

Ce samedi 28 février 1953, nous avons élaboré un modèle dont nous n'étions pas certains. Nous avons pensé que des données de diffraction des rayons X seraient une preuve supplémentaire. Toutefois le modèle reposait sur un mécanisme de copie auquel tous les biologistes voulaient croire, quelles que soient les données cristallographiques.

**J. R. :** *En effet, de la complémentarité des nucléotides résulte un mécanisme simple de copie de l'ADN.*

**J. W. :** Vous savez, nous ne pensions parcourir que la moitié du chemin ! Nous proposons une structure dont les cristallographes prouveraient la pertinence. Le problème de la copie se serait posé ensuite. Nous sommes célèbres parce que la molécule d'ADN est exceptionnelle. Si Rosalind avait parlé à Francis dès 1951 et partagé ses résultats, elle aurait découvert cette structure : elle serait célèbre à ma place !

**J. R. :** *En un siècle, nous sommes passés de la redécouverte des lois de Mendel et de l'identification des chromosomes en tant qu'agents de l'hérédité au séquençage quasiment complet du génome humain. Selon vous, en génétique, reste-t-il des découvertes majeures à faire, ou bien n'est-ce plus qu'une affaire de détails ?*

**J. W. :** Le problème majeur, à mon avis, est la chromatine, l'assemblage compact de l'ADN, dans les chromosomes, avec des protéines, nommées histones. Comment un fragment donné d'ADN enfoui dans un chromosome devient-il accessible ? Quels sont les mécanismes et les rôles de la méthylation et des phénomènes épigénétiques (qui modifient l'expression des gènes selon l'environnement) ? Vous héritez bien plus que d'un simple patrimoine génétique ! Ces questions sont les plus excitantes de la génétique d'aujourd'hui.

Et les progrès semblent particulièrement rapides. Sans vouloir jouer au devin, je pense que dans les dix prochaines années, ce champ sera bien « débroussaillé ». De nombreux scientifiques compétents travaillent sur ce sujet, et ils ont les outils nécessaires. Les principes fondamentaux du fonctionnement des gènes seront alors connus et nous serons capables d'aborder des questions, tel le fonctionnement du cerveau.

**J. R. :** *Les ARN (ces molécules sont, comme l'ADN, composées de nucléotides et porteuses d'information) sont sortis de l'ombre de l'ADN. Nous connaissons aujourd'hui des phénomènes d'interférences où des molécules d'ARN modifient l'expression des gènes. Saurons-nous percer les secrets de cet autre domaine ? Est-ce comparable aux problèmes des histones ?*

**J. W. :** Oui, c'est plus complexe que nous le pensions en 1953. À cette époque, il n'y avait qu'une sorte d'ARN, l'ARN messager, une copie d'un gène d'ADN qui est ensuite traduite en protéine dans les cellules. Toutefois, pour fabriquer cet ARN, les histones doivent s'éclipser. C'est à nouveau le problème de la chromatine.

**J. R. :** *Dans un numéro récent de la revue Nature, Walter Gilbert (prix Nobel en 1980) affirme que la « biologie moléculaire est morte », principalement car son objet, l'ADN, a envahi tous les autres domaines.*

**J. W. :** Je partage son avis, dans le sens où l'ADN est devenu un outil. Il y a encore un problème fondamental à résoudre : comment l'information est stockée et utilisée dans le cerveau. C'est un problème plus important que l'ADN, et plus complexe.

**J. R. :** *Si vous débutez aujourd'hui...*

**J. W. :** Je travaillerais sur les relations entre les gènes et le comportement. Vous pouvez trouver des gènes qui participent au comportement, mais cela n'explique pas comment le cerveau fonctionne. Passionné par l'ornithologie depuis mon enfance, mes premiers centres d'intérêts scientifiques ont porté sur la migration des oiseaux. Sans savoir comment le cerveau d'un oiseau fonctionne, vous ne saurez pas comment les gènes « disent » où migrer, car les mères ne l'apprennent pas aux jeunes ! C'est donc hérité.

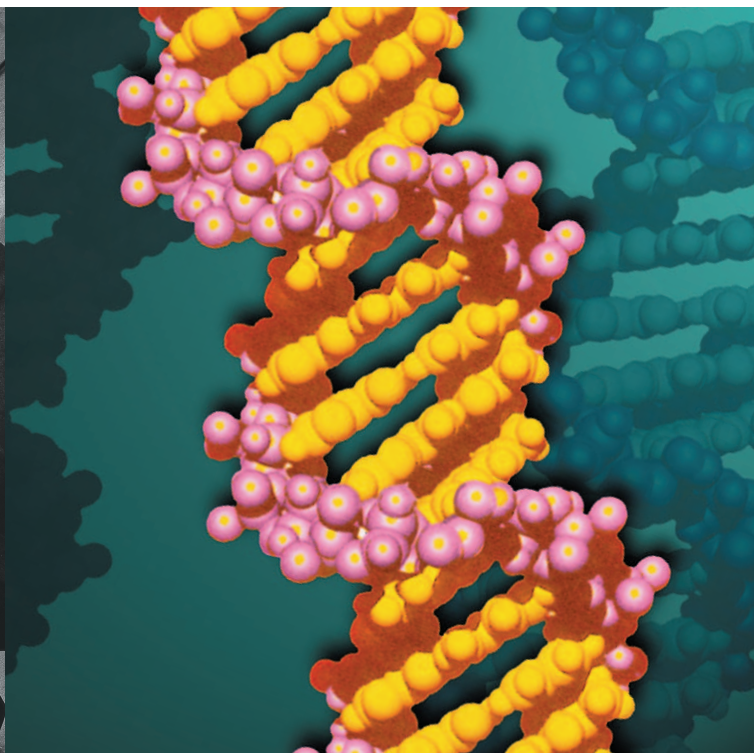
Il y a plusieurs comportements importants à élucider. Certains disent qu'ils ne comprennent pas que des hommes puissent aimer les hommes, mais je pense qu'il est aussi mystérieux que les hommes aiment les femmes ! Ces problèmes sont complexes. Francis affirme que les neurosciences ne sont pas fondées sur un équivalent de la molécule d'ADN.

**J. R. :** *À propos de politique, plusieurs thèmes de débats publics sont liés à l'ADN : les organismes génétiquement modifiés, le clonage... Quelle confiance accordez-vous à la gestion politique de ces dossiers ?*

**J. W. :** Je pense qu'ils sont si controversés que les États ne devraient pas intervenir. Les décisions sur la reproduction sont du ressort des femmes, pas des autorités. Aujourd'hui, le sujet est le clonage... en admettant qu'il soit possible. Cependant, le premier clone ne sera pas comme la première utilisation de la bombe atomique. Il n'y aura pas mort d'homme ! Si vous, votre femme et plusieurs membres de vos familles êtes porteurs d'une maladie, peut-être aimeriez-vous un enfant qui en soit dépourvu. Certains disent : « C'est la porte ouverte aux bébés sur mesure. » Toutefois, si vous pouvez vous assurer que votre enfant ne sera pas atteint par cette maladie, n'est-ce pas un progrès ? Qui serait lésé ?

**J. R. :** *Pensez-vous que le public en sait assez en matière de génétique pour prendre des décisions raisonnées ?*

**J. W. :** Si vous croyez qu'une plante n'existe que par la volonté de Dieu, vous pouvez dire qu'il ne faut pas y toucher. Cependant, l'Amérique n'est plus ce qu'elle était à l'arrivée des Pères pèlerins, ces puritains britanniques qui ont fui les persécutions religieuses en 1620 et ont débarqué en Amérique à bord du *Mayflower*. Ils sont les « fondateurs » des États-Unis. Nous avons tout changé. Nous n'avons pas respecté le passé, mais plutôt tenté de l'améliorer. Et je crois qu'interdire cette quête est contraire à l'esprit humain.





# Poète, prends ton lut

**HERVÉ THIS**

**Le lutage des cocottes ne prévient l'évaporation et la «perte des arômes» que si la température du liquide est proche de celle de l'ébullition.**

**P**oulettes pattes noires en cocotte lutée... Les poulettes sont préparées, mises en cocotte avec une garniture aromatique ; puis, le couvercle posé sur la cocotte est «hermétiquement» soudé à celle-ci par un cordon de pâte, faite de farine et d'eau. Les cuisiniers imaginent que les «arômes» sont recyclés dans l'espace clos de la cocotte, de sorte qu'ils viennent imprégner les chairs. Puis, lors du service, quand le maître d'hôtel casse le cordon de pâte durci, les convives sont inondés d'un flot d'odeurs. Il y a du spectacle, dans l'usage du lut, mais les molécules odorantes sont-elles véritablement piégées ? Réservons la question de l'imprégnation des chairs pour une autre fois et déterminons, ce mois-ci, si le lutage retient effectivement les molécules odorantes.

«La sagesse, dit le philosophe Alain, remet en question des choses connues et reçues, et doute par principe en vue de s'assurer mieux.» Foin du rêve du cuisinier ou du gourmand, doutons de l'efficacité du lut, et expérimentons.

Le test le plus simple consiste à comparer deux cocottes identiques, lutées ou non. Au laboratoire, nous remplacerons les cocottes par des béchers en verre gradués, et les couvercles par des verres de montre ou par des soucoupes de tasse à café. Sur l'un des béchers, posons seulement le «couvercle» ; sur l'autre, lutons, c'est-à-dire soudons le couvercle au bécher par un lourd cordon de pâte, faite de farine travaillée avec de l'eau. Dans la même lancée, comparons ces deux béchers à un troisième bécher laissé ouvert. Dans les trois béchers, plaçons un même volume d'eau (voir la photographie ci-contre). Puis introduisons les trois béchers dans un four à la température de 180 °C, par exemple (une température habituelle pour la cuisson des poules et poulets).

Suivons alors les variations du niveau de l'eau dans les béchers au cours du temps. On voit que l'eau s'évapore plus vite dans le bécher non couvert... mais aucune différence n'apparaît entre les béchers avec couvercle posé, et avec couvercle luté. Le lut serait-il une beauté culinaire inutile ? Les cuisiniers confrontés aux résultats de cette expérience qui met leur savoir en question argumentent, critiquent l'expérience, reprochent aux béchers de ne pas être des cocottes... mais seuls les plus au fait des arcanes techniques font valoir que l'expérience réalisée ne vaut rien, parce que les conditions d'usage du lut n'ont pas été respectées : les livres de cuisine ne le disent pas, mais la transmission orale l'affirme, le lut n'est utile que pour les cuissons longues, à température modérée.

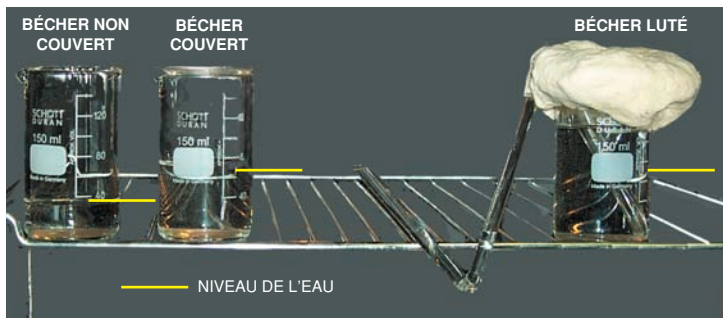
Modérée de combien ? Donnons à la cuisine le bénéfice du doute, et reprenons l'expérience en plaçant les trois mêmes béchers à la température de 110 °C. Cette fois, l'eau s'évapore différemment dans le bécher simplement couvert et dans le bécher

couvert et luté : ce dernier retient toute son eau, même après quatre heures de cuisson. La tradition culinaire est dans le vrai : si le lut retient la vapeur d'eau, il retient aussi les molécules odorantes que cette vapeur aurait entraînées.

Comment corroborer ces résultats ? Si l'eau est retenue dans le bécher luté, alors qu'elle s'évapore, l'intérieur du bécher couvert et luté doit être sous pression. Mesurons la pression en modifiant un peu le système : n'importe quel chimiste amateur peut utiliser une petite lampe à alcool pour couder un tube de verre en Z : couché, ce tube est plongé dans l'eau d'un bécher, et le tube en U qui dépasse du bécher est alors rempli d'un liquide (qui ne s'évapore pas : de l'huile, par exemple). Le couvercle est posé sur le bécher garni de son tube, puis luté. L'ensemble est placé dans un four réglé à la température de 110 °C. Le liquide dans le tube en U est alors poussé par la vapeur formée : ainsi mesure-t-on la pression dans le bécher luté et voit-on que la pression augmente progressivement, à mesure que la cuisson s'opère.

La science n'est pas accumulation de mesures, mais exploration des mécanismes. Comment le lut confine-t-il la vapeur d'eau ? Il existe plusieurs sortes de lut, mais les plus couramment prescrits sont les plus rudimentaires : ils sont faits de farine et d'eau. Le travail de la pâte provoque la formation

d'un réseau de protéines, le gluten, qui piège les grains d'amidon ; ainsi la pâte devient-elle «viscoélastique», c'est-à-dire un peu visqueuse (elle coule difficilement) et un peu élastique (en raison du réseau de gluten). Chauffée, cette pâte sèche en surface, tandis que l'amidon absorbe



l'eau et s'empêse ; les grains d'amidon se soudent.

Quand la pâte sèche rapidement, comme dans la cuisson à la température de 180 °C, elle se contracte en surface (elle sèche), tandis que son cœur est encore humide. Des fissures apparaissent dans la croûte par où la vapeur d'eau formée dans le bécher s'échappe. En revanche, quand on chauffe doucement, le séchage est plus homogène, et l'ensemble du cordon de pâte se contracte, sans se fissurer. La vapeur est retenue.

La conclusion culinaire ? Le lut est un bon moyen de retenir la vapeur et les molécules odorantes des mets, mais les livres de cuisine seraient avisés de n'en recommander l'usage qu'aux températures peu supérieures à celles de l'ébullition de l'eau, car la pression augmente vite avec la température interne  $T$ , comme la puissance quatrième du quotient  $T/100$ .

**Rendez-vous de France Info et de Pour la Science, le 26 mars, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.**



# La forme des villes...

IVAR EKELAND

**... résulte de l'économie. La transdisciplinarité, tant prônée, est efficace pour autant que les mathématiques s'appliquent à un bon modèle.**

Chacun sait que dans les villes, il y a des quartiers d'affaires, des quartiers résidentiels, et des zones mixtes, où entreprises et habitations sont imbriquées. Dans les travaux d'économie urbaine, cette répartition était considérée comme une donnée, mais Robert Lucas, professeur à Chicago et prix Nobel d'économie, s'est demandé si cette structure était une conséquence logique du comportement des habitants.

Tout l'art du scientifique consiste à expliquer des structures compliquées par un petit nombre d'hypothèses simples et générales. R. Lucas, en grand scientifique, arrivera à son but avec un arsenal extrêmement réduit d'hypothèses élémentaires. Il propose un modèle comportant trois types d'acteurs : les habitants de la ville, les industriels et les propriétaires des terrains, chacun se comportant comme l'indique la théorie économique classique. Les propriétaires des terrains le louent au plus offrant, les industriels cherchent à maximiser leur profit, déduction faite des salaires et du loyer qu'ils doivent verser, les habitants consacrent leur revenu (c'est-à-dire leur salaire) à se loger et à consommer.

Il n'y a là rien qui incite au regroupement géographique. Au contraire, les habitants et les industriels ont intérêt à s'étaler le plus possible, de manière à réduire la densité d'occupation des sols et à bénéficier de loyers plus favorables. Les forces économiques sont centrifuges et on ne voit guère comment naîtrait une agglomération : l'habitat dispersé est la meilleure solution.

Pour expliquer la genèse des villes, il va donc falloir trouver des forces centripètes qui équilibrent les précédentes : elles résultent de deux hypothèses naturelles. La première est que, si deux travailleurs sont ensemble, chacun d'eux travaillera mieux que s'il était seul – le travail fourni sera plus que deux fois celui que chacun d'eux fournirait isolément : c'est ce qu'on appelle une externalité. La deuxième est que si un habitant vit à un endroit et travaille dans un autre, il subit des coûts de transport de nature diverse, le prix du trajet certes, mais aussi la fatigue ou le temps perdu, ces coûts étant d'autant plus importants que la distance est plus grande.

Ces forces économiques sont centripètes. Pour profiter au maximum de l'externalité, les industriels auraient intérêt à se regrouper dans un seul gratte-ciel, qui abriterait toutes les entreprises. Pour réduire les coûts de transport, les travailleurs auraient intérêt à loger près de leur lieu de travail, – dans ce même gratte-ciel – qui servira donc à la fois d'usine et de dortoir.

Nous voilà apparemment passés d'un extrême à l'autre : sans externalité de production ni de coûts de transport, il n'y pas de ville, avec eux, la ville s'écrase en un point. Tout doux, messieurs les urbanistes : le prix du terrain est là, qui empêche cet écrasement. Si tout le monde veut habiter et travailler au même endroit, la concurrence sera telle pour ce lopin de terre que son propriétaire le louera à un prix astronomique, les terrains immédiatement voisins ne vaudront rien. Mais dans ce cas, chacun individuellement, habitant ou industriel, a intérêt à quitter le gratte-ciel pour s'installer un peu plus loin. L'un devra marcher 50 mètres tous les jours pour aller à son travail, l'autre tirera de ses

ouvriers un rendement moindre, mais tous deux gagneront énormément sur le loyer, si bien que l'opération sera bénéficiaire.

Aussi la configuration d'équilibre, où personne n'a intérêt à déménager se situe entre l'étalement total et l'écrasement complet. Dans un article extrêmement intéressant, R. Lucas et son élève Esteban Rossi-Hansberg ont montré que, si l'on suppose que la ville est circulaire, ainsi que tous ses quartiers, si bien que la structure interne est une succession d'anneaux concentriques, alors une (ou plusieurs, on ne sait pas) configuration d'équilibre existe (ou existent). Selon les cas, on peut avoir un unique quartier d'affaires autour du centre, entouré par un quartier résidentiel, ou des configurations plus compliquées, faisant alterner quartiers d'affaires, résidentiels ou mixtes.

## DANGEREUX TRANSPORTS... EN COMMUN!

Cependant, toutes les villes ne sont pas circulaires, à commencer par Chicago qui est construite au bord du lac Michigan. L'année dernière à Chicago, Guillaume Carlier et moi-même avons passé du temps avec R. Lucas et E. Rossi-Hansberg pour éliminer cette hypothèse. Sans succès. Depuis, nous avons continué à réfléchir, et il nous est apparu que la structure purement mathématique de leur modèle n'était pas satisfaisante : elle était propre au cas considéré, et ne se prêtait pas à des généralisations pourtant naturelles. En continuant à réfléchir, nous avons localisé une faiblesse du modèle de Lucas-Rossi-Hansberg : chaque individu fournit huit heures de travail par jour, mais l'horloge pointeuse se déclenche à partir du moment où il part de chez lui et s'il passe deux heures en transport, il n'effectue que six heures de travail pour son employeur (mais celui-ci le paye pour huit).

Nous avons donc changé cette hypothèse. Dans le nouveau modèle, les coûts de transport sont monétaires : le revenu disponible de chacun est égal au salaire que lui paye son employeur diminué des coûts de transport. En revanche, chacun doit fournir huit heures de travail effectif. Cette modification apparemment mineure change complètement la structure mathématique du problème. En effet, on peut alors se raccrocher à une théorie mathématique qui connaît un grand essor à l'heure actuelle (mais que ni Robert ni Esteban, économistes l'un et l'autre, n'avaient aucune raison de connaître), la théorie du transport optimal. On arrive alors à résoudre tous les problèmes en suspens, notamment à montrer l'existence de configurations d'équilibre pour des villes de forme quelconque, et à traiter des questions nouvelles, comme l'influence du réseau de transport sur la structure interne des villes.

Voilà donc un exemple où une plus grande sophistication mathématique a permis de faire progresser la compréhension économique. L'intuition économique fondamentale reste celle de R. Lucas, mais seule la théorie mathématique du transport optimal permet de lui conférer toute sa dimension. Nous pensons appliquer la méthode à d'autres problèmes de structure, provenant par exemple du commerce international.