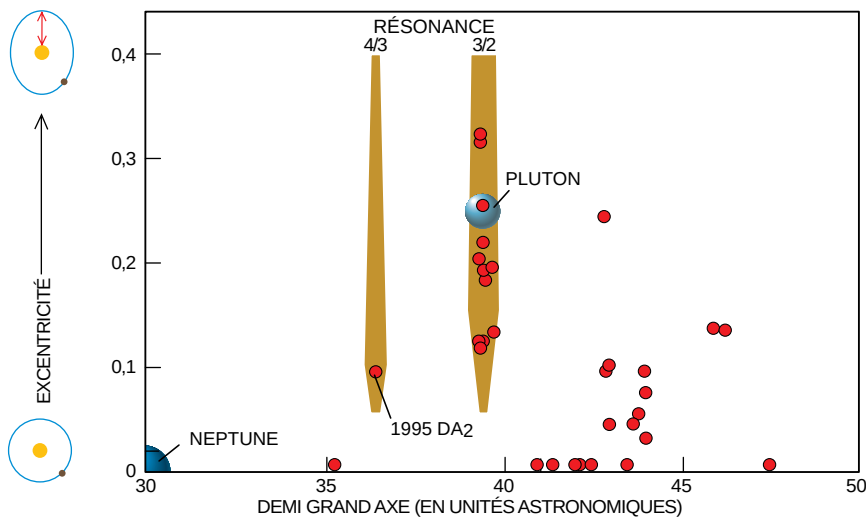




6. DE NOMBREUX OBJETS DE LA CEINTURE DE KUIPER ont des orbites «résonantes». Les orbites sont décrites par l'excentricité (l'écart par rapport à la circularité) et le demi-grand axe (flèche rouge, en haut, à gauche). Comme Pluton, près de la moitié des corps connus de la ceinture de Kuiper (points rouges) tournent deux fois autour du Soleil pendant que Neptune effectue trois révolutions : c'est une résonance 3/2. L'objet 1995 DA₂ occupe une orbite caractérisée par une autre résonance. Ce phénomène refléterait l'évolution primordiale du Système solaire, quand de nombreux petits corps furent éjectés et que les planètes principales s'éloignèrent du Soleil. Lors de ces mouvements d'éloignement, Neptune pourrait avoir verrouillé Pluton et une variété d'objets plus petits sur les orbites résonantes que l'on observe aujourd'hui.

un bon réservoir de comètes. Le mécanisme de transfert hors de ce réservoir est maintenant bien compris : les forces gravitationnelles exercées par Neptune érodent lentement le bord interne de la ceinture de Kuiper, expédiant des objets de cette zone vers le Système solaire interne. Beaucoup de ces corps se consomment en comètes. Certains, telle la comète Shoemaker-Levy 9, qui percuta Jupiter en juillet 1994, terminent leur existence par une collision avec une planète ou avec le Soleil. D'autres sont pris dans une fronde gravitationnelle qui les projette dans l'espace interstellaire.

Si la ceinture de Kuiper est la source des comètes à courte période, peut-on trouver des comètes qui proviendraient spécifiquement de cette ceinture ? Les Centaures, un groupe d'objets comprenant 5145 Pholus, seraient de telles comètes. Les Centaures parcourent de vastes orbites instables, qui croisent celles des planètes. Ils subsistent parmi les planètes géantes quelques millions d'années seulement avant que les interactions gravitationnelles ne les éjectent du Système solaire ou ne les transfèrent sur des orbites plus petites.

Les Centaures ne peuvent s'être formés là où ils se trouvent aujourd'hui, car leurs temps de vie avant éjection du Système solaire sont bien inférieurs à l'âge de celui-ci. Toutefois, la nature de leurs orbites ne permet pas de connaître

leur origine avec certitude. Le réservoir le plus proche (et le plus probable) est la ceinture de Kuiper. Les Centaures constitueraient donc des «comètes de transition», des objets qui appartenaient à la ceinture de Kuiper, en route pour une vie courte, mais spectaculaire dans le Système solaire interne. Un Centaure particulier, 2060 Chiron, fournit l'indice le plus convaincant en faveur de cette hypothèse : ses découvreurs l'avaient considéré comme un astéroïde inhabituel, mais on sait aujourd'hui que 2060 Chiron est une comète active, nimbée d'un halo faible, mais persistant.

La ceinture de Kuiper pourrait-elle fournir autre chose que des comètes ? Est-ce une coïncidence si Pluton, son satellite Charon et le satellite neptunien Triton, objets analogues, se trouvent à proximité de la ceinture de Kuiper ?

Un étrange trio

Les densités de Pluton et de Triton, par exemple, sont bien supérieures à celles des planètes gazeuses géantes du Système solaire externe. Les orbites de ces corps sont également assez étranges. Triton tourne autour de Neptune dans le sens rétrograde, c'est-à-dire inverse de celui du mouvement orbital de toutes les planètes et de la majorité des satellites. L'orbite de Pluton, très inclinée par rapport à l'écliptique, est si allongée qu'elle coupe celle de Neptune. Pluton échappe cependant à toute

collision avec Neptune, en raison d'une relation orbitale particulière nommée résonance 3/2 : lorsque Neptune effectue trois révolutions autour du Soleil, Pluton en accomplit deux.

On comprend le mystère céleste si l'on admet que Pluton, Charon et Triton sont les survivants d'un ensemble, jadis plus vaste, d'objets de tailles similaires. Neptune aurait extrait ces trois corps de la ceinture de Kuiper, capturant Triton et verrouillant Pluton – peut-être avec Charon dans son sillage – dans sa résonance orbitale actuelle.

Les objets découverts dans la ceinture de Kuiper ont des résonances orbitales particulières : la moitié d'entre eux ont la même résonance 3/2 que Pluton et, comme la planète, ils parcourent leur orbite pendant des milliards d'années sans avoir de rencontres proches avec Neptune. Nous avons surnommé Plutinos («petits Plutons») les objets de ce type, dans la ceinture de Kuiper. Compte tenu de la faible portion de ciel examinée, nous estimons que plusieurs milliers de Plutinos ont un diamètre de taille supérieure à 100 kilomètres.

Les découvertes récentes d'objets dans l'anneau de Kuiper donnent une nouvelle compréhension du Système solaire externe. Pluton ne semble aujourd'hui particulier que parce qu'il est plus grand que tous les autres membres de la ceinture de Kuiper. On peut même se demander si Pluton mérite le statut de planète à part entière ? Paradoxalement, une étude qui commença par la recherche d'une dixième planète pourrait ramener à huit le nombre des planètes de notre Système solaire.

Jane LUU est astronome à l'Université Harvard et David JEWITT est astronome à l'Université d'Hawaïi.

M. DUNCAN, T. QUINN et S. TREMAINE, *The Origin of Short Period Comets*, in *Astrophysical Journal*, vol. 328, pp. L69-L73, 15 mai 1988.

J. LUU, *The Kuiper Belt Objects*, in *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, sous la direction de A. Milani, M. Di Martino et A. Cellino, Kluwer Academic Publishers, 1993.

D. JEWITT et J. LUU, *The Solar System beyond Neptune*, in *Astronomical Journal*, vol. 109, n° 4, pp. 1867-1876, avril 1995.

R. MALHOTRA, *The Origin of Pluto's Orbit: Implications for the Solar System beyond Neptune*, in *Astronomical Journal*, vol. 110, pp. 420-429, juillet 1995.

La prédisposition au cancer

FREDERICA PERERA

Afin de prévenir l'apparition de la maladie, les spécialistes d'épidémiologie moléculaire tentent de dépister les personnes les plus susceptibles d'avoir un cancer ; pour ce faire, ils recherchent les signes biologiques d'une telle prédisposition.

Imaginons que nous parvenions à savoir si des tissus ont été modifiés par des agents cancérogènes et s'ils sont dans un état précancéreux. Imaginons que nous parvenions à savoir si un individu présente une sensibilité particulière à certains agents cancérogènes, tels que la fumée de cigarette, les rayonnements, divers microbes, des substances chimiques naturelles ou synthétiques présentes dans l'alimentation, dans l'eau ou dans l'air. Alors la lutte contre le cancer serait facilitée, car les personnes à risques connaîtraient les agents cancérogènes qui les menacent, et nombre de cancers seraient évités. En outre, si l'on parvenait à montrer que certaines catégories de personnes, tels les enfants, sont plus sensibles à certains facteurs, les responsables de la santé publique pourraient prendre des mesures afin de réduire les expositions.

Ces perspectives poussent les spécialistes d'une nouvelle discipline, l'épidémiologie moléculaire, à chercher des «biomarqueurs» qui révéleraient une prédisposition au cancer. Aujourd'hui, la panoplie de ces marqueurs est encore limitée, et l'on ne sait pas évaluer précisément le risque qu'un individu particulier ait un jour un cancer, mais les premiers tests prédictifs devraient apparaître prochainement. Entre-temps, il serait avisé de profiter du temps disponible pour préparer le cadre légal

d'utilisation de ces tests : nous devons apprendre à protéger les personnes qui se soumettront à ces tests, et à éviter toute discrimination par les compagnies d'assurances ou par les employeurs.

L'épidémiologie moléculaire montre notamment que les méthodes avec lesquelles on détermine les expositions «acceptables» aux agents cancérogènes de l'environnement sous-estiment les risques encourus par certaines catégories de la population. Aujourd'hui, pour savoir si une exposition à certains produits augmente la proportion de cancers humains, ou pour savoir si des actions concertées réduisent cette proportion, on doit attendre des années, voire des dizaines d'années ; en étudiant les signes précurseurs des cancers, les épidémiologistes moléculaires espèrent répondre plus rapidement à ces questions, et prendre plus vite des mesures de prévention efficaces. Enfin, les biomarqueurs aideront les cancérologues à mettre au point de nouvelles méthodes de prévention du cancer.

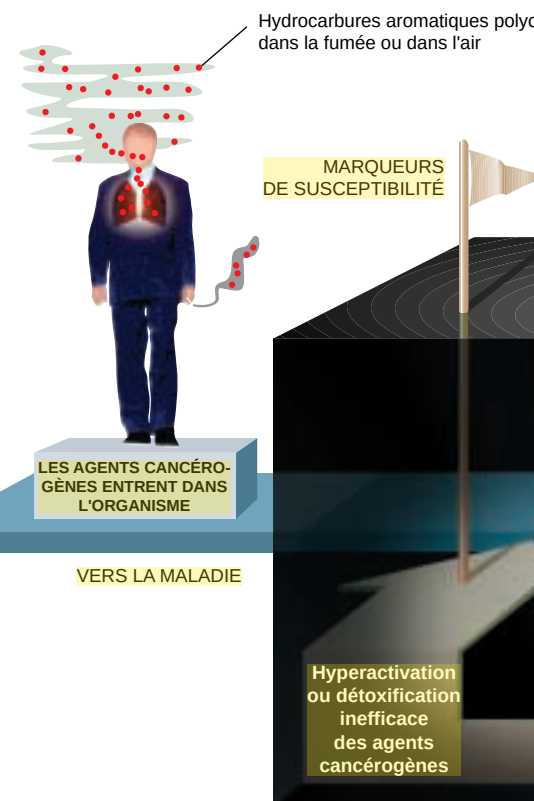
Malgré quelques analogies, l'épidémiologie moléculaire diffère de l'épidémiologie classique : elle utilise les mêmes outils, c'est-à-dire l'étude historique des cas recensés, des questionnaires et le contrôle de l'exposition aux agents cancérogènes, mais elle y ajoute les méthodes de la biologie moléculaire. Certes, l'épidémiologie classique a notablement contribué

ÉPIDÉMIOLOGIE CLASSIQUE



POPULATION EXPOSÉE À LA FUMÉE DE CIGARETTE OU À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

ÉPIDÉMIOLOGIE MOLÉCULAIRE



1. L'ÉPIDÉMIOLOGIE MOLÉCULAIRE apporte des informations que l'épidémiologie classique ne fournit pas, comme l'illustre cet exemple d'un cancer du poumon. L'épidémiologie classique (*en haut*) identifie les facteurs qui augmentent les risques de cancer, telle l'inhalation d'un air pollué ou de la fumée de cigarette, mais ne précise pas comment la maladie apparaît. Au contraire, l'épidémiologie moléculaire (*en bas*) s'intéresse aux événements qui se produisent dans la boîte noire et met en évidence les étapes qui mènent de l'exposition aux agents cancérogènes à la maladie. Elle identifie aussi les signes biologiques, ou biomarqueurs, qui révèlent une prédisposition à la maladie. Certains marqueurs (*les drapeaux rectangulaires*) indiquent l'évolution vers la maladie ; d'autres (*les petits fanions*) signalent une vulnérabilité, innée ou acquise, aux agents cancérogènes. En utilisant de tels marqueurs, les épidémiologistes pourront repérer les personnes à risques pour qui la prévention est une question de survie.

à l'évaluation des risques de cancers : elle a montré qu'une alimentation très riche en graisses favorise le cancer du côlon, que le benzène provoque des leucémies et que les cigarettes augmentent notablement le risque de cancer du poumon (un gros fumeur sur dix risque d'avoir un cancer du poumon). Toutefois, elle n'a donné aucune information sur la suite d'événements qui conduisent de la première exposition à la maladie. Au contraire, les épidémiologistes moléculaires tentent de déceler les signes avant-coureurs d'un cancer et d'identifier des repères biologiques quantifiables qui jalonnent l'évolution de la maladie.

Ce travail se fonde sur les nombreuses explorations des mécanismes de la cancérogenèse ; en retour, il améliore notre compréhension de ces mécanismes. Aujourd'hui, on sait que les cancers résultent de l'accumulation de dommages dans l'ADN d'une cellule : quand ces anomalies finissent par supprimer des contraintes qui assurent une multiplication normale de la cellule, celle-ci prolifère, engendrant une tumeur qui grossit, envahit les tissus voisins et dissémine finalement des tumeurs satellites (les métastases) dans tout l'organisme.

Si des anomalies génétiques sont responsables de cancers, toutes les tumeurs

ne sont pas déclenchées par des gènes endommagés hérités des parents. Dans les pays industrialisés, à peine cinq pour cent des cancers sont héréditaires. Les accidents génétiques qui transforment une cellule saine en une cellule maligne s'accumulent tout au long de la vie, au fil d'interactions complexes entre les agents cancérogènes et l'organisme, qui s'en protège de plusieurs façons. Divers agents cancérogènes sont présents dans l'environnement, mais d'autres, tels les agents oxydants, sont produits par l'organisme. En réalité, deux facteurs se conjuguent : la gravité de l'exposition à l'agent cancérogène – quel qu'il soit – et l'efficacité des mécanismes de défense

