

La catastrophe d'octobre 1979 est survenue au troisième jour de forte crue du Var. La charge sédimentaire en suspension a peut-être suffi à donner à l'eau douce chargée une densité supérieure à celle de l'eau de mer : le cours du fleuve se serait alors poursuivi au fond de la mer et aurait érodé les flancs instables du canyon du Var.

P. COUPRIE, Paris

Réponse de Philippe Heinrich

Je ne suis pas opposé à la thèse qu'un tsunami engendré au large aurait précédé l'effondrement de la digue et des sédiments sous-jacents, et de ce fait serait à l'origine de l'effondrement. Toutefois, elle ne fait pas l'unanimité, précisément en raison des contradictions entre les témoignages sur la chronologie des observations des vagues en différents points de la côte.

Les simulations numériques révèlent que l'effondrement de dix millions de mètres cubes de sédiments situés à proximité de la surface de l'eau engendre une vague de quelques mètres de hauteur localement, suffisante pour inonder les terrains situés en face de l'aéroport. Il n'a jamais été conclu que cet effondrement est à l'origine d'un tsunami. Bien au contraire, les simulations ont montré aussi que les vagues engendrées par cet effondrement n'expliquent pas le tsunami observé dans la Baie des Anges. Les modélisations que nous avons effectuées simulent des phénomènes hydrodynamiques, tels le déplacement d'un fluide par le mouvement d'une masse et la propagation d'ondes à la surface de l'eau. Elles ne permettent pas de conclure sur l'antériorité ou non de l'effondrement de la digue, ni sur la cause de cet effondrement.

L'origine de la vie

Pourquoi la vie a-t-elle plus de chances de venir d'une autre planète du Système solaire que de la Terre, alors qu'elles ont toutes à peu près le même âge (voir *Origine extraterrestre ?*, par C.-A. Roten, *Pour la Science*, juillet 1999)? Si elle vient d'un autre système planétaire, c'est un autre problème...

Frédéric MALHER, Paris

Réponse de C.-A. Roten

L'émergence de la vie est associée à l'existence d'une croûte planétaire solide. En son sein ou dans un océan, des molécules peuvent s'auto-organiser pour permettre l'apparition d'une première cellule. Tout corps orbitant autour du Soleil s'est formé il y a 4,6 milliards d'années. Suite au bombardement météoritique intense de l'ac-

création et à la chaleur émise par la fission des atomes radioactifs, les constituants de Mars et de la Terre se sont séparés pour former un noyau et un manteau. Par la suite, seule la chaleur émise par la fission nucléaire était suffisante pour empêcher la solidification d'une croûte planétaire. Comme Mars et la Terre ont une concentration d'atomes radioactifs similaire, Mars, plus petite, s'est refroidie plus rapidement car le rapport de sa surface à son volume est plus important que celui de notre planète. Mars, dont la surface s'est solidifiée avant celle de la Terre, a donc pu abriter les plus anciennes formes de vie du Système solaire.

Ginkgo costaud

Le *Ginkgo biloba* résiste à de nombreuses agressions (voir *La résistance des ginkgos*, *Pour la Science*, mai 1999) : il aurait même survécu à l'explosion atomique d'Hiroshima. Toutefois, ce n'est qu'à Kyoto que j'ai vu beaucoup de ginkgos le long des avenues. À Paris, malheureusement, je ne connais que celui du Jardin des Plantes.

Claude CARDOT, Gif sur Yvette

Réponse de T. T. Nguyen Tu et H. Bocherens

À Hiroshima, un *Ginkgo biloba* a effectivement survécu à la bombe atomique : ses feuilles ont repoussé au printemps suivant l'explosion bien que son appareil végétatif ait entièrement brûlé. L'implantation des ginkgos dans les villes est de plus en plus importante, non seulement au Japon, mais aussi en Europe. De nombreux boulevards et parcs de Tokyo sont plantés de ginkgos. À Paris, son implantation est plus récente : tous les marronniers bordant les avenues n'ont pas été remplacés par des ginkgos! Mais dès que des arbres sont à planter le choix est le plus souvent porté sur le ginkgo, par exemple au Musée de sculpture en plein air, sur le quai Saint Bernard.

Lettre codée

Dans l'article *Paiements sur l'Internet* (voir *Pour la Science*, juin 1999), Octavian Ureche et Réjean Plamondon écrivent : «Ce système est relativement sûr : en Europe, le protocole SSL chiffre les données avec des clés de 40 bits. Autrement dit, pour percer le code de chiffrement, il faudrait trouver les facteurs premiers d'un nombre de 40 bits (ou 10 chiffres), ce qui prendrait des jours à un ordinateur de bureau.» Je pense qu'il y a ici une confusion : la clé de 40 bits utilisée

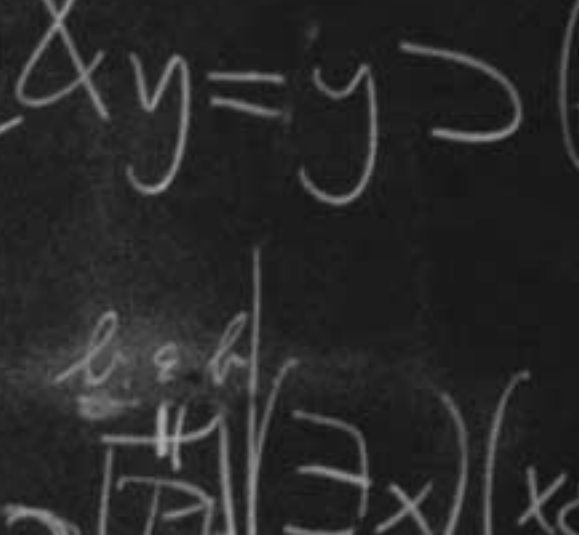
est la clé d'encryptage symétrique (plus précisément, la partie secrète de cette clé, l'algorithme utilisé (RC4) étant de type «stream cipher», chaque message a une clé différente). Cette clé est encodée au moyen d'un algorithme à clé publique, utilisant une clé beaucoup plus grande. La factorisation d'un nombre de 40 bits (12 chiffres) prend moins d'une seconde...

Jacques WILLEKENS, Bruxelles

Réponse d'Octavian Ureche et Réjean Plamondon

Le protocole SSL implique plusieurs phases. Une première phase consiste en l'établissement du lien encrypté de communication entre le client et le serveur. Cette phase est elle-même formée de deux étapes : l'authentification du serveur et l'authentification (optionnelle) du client. La deuxième phase consiste en l'envoi proprement dit des données. Si la première phase utilise effectivement un chiffre asymétrique, notamment le chiffre RSA, la deuxième phase utilise un chiffre symétrique. Lors de la première étape de la première phase, en répondant à la demande du client, le serveur envoie son certificat et ses préférences d'encryptage (le chiffre à utiliser, etc.). Le client crée une clé de session (chaque session, et non pas chaque message lors d'une même session, ayant une clé différente) et l'envoie au serveur, encryptée avec la clé publique de ce dernier. Le serveur décrypte la clé de session et s'identifie en retournant un message authentifié avec la clé de session. Toutes les données seront par la suite encryptées et authentifiées avec cette clé de session. La clé de session utilisée par un algorithme d'encryptage symétrique tel que RC4 a une longueur de quelques dizaines de bits, 40 jusqu'à tout récemment, 128 depuis peu de temps. Même s'il n'est pas trop difficile de craquer des clés très courtes, la cryptanalyse n'est pas à la portée de tout le monde. Toutefois, ceci est en train de changer avec la puissance croissante des ordinateurs personnels accessibles à des prix dérisoires. C'est pour de telles raisons que de plus en plus de gouvernements allègent leurs politiques en matière de cryptographie pour passer à des clés plus longues, donc plus sûres.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pouirlascience.fr. D'autres contributions de lecteurs sont sur le site Web à <http://www.pouirlascience.com>.



Gödel et les limites de la logique

JOHN DAWSON

Le mathématicien Kurt Gödel a consacré ses travaux à la rationalité, alors que sa vie privée en était parfois dépourvue.

Le personnage qui est représenté sur la photographie ci-dessus n'est pas connu du grand public. Pourtant, ses théorèmes d'incomplétude et ses autres résultats de mathématiques ou de logique ont ébranlé les mathématiques et l'informatique. Toute sa vie, il rechercha la rationalité, mais dut lutter contre une profonde fragilité mentale.

Gödel a démontré que les méthodes mathématiques utilisées depuis Euclide ne peuvent révéler toutes les propriétés de l'ensemble des nombres entiers naturels. Sa découverte, qui bouleversa les mathématiques créées au xx^e siècle, a relancé la recherche de nouvelles voies d'étude et provoqué un débat philosophique sur la nature de la vérité. Les techniques inventées par Gödel, qui sont applicables aux algorithmes de calcul, ont également posé les fondations de l'informatique moderne.

Gödel naît le 28 avril 1906 à Brno, à 180 kilomètres au Sud-Est de Prague, en République tchèque. Il est le cadet des deux enfants de Rudolf et Marianne Gödel, des Allemands expatriés dont les familles travaillaient pour l'industrie textile locale. La famille ne comptait pas d'intellectuels, et son père n'avait reçu qu'une formation en techniques commerciales. Toutefois, ce dernier était ambitieux et travailleur : il sera progressivement directeur, puis actionnaire d'une importante usine de textile de Brno. Suffisamment enrichi, Rudolf Gödel acquiert une maison dans un quartier chic et envoie ses fils dans des écoles privées de langue allemande, où tous deux font de brillantes études.

De toute sa scolarité primaire et secondaire, le jeune Kurt n'a qu'une seule fois une note inférieure au maximum – en mathématiques ! Pourtant, ses talents restent insoupçonnés, car, malgré son insatiable curiosité (il est surnommé Monsieur Pourquoi), il est introverti, sensible et

plutôt maladif. Vers l'âge de huit ans, il contracte un rhumatisme articulaire aigu qui, bien que sans séquelles physiques, l'éloigne de l'école assez longtemps. Cette maladie est probablement l'une des causes de son hypochondrie.

L'INTROVERTI

En 1924, diplômé du lycée technique de Brno, Gödel quitte son pays natal pour l'Université de Vienne, où son frère a commencé ses études de médecine quatre ans plus tôt. Après la Première Guerre mondiale et la chute de l'empire austro-hongrois, Vienne est en ruine,

mais le prestige de l'Université est intact. Ainsi, malgré les privations matérielles, la Vienne de l'entre-deux-guerres est un centre scientifique littéraire et philosophique très actif.

Initialement inscrit en physique, Gödel s'oriente vers les mathématiques dès qu'il a suivi les cours de Phillip Furtwängler et de Hans Hahn (1879-1934). Il est vite remarqué : deux ans seulement après son arrivée, il est invité dans le groupe de travail fondé en 1924 par Hahn et par le philosophe néo-positiviste Moritz Schlick (1882-1936). Ce groupe, qui deviendra le Cercle de Vienne, est inspiré des écrits d'Ernst Mach (1838-1916), rationaliste pour qui seules la logique et l'observation empirique ont une valeur explicative ; la métaphysique est écartée.

Grâce au Cercle, Gödel rencontre des savants tels que le philosophe des sciences Rudolf Carnap (1891-1970) ou le mathématicien Karl Menger (1902-1985). Il se familiarise avec la logique mathématique et la philosophie, et, en particulier, avec les écrits de Ludwig Wittgenstein (1889-1951), dont la réflexion sur l'aptitude du langage à parler de lui-même a peut-être poussé Gödel à explorer les problèmes équivalents en mathématiques.

Avec certains membres du Cercle, dont Carnap, Hahn et le physicien Hans Thirring, il s'intéresse également aux phénomènes parapsychologiques. Des années plus tard, il confiera à son ami économiste Oskar Morgenstern (1902-1977) que, dans un futur lointain, on s'étonnera que les scientifiques du xx^e siècle aient découvert les particules physiques élémentaires, sans même envisager la possibilité de facteurs psychiques élémentaires.

Cependant, Gödel ne partage pas la vision philosophique positiviste du Cercle. Il est platonicien : en dehors des objets, un monde de concepts existe, accessible



1. LES DEUX FRÈRES GÖDEL, Kurt (à droite) et Rudolf étaient très proches ; ils se sont peu à peu éloignés à l'âge adulte. Ce cliché de studio date de 1908.

par l'intuition. Ainsi, toute proposition a une «valeur de vérité» (être vraie ou être fausse), que cette valeur ait été établie ou non par les mathématiques ou par un moyen expérimental. Il admettra ultérieurement que cette philosophie a facilité ses intuitions mathématiques.

Observateur attentif et brillant, Gödel s'exprime rarement lors des discussions du Cercle, sauf lorsqu'elles concernent les mathématiques. Timide et solitaire, il a peu d'amis intimes (cependant, il apprécie la compagnie des femmes, qui le trouvent séduisant). Après 1928, il délaisse peu à peu le groupe et s'investit dans un séminaire de mathématiques organisé par Menger. Gödel participe à la publication annuelle des actes ; il publiera ainsi une dizaine d'articles.

UN GÉNIE RÉSERVÉ

C'est l'époque à laquelle Gödel acquiert une réputation internationale en logique mathématique, notamment grâce à deux articles : sa thèse, soutenue à l'Université de Vienne en 1929 et publiée l'année suivante, et son traité *Sur les propositions formellement indécidables des Principia Mathematica et des systèmes apparentés*, publié en allemand en 1931 et présenté comme thèse d'habilitation à l'enseignement en 1932. Dans les *Principia Mathematica* de Bertrand Russell (1872-1970) et d'Alfred Whitehead (1861-1947), les auteurs proposent la logique comme fondement des mathématiques. Ils résolvent un problème posé en 1928, par David Hilbert (1862-1943) et par Wilhelm Ackermann (1896-1962) dans leurs *Fondements de la Logique théorique* : Hilbert et Ackermann y énoncent des règles de manipulation d'expressions logiques composées de connecteurs (et, ou...), de quantificateurs (pour tout, il existe...), et de variables (nombres, propositions, ensembles...). Les règles de manipulation admises ajoutées aux axiomes d'une théorie mathématique permettent-elles de déduire toutes les propositions vraies pour toute structure vérifiant les axiomes ? Plus simplement, peut-on démontrer tout ce qui est vrai pour toutes les interprétations des symboles ?

La réponse attendue était oui, et Gödel le confirme dans sa thèse intitulée *La complétude du calcul des prédicats du premier ordre*, où il établit que les principes de la logique prouvent tout ce qui est vrai à partir d'un ensemble d'axiomes donné. Cependant, il ne démontre pas que les axiomes alors admis pour la théorie des nombres permettent de démontrer toutes les propositions à propos des nombres. Les axiomes de la théorie des nombres avaient été proposés par le

mathématicien italien Giuseppe Peano (1858-1932) en 1889 ; ils incluent l'axiome de récurrence, qui affirme que toute propriété vraie pour zéro, et vérifiée par le nombre $n+1$ lorsqu'elle est vraie pour le nombre n , est vraie pour tout entier naturel. Cet axiome semble évident, mais il gêne les mathématiciens parce qu'il concerne les propriétés des nombres plutôt que les nombres eux-mêmes : c'est un axiome du second ordre, qui semble trop éloigné des nombres pour définir ces derniers. De la même manière, savoir qu'un ballon est bleu n'indique pas ce qu'est un ballon.

L'axiome de récurrence avait été reformulé sous la forme d'un groupe infini d'axiomes identiques, qui se rapportaient à des formules spécifiques plutôt qu'aux propriétés générales des nombres. Malheureusement, le logicien norvégien Thoralf Skolem avait démontré que ces axiomes ne caractérisent pas seulement des nombres naturels : ils sont également vérifiés par d'autres structures nommées entiers non standards.

Le théorème de complétude de Gödel indique que l'on peut démontrer toutes les propositions qui découlent des axiomes ; cependant une proposition qui est vraie pour les nombres naturels, mais fausse pour un autre système d'éléments qui vérifient les mêmes axiomes, est alors indémontrable (voir l'encadré). Les mathématiciens dédaignent la restriction en espérant qu'il n'existe pas d'entités similaires aux nombres.

L'article que Gödel publie en 1931 bouleverse alors les mathématiques. Il

montre que certaines propositions vraies pour les nombres naturels sont indémonstrables : il existe des objets qui vérifient les axiomes de la théorie des nombres, mais se comportent différemment à d'autres égards. En prenant toutes les propositions vraies pour axiomes, on contournerait ce «théorème d'incomplétude» ; mais alors comment savoir si les propositions sont vraies ? Gödel montre que, lorsque les axiomes sont décrits par un ensemble de règles mécaniques, le choix des axiomes n'évite pas la difficulté : quand elles sont vraies pour les nombres naturels, d'autres propositions vraies sur ces nombres restent indémonstrables.

Par exemple, lorsque les axiomes ne se contredisent pas mutuellement, cette non-contradiction, correctement codée en une proposition numérique, est formellement indécidable, c'est-à-dire ni démontrable ni réfutable à partir des axiomes. La démonstration de la non-contradiction nécessite donc des principes plus puissants que les axiomes eux-mêmes.

Ce dernier résultat ruine le programme de David Hilbert, qui voulait renforcer les fondements des mathématiques et déduire la cohérence des théories mathématiques complexes de celle de théories plus simples. Pour Gödel, en revanche, les théorèmes d'incomplétude ne réfutent pas l' inanité de la méthode axiomatique, mais ils montrent que la démonstration de théorèmes ne peut être complètement mécanisée et ils justifient l'intuition en mathématique.



2. LE COUPLE ADÈLE PORKERT ET KURT GÖDEL était très uni. Ils sont ici à la terrasse d'un café de Vienne, pendant leurs longues fiançailles. Adèle Porkert protégeait Gödel de ses peurs irrationnelles et était souvent la seule personne à pouvoir le convaincre de manger. Plus que quiconque, elle a contribué à le maintenir en vie et en état de travailler.

Les concepts et les méthodes introduits par Gödel sont au centre de la théorie de la récurrence, centrale en informatique. Ses idées sont à l'origine de nombreux résultats sur les limites des procédures informatiques, par exemple, sur le caractère indécidable de la durée d'exécution des programmes : pour une donnée d'entrée et un programme fixé, un ordinateur s'arrêtera-t-il finalement, en produisant une donnée de sortie, ou finira-t-il dans une boucle infinie ? De même, aucun programme ne peut détecter tous les programmes qui modifient le système d'exploitation d'un ordinateur (les virus, par exemple) sans modifier lui-même ce système.

LE REFUGE AUX ÉTATS-UNIS

Gödel passe l'année universitaire 1933-1934 à l'Institut des études avancées de Princeton, où il enseigne son théorème d'incomplétude. Une «dépression nerveuse» peu après son retour à Vienne

l'empêche d'y retourner l'année suivante. Guéri à l'automne 1935, il part l'année d'après, mais il rechute un mois après son arrivée et ne reprend son enseignement qu'au printemps 1937, à Vienne.

Tant qu'on ne disposera pas du dossier médical de Gödel (il était suivi par un psychiatre de Princeton), la maladie de Gödel restera mystérieuse. Elle commence par une hypocondrie : obsédé par son régime et sa digestion, il note quotidiennement, pendant plus de 20 ans, sa température et sa consommation de magnésie. Il redoute initialement un empoisonnement accidentel, mais, vers la fin de sa vie, il craint qu'on ne veuille le tuer en l'empoisonnant. Il cesse presque de s'alimenter, tandis qu'il prend de nombreuses pilules contre une maladie cardiaque imaginaire.

En dehors des crises aiguës, la capacité de travail de Gödel est peu perturbée par ses problèmes mentaux. Il est soutenu par Adèle Porkert, qu'il a rencontrée dans une boîte de nuit de Vienne, pendant ses études. Son aînée de six ans,

Adèle est catholique, divorcée, danseuse de profession. Les parents de Gödel la jugent dépravée, mais le couple est très uni, et elle l'aide souvent à surmonter sa peur grandissante de l'empoisonnement en jouant le rôle de goûteuse. Ils se marient en septembre 1938, juste avant le retour de Gödel en Amérique, où il doit présenter ses nouveaux résultats en théorie des ensembles à Princeton et à l'Université de Notre-Dame.

Ces résultats résolvent des questions anciennes. À la fin du XIX^e siècle, le mathématicien allemand Georg Cantor (1845-1918) a trouvé un moyen de comparer la taille des ensembles infinis : on apparie les éléments de l'ensemble A et ceux de l'ensemble B ; si cet appariement laisse des éléments de A non appariés, alors l'ensemble A est plus grand que l'ensemble B . Ainsi Cantor a démontré que l'ensemble des nombres naturels est plus petit que l'ensemble des nombres réels. De plus, il a supposé qu'aucun ensemble de taille intermédiaire n'existe : c'est l'hypothèse du continu.

En 1908, Ernst Zermelo (1871-1953), compatriote de Cantor, a formulé une liste d'axiomes pour la théorie des ensembles. Parmi cette liste figure l'axiome du choix, qui stipule que, si l'on considère une collection infinie d'ensembles disjoints, qui contiennent chacun au moins un élément, on peut former un ensemble en retenant un élément de chaque ensemble de la collection. Malgré son apparente évidence, l'axiome du choix a des conséquences paradoxales. Par exemple, si on l'accepte, on doit aussi admettre qu'une sphère est décomposable en un nombre fini de morceaux que l'on peut séparer et rassembler en une nouvelle sphère de volume double de la première.

L'axiome du choix est très controversé : les mathématiciens contemporains de Gödel soupçonnent, à juste titre, que ni l'axiome du choix ni l'hypothèse du continu ne peuvent être déduits des autres axiomes de la théorie des ensembles. Ils craignent que l'utilisation de ces théorèmes dans des démonstrations ne mènent à des contradictions. Cependant, Gödel démontre que les deux axiomes sont cohérents avec les autres.

Les résultats de Gödel en théorie des ensembles répondent à une question posée par Hilbert en 1900 lors du Congrès international des mathématiciens. Malgré leur importance, ils ne lui procurent pas un poste permanent. Pendant son année passée à Princeton et à l'Université de Notre-Dame, son autorisation d'enseigner dans les universités autrichiennes lui est retirée. Pendant l'été 1939, alors qu'il rejoint sa femme à Vienne, il est convoqué pour un examen médical militaire, et déclaré apte au service dans les forces armées nazies.

Les propositions indécidables

Le résultat le plus célèbre de Gödel concerne des propositions sur les nombres naturels, vraies mais indémonstrables dans l'arithmétique. La phrase réflexive suivante est un exemple simple de propositions vraies, mais indécidables, c'est-à-dire ni démontrables ni réfutables :

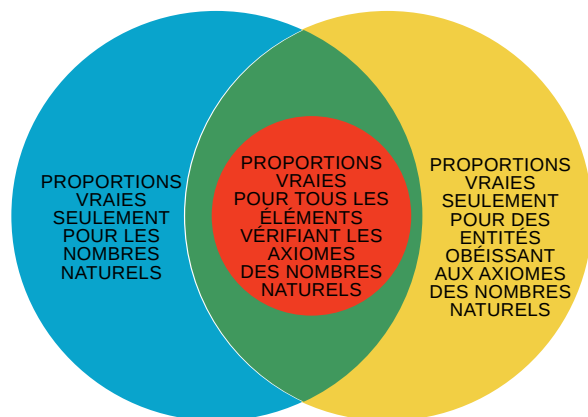
«*Cette proposition est indémontrable.*»

Elle peut être transformée en un nombre selon une méthode mise au point par Gödel. Ensuite, on montre d'une part que si cette proposition est démontrable, sa négation l'est aussi : elle est donc indémontrable. D'autre part, on prouve qu'elle est néanmoins vraie.

Les équations polynomiales conduisent à des propositions un peu plus compliquées. Par exemple, l'affirma-

tion que certaines équations polynomiales n'ont pas de racines (c'est-à-dire de solutions) entières est indécidable.

Gödel a démontré que les axiomes qui définissent les nombres entiers naturels sont incomplets : certaines propositions vraies de la théorie des nombres sont indémonstrables à l'aide de ces axiomes. Sa démonstration montre, par conséquent, qu'il existe des entités, nommées entiers non standards, différentes des nombres naturels qui obéissent néanmoins à ces axiomes. Comme tout ce qui est démontré à partir des axiomes (*en rouge*) s'applique à toutes les entités qui obéissent aux axiomes, certaines propositions vraies concernant les nombres naturels (*en bleu*, *en vert* et *en rouge*) sont nécessairement indémonstrables (*en bleu et en vert*).



Brian Christie

Jusqu'alors Gödel s'est peu soucié de la tournure inquiétante des événements en Europe. Il s'est intéressé à la politique et à l'actualité, mais les événements l'ont peu ému. Son isolement l'a peut-être empêché de mesurer la gravité des événements. Il s'intéresse peu à ses collègues et professeurs, dont beaucoup sont juifs, et reste concentré sur ses travaux pendant que le monde s'écroule autour de lui. Avec sa convocation de l'armée, l'Histoire le rattrape.

Désespéré, sans emploi et menacé par l'incorporation imminente, il demande le soutien de l'Institut des études avancées et obtient des visas de sortie. En janvier 1940, le couple fuit vers l'Est à bord du Transsibérien. Puis, de Yokohama, ils embarquent pour San Francisco et atteignent enfin Princeton par le train à la mi-mars.

DES PHOBIES GRANDISSANTES

Gödel ne quittera plus les États-Unis. Après plusieurs contrats annuels, il n'est engagé de façon définitive qu'en 1946. Deux ans plus tard, il prend la nationalité américaine. À cette occasion, le juge qui lui demandait son opinion sur la constitution des États-Unis se voit affligé d'un long discours sur les incohérences logiques de ce système. C'est seulement en 1953 que Gödel est nommé professeur, alors qu'il est également élu membre de l'Académie américaine des sciences. On craignait sa maladie mentale : ne disait-il pas partout que des gaz toxiques fuyaient de son réfrigérateur ? Pendant ces années, son ami Albert Einstein s'occupe de lui de son mieux, notamment par des promenades quotidiennes. Leurs conversations apaisaient Gödel.

À son arrivée aux États-Unis, Gödel abandonne la théorie des ensembles pour se consacrer à la philosophie et à la relativité. En 1949, il montre que des univers où le voyage vers le passé est possible sont compatibles avec les équations d'Einstein. En 1950, il présente ces résultats au Congrès international des mathématiciens et, l'année suivante, il donne la prestigieuse conférence Gibbs à la réunion annuelle de l'Association mathématique des États-Unis. Entre ces deux discours, il frôle la mort, parce que sa méfiance envers les médecins lui a fait négliger un grave ulcère.

Le dernier article publié de Gödel paraît en 1958. Il se renferme ensuite progressivement sur lui-même, et, de plus en plus amaigri, devient paranoïaque et hypocondriaque. Sa dernière apparition en public date de 1972, quand l'Université Rockefeller le fait docteur *honoris*



Richard Arens

3. LES PROMENADES AVEC EINSTEIN dans le parc de l'Institut des études avancées de Princeton étaient un des rites qui maintenant Gödel en activité. Cette photographie date de 1954.

causa. Trois ans plus tard, quand on lui décerne la Médaille américaine des sciences, il n'assiste pas à la cérémonie, pour raison de santé.

Le 1^{er} juillet 1976, quand Gödel atteint l'âge de la retraite (70 ans), il est nommé professeur émérite de l'Institut. Toutefois sa femme, qui l'a tant materné, est handicapée par un accident vasculaire cérébral qui l'a frappée quelques mois auparavant. Il prend soin d'elle avec dévouement jusqu'en juillet 1977, lorsqu'elle est opérée d'urgence et hospitalisée pendant près de six mois.

À ce moment, Morgenstern, l'ami qui a pris la relève d'Einstein après la mort de celui-ci en 1955 pour s'occuper de Gödel, meurt d'un cancer. Gödel se retrouve seul avec sa paranoïa grandissante, et décline rapidement. Par peur d'un empoisonnement, il cesse de s'alimenter, et il meurt le 14 janvier 1978.

Adèle Gödel survit trois ans à son mari. À sa mort, le 4 février 1981, elle lègue les droits des articles de Gödel à l'Institut des études avancées. La population hautaine de Princeton l'a toujours tenue à l'écart, mais elle était fière des travaux de son mari et elle savait que, sans son soutien, il n'aurait pas pu le mener à bien.

Gödel a publié très peu d'articles de son vivant (Bernard Riemann est le seul grand mathématicien qui ait publié moins) ; cependant leur impact a été énorme. Certains de ses articles, qui étaient écrits à la main, en gothique, ont été récemment traduits et publiés dans le troisième volume de ses *Œuvres complètes*. Leur contenu, par exemple sa formalisation de la « preuve ontologique » de l'existence de Dieu, intéressent aujourd'hui l'attention jusqu'aux non-mathématiciens.

John DAWSON est professeur de mathématiques à l'Université de Pennsylvanie ; il est l'un de ceux qui ont assuré l'édition des *Œuvres complètes* de Gödel.

Ernst NAGEL, **James NEWMAN**, **Kurt GÖDEL** et **Jean-Yves GIRARD**, *Le théorème de Gödel*, Le Seuil, 1997.

Douglas R. HOFSTADTER, *Gödel, Escher, Bach*, Interéditions, 1998.

Kurt GÖDEL, *Collected Works*, vol. 1-3, sous la direction de Solomon Feferman et al., Oxford University Press, 1986, 1990, 1995.

John W. DAWSON, *Logical Dilemmas : The Life and Work of Kurt Gödel*, A.K. Peters Ltd., Wellesley, Mass., 1997.



Le verre à vin

HERVÉ THIS

Le même verre convient aux vins blancs et aux vins rouges.

Les adeptes de la dive bouteille se passent rarement d'un verre. Un verre, mais lequel ? Des générations de gourmets ont débattu de la meilleure forme, de la meilleure taille, mais l'Institut national des appellations d'origine (INAO) a imposé un verre dit ISO, au calice environ deux fois plus haut que large. Est-ce le meilleur ? Comme les dégustateurs allemands prônaient un verre plus rond, Ulrich Fischer, du Département d'œnologie de Neustadt, et sa collègue Britta Loewe-Stanienda ont exploré l'intensité des perceptions des arômes dans des verres de diverses tailles et formes.

L'intervention des organismes de normalisation a harmonisé les dégustations, avant que l'on connaisse l'importance exacte de la forme ou de la taille sur la perception. C'est pour des raisons d'usage que l'on sert le vin rouge dans des verres plus volumineux que ceux qui sont utilisés pour les vins blancs, les moelleux dans des calices à ouverture plus large que ceux destinés aux vins secs.

Avant d'étudier l'effet de la forme des verres, les chercheurs allemands en ont cherché les raisons physico-chimiques. La physique sait que la pression de vapeur d'une molécule dissoute dans un liquide dépend du solvant, du soluté et de la température ; on sait aussi que les molécules passées en phase gazeuse dans le verre diffusent dans l'air environnant à une vitesse qui dépend de l'ouverture du verre. Le dégustateur capte les molécules volatiles passées en phase gazeuse quand il hume l'air présent dans le calice, mais il enchaîne souvent plusieurs inspirations. Les molécules aromatiques ont-elles alors le temps de passer à nouveau en phase gazeuse ? Pour le savoir, les chercheurs allemands ont utilisé la chromatographie en phase gazeuse pour analyser l'air qui surmonte le vin, à différentes hauteurs et à différents temps après le versement du vin dans le verre ; une quarantaine de

composés a été étudiée, à différentes températures.

On savait que la vitesse de libération des molécules aromatiques dépend de leur constitution chimique, mais d'autres différences sont apparues : la vitesse de libération des esters varie bien moins, selon la température, que la vitesse de libération des alcools ou des phénols volatils. Ce phénomène explique pourquoi, quand les vins sont consommés froids, les esters se

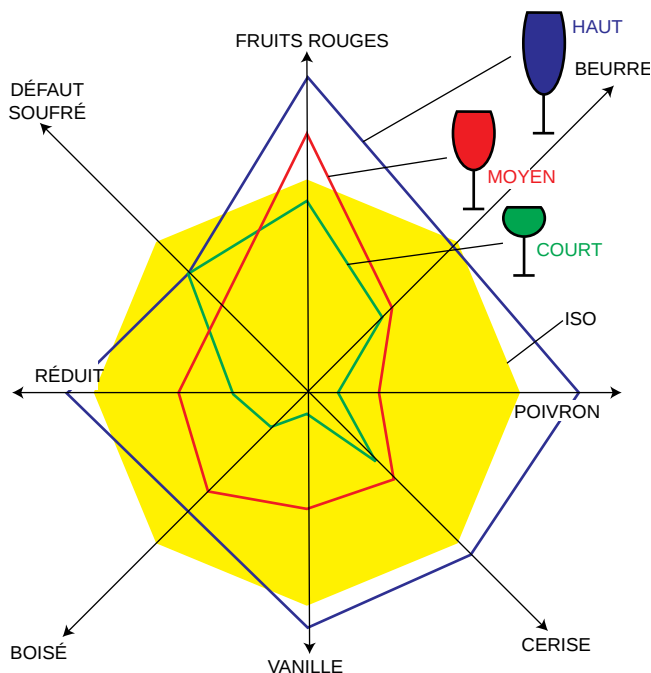
pas vouloir sentir le vin à moins de 15 secondes d'intervalle s'ils veulent des sensations reproductibles. Ils auront les sensations les plus fortes s'ils hument l'air à proximité de l'ouverture du verre.

Ayant ainsi précisé les conditions de dégustation, les chercheurs ont fait tester à des dégustateurs dix verres ayant différents diamètres maximaux, hauteurs et diamètres d'ouverture ; les dégustateurs devaient noter l'intensité d'une dizaine de notes (beurrée, florale, fruits rouges...) pour chaque verre.

Ces expériences ont été riches d'enseignements : par exemple, avec des vins blancs, la forme étroite du calice fait plus ressortir le caractère réduit (une odeur tendant vers celle de chou) ou le caractère soufré des vins que le calice du verre ISO ; les verres ayant une petite et une moyenne hauteur de calice produisent des sensations plus faibles que les verres étroits ; l'augmentation du volume du calice ne réduit pas l'intensité des perceptions ; les verres ayant le calice et l'ouverture les plus larges, qui sont réputés particulièrement appropriés pour la dégustation des vins rouges, ne sont pas supérieurs au verre ISO, qui a un calice assez étroit...

Trois découvertes, surtout, bouleversent l'œnologie : d'abord, l'intensité de toutes les perceptions change avec le type de verre. D'autre part, l'augmentation de la hauteur du calice

et du rapport entre l'ouverture et le diamètre maximal du calice intensifie toutes les perceptions. Enfin, contrairement à ce qui est prétendu par de nombreux fabricants, les verres qui donnent les meilleurs résultats pour la dégustation des vins blancs sont aussi ceux qui favorisent la dégustation des vins rouges. Un dogme tombe.



Perception de huit notes aromatiques dans des verres de diamètre égal à celui du verre ISO, mais de diverses hauteurs. Sur chacun des huit axes, un point représentatif éloigné de l'origine correspond à une perception intense.

concentrent plus rapidement que les alcools ou les esters, stimulant la perception des notes fruitées. Est-ce aussi la raison pour laquelle on boit les vins blancs plus frais que les vins rouges ? Les esters fruités, qui dominent souvent le bouquet des vins blancs, sont rapidement présents en quantités suffisantes à basse température, tandis qu'il faut servir les vins rouges plus chauds, afin de percevoir suffisamment les phénols volatils.

Au total, les mesures montrent que les gourmets seront bien avisés de ne

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 30 août 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.