



Dessins de Bruno Vacaro

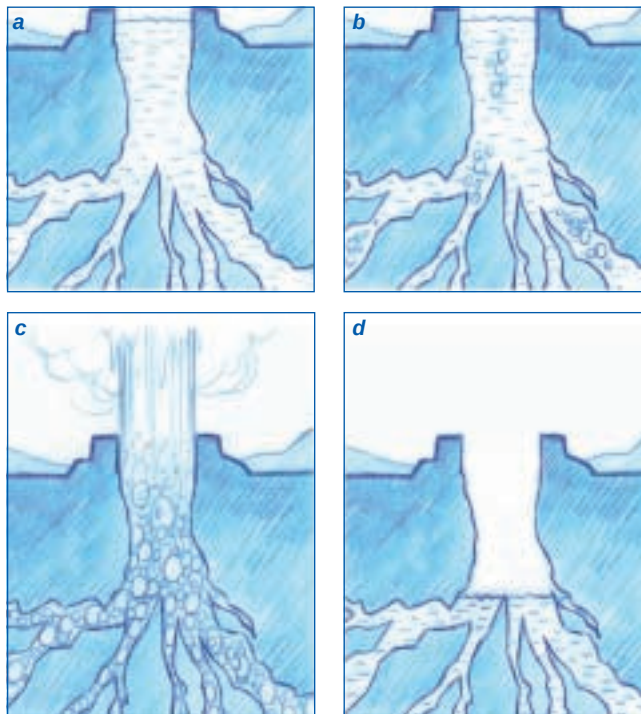
Les geysers sont alimentés par un réseau souterrain ramifié (à gauche), où circule de l'eau d'infiltration. Pour qu'il y ait éruption, il faut que la colonne qui est en contact avec l'air libre (à droite, a), soit pleine d'eau. Parfois, localement, l'eau surchauffe, c'est-à-dire que sa température dépasse la température d'ébullition pour la pression subie ; elle est alors dans un état métastable et la moindre perturbation locale rompt cet état : de petites bulles de vapeur d'eau se forment (b). Dès que de telles bulles apparaissent, elles remontent vers la surface, repoussant l'eau vers le haut. Dès lors, à divers endroits, la pression diminue

chauffée en son milieu. Lorsque la température d'ébullition est atteinte dans cette région, l'eau passe ponctuellement de l'état liquide à l'état vapeur, et des bulles de vapeur d'eau se forment et commencent à remonter vers la surface. Cette pression interne repousse vers le haut de l'eau liquide, de sorte que la pression à laquelle est soumis le liquide dans la partie basse de la colonne diminue ; il en résulte que la température d'ébullition du liquide, dans cette région, diminue et devient inférieure à la température ambiante. De nouvelles régions se mettent alors à bouillir : la vapeur d'eau qui se forme au sein du liquide tend à faire remonter davantage de liquide, ce qui abaisse encore localement la pression. Cette réaction en chaîne, très rapide, se traduit par la brutale projection d'un grand volume de vapeur et d'eau vers la surface.

UNE SOURCE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

Ce phénomène s'arrête lorsque la température du liquide restant n'est plus assez élevée ou lorsque le volume d'eau présent dans le réseau de conduits est trop faible. Ainsi, les explosions sont intermittentes, séparées par des périodes de calme. Il faut attendre que le réseau des conduits directement connectés à la surface soit de nouveau plein d'eau chaude pour que l'ébullition et la propulsion recommencent. La longueur de la conduite principale, l'existence d'un bassin de stockage en profondeur, ou encore la configuration du réseau de fractures alimentant la conduite conditionnent la nature du geyser. Les vitesses de remplissage et de réchauffement imposent le rythme des pulsations du geyser. Les données sur la structure réelle des geysers sont rares, surtout parce qu'il est difficile de les explorer.

La vapeur d'eau à haute température dissout la plupart des espèces chimiques à la surface des roches. Ainsi, elle est sou-



et de l'eau surchauffée passe de l'état liquide à l'état vapeur. Les bulles de vapeur qui se forment sont de plus en plus nombreuses et de plus en plus grosses, jusqu'à ce qu'elles emplissent toute la colonne (c). La brusque augmentation de volume fait jaillir le geyser. Lorsque la pression retombe, l'eau se stabilise dans la colonne, laquelle est partiellement vide (d). Lorsque la colonne sera à nouveau pleine d'eau et que la température de l'eau aura localement dépassé la température d'ébullition normale pour la pression subie, l'eau sera dans un état instable, et la « réaction en chaîne » recommencera.

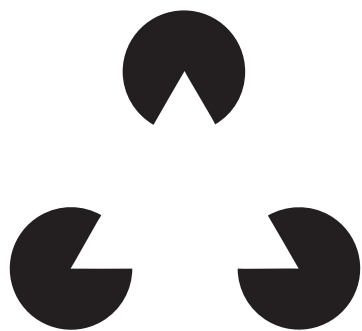
vent saturée en silice, qui précipite juste à la sortie du geyser : la température baisse brusquement et avec elle la solubilité des électrolytes dissous, et ces derniers précipitent, formant un petit dôme de silice. Dans le cas des solfatares, la vapeur d'eau qui s'échappe est enrichie en soufre provenant du magma. À l'air libre, la solubilité du soufre dans l'eau diminue et du soufre pur cristallise. De l'acide sulfurique se forme également par réaction du sulfure d'hydrogène qui s'échappe de la Terre et de l'eau. À proximité de certains volcans s'étendent même des lacs d'acide sulfurique plus ou moins concentré. Dans d'autres cas, l'eau chaude dissout divers minéraux pour former des lacs de boue, desquels émergent de grosses bulles gluantes qui éclatent en faisant un bruit étrange.

L'énergie emmagasinée dans le sol et éventuellement libérée sous forme de geysers est exploitée par l'homme. L'eau réchauffée au contact de roches chaudes en profondeur est utilisée pour les centrales géothermiques ou directement par diverses industries ou pour le chauffage des habitations. Ce sont principalement les régions situées à la périphérie de l'Océan Pacifique (États-Unis, Philippines, Amérique du Sud, Nouvelle-Zélande), mais aussi l'Islande, qui utilisent cette source d'énergie. Les sources chaudes, riches en minéraux sont réputées bonnes pour la santé ; elles proviennent généralement des geysers plus doux, éjectant l'eau presque en continu.

Philippe COUSSOT travaille au laboratoire des matériaux et des structures du Génie civil, LMSGC / UMR 113 LCPC-CNRS, à Champs-sur-Mame.

J.S. RHINEHART, *Geysers and geothermal energy*, Springer-Verlag, Berlin, 1980.

J. ELDER, *Geothermal systems*, Academic Press, New York, 1981.



Illusion ou réalité?

JEAN BULLIER

Un tableau dynamique défie les neurophysiologistes de la perception.

Regardez le tableau *Enigma* d'Isia Leviant (voir la figure 2) en fixant le centre. Après quelques secondes, des nuées colorées apparaissent et se déplacent le long des anneaux. Parfois, à la faveur d'une saccade oculaire ou d'un clignement des yeux, le sens de rotation des nuées s'inverse : elles repartent de plus belle dans la direction opposée. Cette sensation de mouvement alors que tout est stable dans le tableau d'I. Leviant est une illusion visuelle dont les neurophysiologistes de la perception sont friands.

Nous sommes victimes d'une illusion lorsque nous percevons une chose qui n'existe pas ou qui ne peut être perçue par le système visuel. Les illusions visuelles ne sont pas que des curiosités de laboratoire : nous vivons dans un monde visuel reconstruit par notre cerveau et la différence entre illusion et réalité n'est pas aussi tranchée. Par exemple, la nuit, sur une autoroute éclairée par les lampadaires au néon, les roues des voitures que vous dépassez semblent tourner à l'envers : vous vous souvenez alors des roues des diligences au cinéma qui tournent également à l'envers, et vous en déduisez que cette illusion est due à l'éclairage discontinu des lampadaires au néon. Pourtant, l'impression est là : la roue tourne lentement dans le sens inverse de son mouvement réel. Illusion ou réalité ?

À l'horizon, une Lune pleine paraît deux fois plus grosse que d'habitude. Que se passe-t-il ? La distance de la Terre à la Lune est constante, et la Lune n'est pas grossie par un phénomène optique. Seulement, notre système visuel juge la Lune à l'horizon plus lointaine que lorsqu'elle est au zénith. Là encore, nous avons beau nous persuader que la lune ne change pas de taille, nous la voyons deux fois plus grosse. Illusion ou réalité ?

De ces exemples tirés de la vie courante, nous concluons qu'il s'agit d'illusions parce qu'il y a contradiction entre ce que nous observons et ce que nous savons. Toutefois, lorsqu'il n'y a pas de contradiction, nous nous accommodons

de cette perception illusoire. Par exemple, à l'aide d'un ordinateur ou de deux projecteurs de diapositives, présentez une tache de lumière de n'importe quelle forme qui s'éteint alors qu'une même tache de lumière s'allume quelques centimètres plus loin et quelques centièmes de seconde plus tard. Vous voyez un mouvement rapide de la tache de lumière entre les deux positions, or rien ne bouge, il s'agit seulement de taches de lumière qui s'allument et qui s'éteignent ! Quand les deux taches de lumière sont de couleurs différentes, la première semble toujours se déplacer, mais en plus, elle change de couleur à mi-chemin. Cette illusion, qui passe inaperçue tant qu'il n'y a pas contradiction avec d'autres perceptions ou d'autres connaissances, est nommée mouvement apparent ou mouvement ϕ . Notre cerveau reconstruit un phénomène qui n'a rien à voir avec la réalité.

Ainsi, nous vivons dans un monde visuel qui n'est qu'une interprétation de la réalité construite par notre cerveau,

et particulièrement par le cortex visuel. Ce dernier compense les limites de la première étape du traitement des informations visuelles : l'œil. Bien que célébré par de nombreux philosophes et par Darwin pour l'ingéniosité de sa «conception», l'œil est un bien pauvre capteur : la vision des détails n'est précise que dans la partie centrale du champ visuel ; au-delà, c'est le flou le plus total.

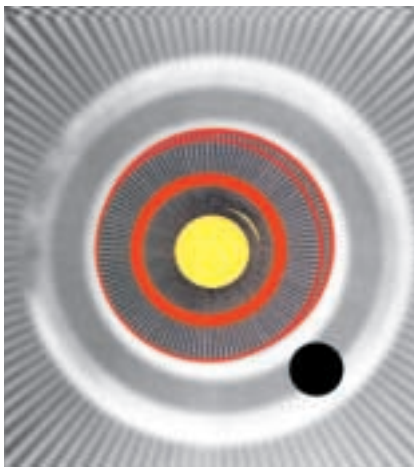
Par ailleurs, dans chaque œil, la rétine a une région aveugle, sans cellule sensible, qui correspond au point de convergence de toutes les cellules nerveuses de la rétine, et à l'origine du nerf optique.

Seule la région centrale de la rétine autorise la vision des couleurs (un disque dont le rayon est environ la moitié du rayon de la rétine), car, à la périphérie, les informations perçues par les cellules sont «mêlées» par les relais qui les véhiculent jusqu'au cerveau.

Enfin, l'œil n'est jamais stable : lorsque vous fixez une lettre sur cette page, l'image de cette lettre se déplace constamment sur la rétine à cause des micromouvements de l'œil ; l'amplitude de ces mouvements est de l'ordre de la taille de la lettre. De ces caractéristiques oculaires, nous pouvons reconstituer le tableau d'I. Leviant tel que le voit notre œil sans reconstruction par le cerveau (voir la figure 1).

Toutefois, malgré les mouvements, la zone aveugle, l'acuité visuelle médiocre et la faible perception des couleurs, nous avons l'impression d'un monde visuel stable où tout est perçu avec la même acuité et avec un rendu parfait des couleurs.

L'illusion n'est donc pas l'exception, mais bien la norme : nous vivons dans une perception visuelle illusoire qui résulte de la reconstruction de la scène visuelle par le cortex visuel. Ce dernier est divisé en de nombreuses aires : la première, V1, reçoit l'ensemble des informations issues de la rétine que V2 répartit ensuite dans des aires secondaires spécialisées ; par exemple, V4 est dédiée aux formes et aux couleurs, tandis que V5 traite les informations relatives au mouvement et à la profondeur.



1. RECONSTITUTION D'ENIGMA tel que notre œil droit le voit (quand il est près du tableau) sans la reconstruction par notre cerveau : on y distingue la zone centrale où la vision est nette et colorée ; la zone où l'image est encore colorée, mais floue ; la zone où l'image perd sa couleur, la naissance du nerf optique (la tache noire, dite aveugle), et enfin, les mouvements saccadés de l'œil (la superposition d'images décalées, représentée par le double trait rouge et la portion centrale jaune).

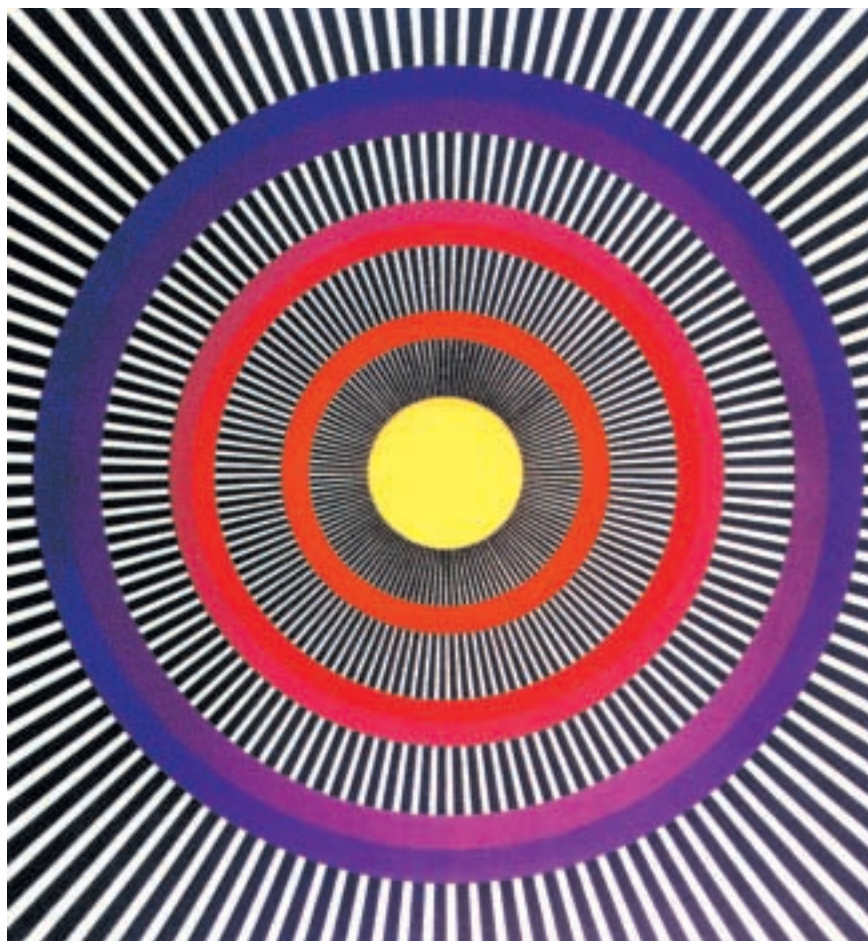


2. L'ILLUSION D'ENIGMA (à droite) est due aux rayons noirs et blancs. Sans eux, les nuées colorées qui se déplacent le long des anneaux disparaissent (ci-dessus).

Quels mécanismes sous-tendent la reconstruction du monde visuel par notre cerveau ? Un exemple célèbre d'illusion utilisée par les neurophysiologistes pour expliquer ces mécanismes est le triangle de Kanisza (voir la figure à côté du titre) où trois disques noirs découpés créent l'impression illusoire de trois disques noirs entiers recouverts d'un triangle blanc : le système visuel interprète la colinéarité parfaite des coins découpés comme le résultat de la présence d'un triangle blanc posé sur trois disques noirs. On sait qu'en dehors de l'aire visuelle primaire, de nombreux neurones du cortex visuel sont activés par les bordures illusoires créées par ces stimuli. Il s'agit notamment de certaines sous-structures dans l'aire visuelle V2.

Nous avons récemment combiné l'illusion du triangle de Kanisza et le mouvement apparent et montré par des méthodes d'imagerie cérébrale chez l'homme que l'image active l'aire visuelle V5, mais aussi, de façon surprenante, l'aire V1, que l'on pensait dédiée aux informations «brutes». Or, le mouvement apparent et les contours illusoires sont des informations complexes : les informations traitées dans V5 retournent peut-être vers V1 pour y servir de référence.

L'intérêt du tableau d'I. Leviant réside dans la force de l'illusion de mouvement circulaire dans les anneaux alors que le tableau est parfaitement statique. Quel est la source de l'impression de mouvement ? Cette question a suscité un intéressant débat entre deux spécialistes britanniques de la vision, Semir Zeki et Richard Gregory. Ce dernier soutient que l'illusion est créée par le mouvement de l'image sur la rétine, tandis que S. Zeki pense que l'illusion résulte uniquement du traitement de l'information par le cortex visuel.



Tous deux ont partiellement raison. Nous l'avons rappelé, même lorsque nous fixons intensément un objet, son image sur la rétine est en mouvement permanent, or quand on supprime ce mouvement de l'œil, par exemple, en solidarisant l'image à la rétine par des procédés optiques, toute perception visuelle disparaît. En d'autres termes, le mouvement est à la vision ce que l'oxygène est à la vie : sans mouvement, la vision n'existe pas. Ainsi, pour *Enigma* et pour les autres objets visuels, les micromouvements de l'image sur la rétine sont indispensables pour activer notre perception.

Cependant, le phénomène ne peut être purement rétinien : les micromouvements de l'œil ont une direction aléatoire ; ils n'expliquent donc pas à eux seuls que les nuées mouvantes perçues dans *Enigma* soient restreintes aux anneaux colorés et se déplacent de façon circulaire. Il s'agit sans doute d'un phénomène cortical comme le suggèrent les résultats d'imagerie de S. Zeki. On sait que les rayons noirs et blancs du tableau activent fortement les neurones du cortex visuel, en particulier ceux des aires V1 et V2. Par ailleurs, certains neurones de V2 sont sensibles aux seules extrémités, ici, celles des rayons noirs et blancs

près des anneaux de couleur. Ces neurones participent à l'extraction d'objets d'une scène observée. Cette intense activité aléatoire est vraisemblablement réorganisée au niveau des aires corticales spécialisées dans le traitement de l'information du mouvement (V5) pour donner lieu à cette impression de mouvement continu dans les anneaux colorés : ainsi, un mouvement perçu au niveau des rayons est reporté aux anneaux.

Encore une fois, le cortex visuel recréerait une impression cohérente à partir d'informations incomplètes ou incohérentes. Toutefois, ceci n'est qu'une hypothèse et la compréhension des mécanismes exacts mis en jeu pour expliquer en terme d'activité neuronale cette perception cohérente de mouvement circulaire reste un défi pour les neurophysiologistes de la vision. Il y a encore un mystère derrière *Enigma*.

Jean BULLIER, Centre de recherche Cerveau et Cognition, Toulouse

Muriel BOUCART, Marie-Anne HENAFF et Catherine BELIN, *Vision : aspects perceptifs et cognitifs*, SOLAL, 1998.

Jacques NINIO, *La science des illusions*, Odile Jacob, 1998.

