

maîtrisé, mais fait naître un désir d'achèvement actuel (on songe au théorème de complétion d'un espace topologique uniforme). L'interactivité offerte par les systèmes du type *Conte à votre façon*, en particulier, n'est pas sans évoquer les «suites de libre choix» de Brouwer, et donc une forme élégante – et constructive – d'appréhension du continu.

Les sirènes de Titan

*C'est donc vers l'air que je déploie mes ailes
confiantes
Ne craignant nul obstacle, ni de cristal ni
de verre,
Je fends les cieux et m'érige à l'infini.
Et tandis que de ce globe je m'élève vers
d'autres globes
Et pénètre au-delà par le champ éthéré,
Je laisse derrière moi ce que d'autres voient
de loin.*

Giordano Bruno
(*De l'infini, de l'univers et des Mondes*)
Le titre de cette section, comme des précédentes, est celui d'une œuvre littéraire, ici un roman de Kurt Vonnegut, où l'auteur introduit des entités spatio-temporelles qu'il nomme «chrono-synclastic infundibula», événements semblables à ces «moments de synchronisation cosmiques» décrits par Nabokov. Ce sont des moments d'exploration simultanée de l'espace et du temps, de circulation le long de cette dimension d'«échelle» à laquelle les physiciens s'intéressent aujourd'hui, mais que Victor Hugo évoquait déjà dans *Les misérables* (La maison de la rue Plumet) : «Qui donc peut calculer le trajet d'une molécule? que savons-nous si des créations de monde ne sont point déterminées par des chutes de grains de sable? qui donc connaît les flux et les reflux réciproques de l'infiniment grand et de l'infiniment petit, le retentissement des causes dans les précipices de l'être et les avalanches de la création?»

L'infini atteint ainsi la dimension d'échelle qui s'ajoute à celles de l'espace et du temps, et l'on peut imaginer que les nouvelles techniques, qui nous permettent de visualiser ces dimensions nouvelles, au service de la physique ou de la biologie, des formes littéraires et artistiques aussi bien que mathématiques de la représentation, nous offriront des accomplissements, des assouvissements inédits...

Terminons par un véritable moment de synchronisation cosmique : on sait que les *Nouvelles Impressions d'Afrique* de Raymond Roussel (1932), dont la composition et les illustrations par H.-A. Zo ont été préparées avec un soin maniaque par l'auteur, se terminent par un dessin dont la spécification (qui lui avait été transmise par une agence de détectives privés) était : «Un pan de ciel étoilé sans paysage terrestre semblant vu d'un point de l'espace sidéral donnant l'impression de l'infini.» Or le poème et ses illustrations sont suivis, dans l'édition Lemerre, par un poème : *Mon Âme*, écrit à l'âge de 17 ans, réédité sous le titre *L'Âme de Victor Hugo*, et dont voici les deux derniers quatrains (le premier suggère évidemment l'audacieuse substitution : «Victor Hugo» → «Raymond Roussel») :

*À cette explosion voisine
De mon génie universel,
Je vois le monde qui s'incline
Devant ce nom : Victor Hugo.*

*Sur la terre, que je domine,
Je vois ce feu continu
Qui, seul et sans frère, illumine
Partout l'univers actuel.*

Et c'est dans *Abîme*, le chant XLI et dernier de *La légende des siècles*, que Victor Hugo, le 26 novembre 1853, conclut en donnant la parole à notre héros :

L'INFINI
L'être multiple vit dans mon unité sombre.

Paul BRAFFORT est responsable du programme scientifique de l'ALAMO (Atelier de littérature assistée par la mathématique et les ordinateurs)

H. POINCARÉ, *Dernières pensées*, Flammarion, 1913.

P. VALÉRY, *Cahiers*, Gallimard, 1974.

T. LÉVY, *Figures de l'infini*, Éditions du Seuil, 1987.

J.L. BORGES, *Avatars de la tortue*, Œuvres complètes I, Gallimard, 1993.

P. ZELLINI, *Breve storia dell'infinito*, Adelphi, 1993.

J.-P. LUMINET, *Les poètes et l'univers* (anthologie), Le Cherche Midi, 1996.

C. GODIN, *La Totalité*, Champ Vallon, 1998.

Paul BRAFFORT, *Science et Littérature*, Diderot, diffusion Éditions du Seuil, 1998.

Les geysers

PHILIPPE COUSSOT

Dans la cheminée d'un geyser, l'eau est sous pression et à température élevée. Périodiquement, un brusque changement d'état s'amorce et aboutit à une violente éruption : la colonne d'eau surchauffée passe de l'état liquide à l'état vapeur.

Alcalay/J. Bios

La Terre a parfois les allures d'une baleine expulsant l'eau par son évent. Les geysers ne sont cependant pas le signe d'une vie interne du globe, mais l'une des manifestations les plus étranges du cycle de l'eau. À intervalles réguliers ou irréguliers, un mélange d'eau chaude et de vapeur en provenance des entrailles de la Terre est brutalement projeté à plusieurs dizaines de mètres de hauteur. D'où provient cette vapeur ? Comment ces projections sont-elles régulées ?

On dénombre quelque 50 champs de geysers dans le monde, dont les deux tiers seulement contiennent plus de cinq geysers actifs. Le parc national de Yellowstone (*ci-dessus, Geyser Castle*), aux États-Unis, en contient davantage, le plus connu étant *Old Faithful* qui, depuis 100 ans, laisse échapper toutes les 65 minutes, un jet d'eau et de vapeur de 50 mètres de hauteur. Certains geysers sont plus rapides : le *Strokkur*, en Islande, explose toutes les 10 à 15 minutes. D'autres encore sont beaucoup lents, les éruptions se produisant uniquement après plusieurs heures de repos.

Les geysers sont assez rares, car ils résultent de la conjonction de divers phénomènes, notamment d'une activité volcanique et d'une circulation d'eau à relativement faible profondeur. Un geyser évolue au rythme des modifications de la croûte terrestre, sur des centaines, voire des milliers d'années. L'activité d'un geyser change souvent quand un séisme se produit à proximité, car la structure du sous-sol, dont nous expliquerons l'importance, change. Dans les régions de volcanisme actif, les évolutions de la croûte terrestre expliquent aussi l'apparition de nouveaux geysers. Les solfatares sont des «geysers calmes», qui relarguent de la vapeur d'eau chargée de soufre.

L'eau expulsée par les geysers (d'après le mot islandais *geysir* qui signifie *jaillir*) provient essentiellement de l'eau de

pluie qui s'est infiltrée très lentement dans le sol, à travers des fractures ou des roches poreuses sur plusieurs kilomètres. La température des roches s'élève progressivement avec la profondeur : elle augmente de 30 °C par kilomètre sur les 10 premiers kilomètres. Toutefois, la température est notablement supérieure à proximité des zones d'activité volcanique, car elle est proche du magma en fusion ou en cours de solidification. L'eau qui s'infiltre dans un sous-sol poreux se réchauffe progressivement et, parfois, s'accumule. Pour qu'un geyser se forme, il faut qu'une telle réserve d'eau soit connectée à l'air libre par un réseau de conduits sous-terrains.

RETARD À L'ÉBULLITION

Pourquoi un geyser donne-t-il l'impression d'exploser ? En raison d'une sorte de réaction en chaîne qui prend naissance au sein de la masse d'eau surchauffée et sous pression. En profondeur, l'eau supporte tout le poids de la colonne d'eau située au-dessus d'elle, qui est proportionnel à la profondeur considérée. Ainsi la pression qui s'exerce sous une colonne de 10 mètres de hauteur est égale à deux fois la pression atmosphérique (une colonne d'eau de 10 mètres de hauteur équivaut à une atmosphère à laquelle s'ajoute la pression atmosphérique qui s'exerce sur le haut de la colonne). Or la température d'ébullition de l'eau augmente avec la pression. L'eau bout à 100 °C sous pression atmosphérique normale, à 120 °C lorsque la pression est égale à deux fois la pression atmosphérique, à 158 °C sous 50 mètres (6 fois la pression atmosphérique). Dans les geysers les plus profonds la température de l'eau atteint 300 °C sans qu'il n'y ait d'ébullition. Considérons maintenant une colonne d'eau progressivement



Alcalay/Jean-Jacques Bios



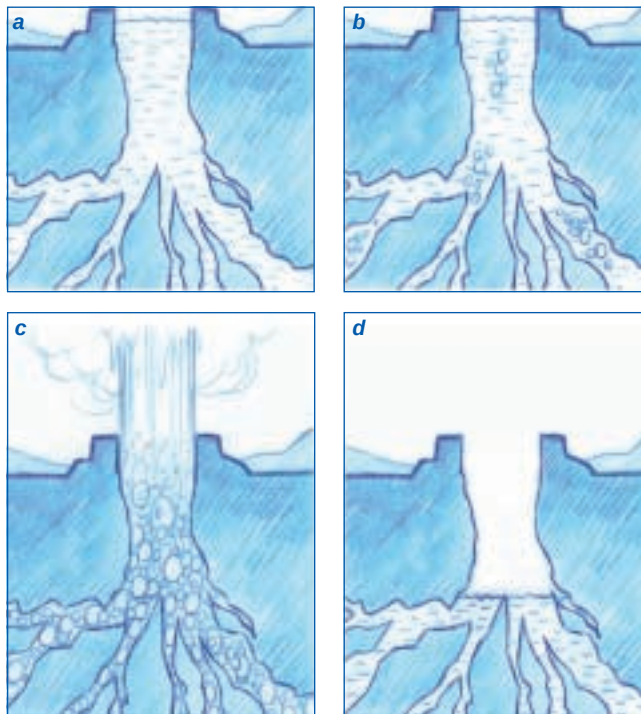
Klein/Hubert Bios

À gauche, le geyser *Strokkur*, en Islande, juste avant l'éruption et, à droite, le geyser *White Dome*, à Yellowstone, aux États-Unis.



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



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.

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-

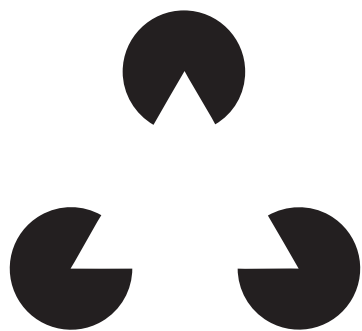
vent saturée en silice, qui précipite juste à la sortie du geyser : la température baisse brusquement et avec elle la solubilité des électrolytes dissous, et ces derniers précipitent, formant un petit dôme de silice. Dans le cas des solfatares, la vapeur d'eau qui s'échappe est enrichie en soufre provenant 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.

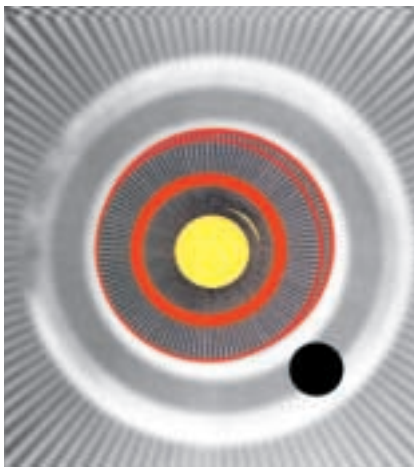
Par ailleurs, dans chaque œil, la rétine a une région aveugle, sans cellule sensible, qui correspond au point de convergence de toutes les cellules nerveuses de la rétine, et à l'origine du nerf optique.

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).