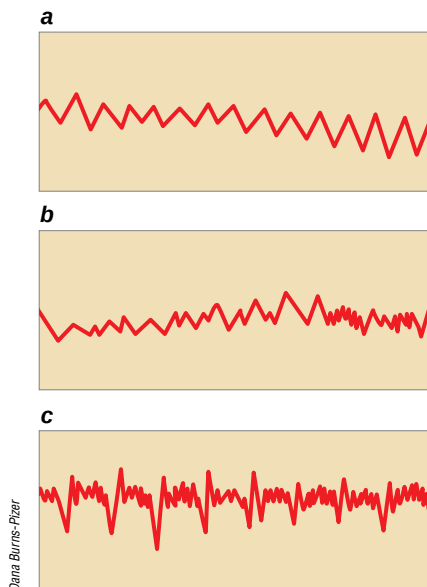




4. LE TRACÉ CARDIAQUE de la première personne ayant bénéficié d'une défibrillation montre le rythme vacillant et désorganisé caractéristique de la fibrillation ventriculaire (a et b). Le dernier tracé (c) montre le rythme plus régulier restauré par la défibrillation.

Ce nombre (quelques centaines tout au plus) reste faible parce que la défibrillation intervient trop tard. Une stratégie fondée sur l'envoi d'urgence de défibrillateurs aux patients ne peut remporter qu'un succès limité.

La solution définitive

Pourquoi cet échec? Parce que nous ignorons la cause de la fibrillation, et ne savons pas la prévoir ; comme il est impossible d'équiper de défibrillateurs tout malade potentiel, le nombre de décès diminue peu. Vingt pour cent des fibrillations ventriculaires surviennent chez des personnes n'ayant aucun antécédent cardiaque. Les facteurs déclenchants sont mal connus. Ils comprendraient l'ischémie (une oxygénation insuffisante du muscle cardiaque qui le rend irritable), des anomalies électrolytiques, des déséquilibres neurovégétatifs et des maladies héréditaires.

Les médecins connaissent mal également le mécanisme de la défibrillation. Vraisemblablement, le choc électrique dépolarise simultanément toutes les fibres musculaires du cœur, permettant à son mécanisme de temporisation interne de se resynchroniser et de revenir ainsi à la normale. Cette resynchronisation s'apparente à la réinitialisation d'un ordinateur qui s'est mystérieusement bloqué.

Même si les défibrillateurs se multiplient, la seule solution définitive du problème de fibrillation ventriculaire réside dans la prévention. Les défibrillateurs sont à l'origine d'un paradoxe que le médecin Lewis Thomas fut le premier à décrire : cet instrument que nous pensons être une prouesse technique n'est en fait qu'un balbutiement, puisque nous n'avons qu'une connaissance très rudimentaire de la maladie. En fait, le plus haut niveau de technique médicale est celui qui est le moins cher et qui va de pair avec une bonne connaissance de la maladie, comme c'est le cas pour la vaccination. Le plus bas niveau technique est très coûteux et traite les ravages qu'occasionne une maladie plutôt que de les prévenir. Nous savons miniaturiser les défibrillateurs et les implanter dans le thorax des patients, mais nous ne comprenons pas pourquoi un cœur entre en fibrillation et nous restons incapables de reconnaître les signes avant-coureurs de la fibrillation ventriculaire.

Depuis 50 ans, les progrès de la cardiologie ont été considérables, mais la fibrillation ventriculaire reste toujours la première cause de décès chez l'adulte. Je dirais que les espoirs de Beck ne se sont réalisés qu'à 50 pour cent. Lorsque l'usage à domicile des défibrillateurs sera autorisé, peut-être que l'énorme potentiel des défibrillateurs se concrétisera, mais il s'agira encore d'une fausse victoire. La vraie victoire sera remportée lorsque nous comprendrons la fibrillation ventriculaire et saurons la prévenir. Ne serait-il pas fabuleux de considérer un jour le défibrillateur comme un objet obsolète?

Mickey EISENBERG dirige le service de médecine d'urgence de l'Université de Washington.

C.S. BECK, W.H. PRITCHARD et H.S. FEIL, *Ventricular Fibrillation of Long Duration Abolished by Electric Shock*, in *Journal of the American Medical Association*, vol. 135, pp. 985-986, 1947.

J.F. PANTRIDGE et J.S. GEDDES, *A Mobile Intensive-Care Unit in the Management of Myocardial Infarction*, in *Lancet*, n° 7510, pp. 271-273, 5 août 1967.

M.S. EISENBERG, L. BERGNER, A.P. HALLSTROM et R.O. CUMMINS, *L'arrêt cardiaque*, in *Pour la Science*, juillet 1986.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSES SÛRES

DIDIER NORDON

Des cailloux dans les choses sûres



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 65 F

Code 1897

POUR LA SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 90

La gradiométrie gravitationnelle

ROBIN BELL

Un appareil de mesure mis au point pour le guidage des sous-marins permet l'établissement de cartes géologiques précises.

Comment diriger un sous-marin dans les profondeurs opaques des océans ? Les sonars, qui émettent des ultrasons et chronomètrent le retour des échos, détectent des obstacles situés à l'avant du bâtiment ou mesurent la hauteur d'eau sous la quille, mais ils risquent de révéler la présence du sous-marin aux ennemis.

Pendant la guerre froide, la Marine américaine équipa donc ses sous-marins nucléaires de systèmes de guidage plus discrets, nommés gradiomètres gravitationnels, qui détectent les infimes variations de l'attraction gravitationnelle engendrées par les récifs ou par les montagnes sous-marines. Ces appareils, dont l'existence a longtemps été tenue secrète, sont aujourd'hui utilisés par les compagnies pétrolières pour la localisation précise de gisements de pétrole et de gaz naturel.

Les géologues ont depuis longtemps tenté de mesurer les variations locales de l'intensité de la pesanteur. En 1890, le physicien hongrois Loránd Eötvös conçut le premier dispositif qui mesurait directement les variations dues à la présence d'un corps massif. Avant lui, des physiciens avaient chronométré les oscillations de pendules pour détecter les effets des marées solides dues à la Lune et au Soleil, mais la balance de torsion d'Eötvös était beaucoup plus sensible.

Cette balance est composée d'une potence métallique horizontale suspendue à un fil, aux extrémités de laquelle sont fixées deux masses. L'une des masses est sur la potence et l'autre est accrochée plus bas (voir la figure 1, à droite). Comme l'orientation du champ de gravité est légèrement dif-

férente aux points occupés par les masses, la potence tourne autour du fil, jusqu'à ce que la torsion de celui-ci contrebalance exactement la différence des forces. La mesure de l'angle d'équilibre, avec un viseur solidaire de la potence, pour cinq orientations de départ différentes permet le calcul de toutes les composantes du gradient gravitationnel (voir l'encadré page 96).

Du fond du lac aux gisements pétroliers

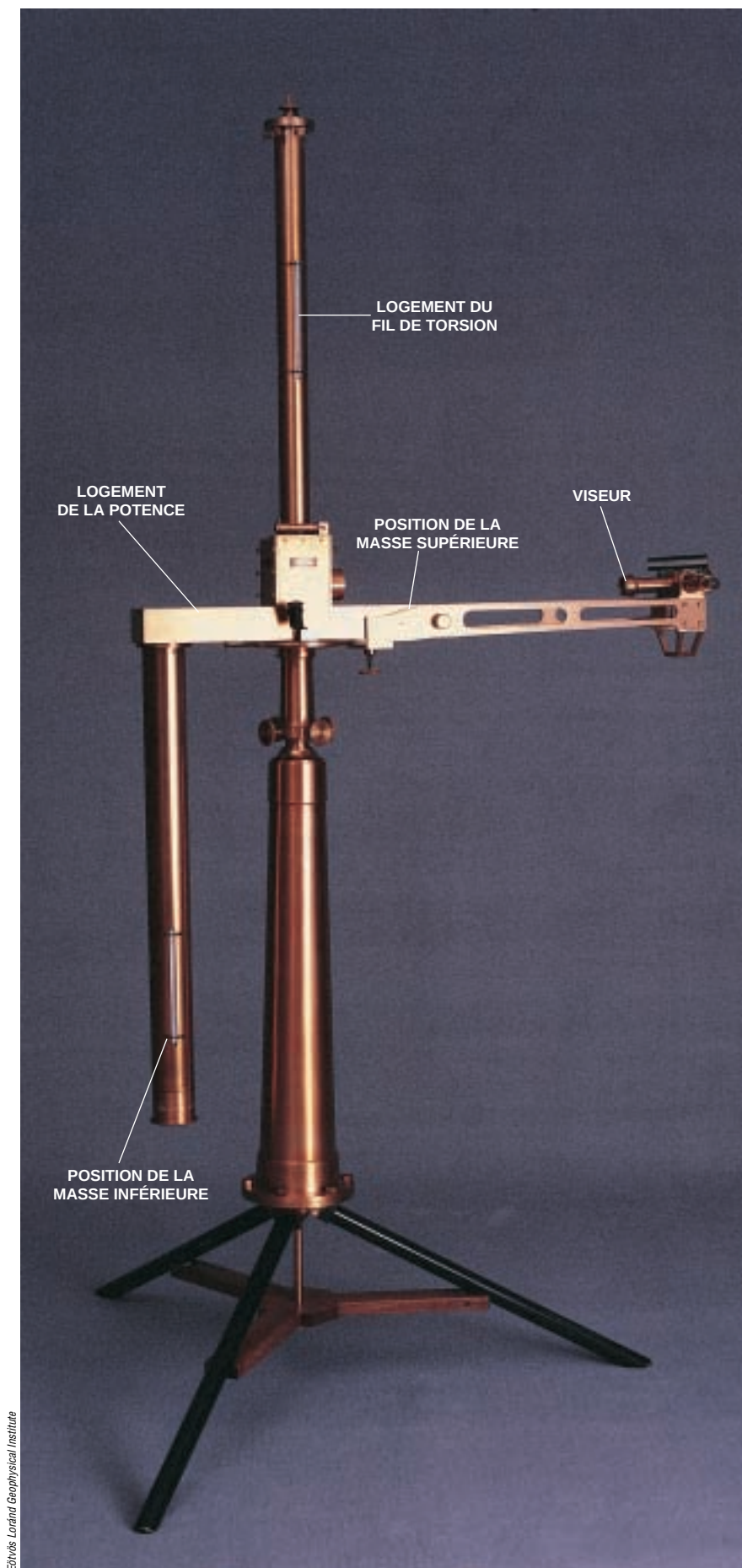
Le directeur du Bureau géologique hongrois, Hugo de Boeckh, eut l'idée d'utiliser de telles mesures pour déterminer la structure géologique du sous-sol. En 1901, Eötvös et de Boeckh testèrent cette idée sur un lac gelé. Ils dressèrent une carte du fond du lac et la comparèrent à un relevé au fil à plomb réalisé l'été précédent : le résultat était identique. Puis ils réalisèrent des relevés géologiques plus complexes, qui intéressèrent rapidement les prospecteurs pétroliers.

Ce n'est toutefois qu'après la Première Guerre mondiale que des géologues américains utilisèrent la balance d'Eötvös pour la prospection pétrolière. Ils espéraient notamment détecter ainsi une de leurs cibles favorites : les «dômes de sel». Ces structures géologiques en forme de champignon, qui atteignent parfois plus d'un kilomètre d'épaisseur, renferment souvent d'énormes gisements de gaz et de pétrole, parce qu'ils résultent de l'assèchement d'océans, au cours duquel des sédiments organiques ont été enfouis et transformés. Comment détecter ces dômes lorsqu'ils n'affleurent pas en surface ? Le sel étant moins dense que la plupart des roches, il exerce une attraction gravitationnelle inférieure : des valeurs anormalement faibles de l'intensité de la pesanteur (ou une anomalie du gradient gravitationnel au-dessus de ces gisements) indiquent la présence de telles masses de sel.

Un premier dôme de sel fut ainsi découvert, à l'aide d'une balance d'Eötvös, en 1924. De nombreuses autres découvertes s'enchaînèrent rapi-



1. LE PREMIER GRADIOMÈTRE (à gauche), une balance de torsion, a été mis au point par le physicien hongrois Loránd Eötvös, à la fin du XIX^e siècle. Pendant l'hiver 1901, Eötvös et ses collègues ont testé cet instrument en cartographiant le fond du lac Balaton, près de Budapest, à partir de sa surface gelée (ci-dessus).



Echivès Lorand Geophysical Institute

dement, et des géologues dressèrent les cartes de formations souterraines plus complexes à l'aide de gradiomètres gravitationnels. Au milieu des années 1930, la gradiométrie gravitationnelle était devenue une technique classique de la prospection pétrolière.

Toutefois, le succès du gradiomètre gravitationnel fut bref, parce que l'instrument était d'emploi compliqué : avant d'utiliser une balance de torsion, on devait niveler le terrain sur une centaine de mètres de long et dans huit directions différentes, puis, au centre de cette clairière étoilée, on devait construire un petit bâtiment qui protégeait la balance du vent ou des variations de température. Les lourdes boucles de ceintures, les lignes téléphoniques, les caves du voisinage et même la présence des expérimentateurs étaient à l'origine de nombreuses incertitudes. Les cartes de gradients gravitationnels étaient en outre difficiles à interpréter.

Au contraire, les instruments qui mesuraient directement l'intensité de la pesanteur (aussi très utilisés par les prospecteurs pétroliers dans les années 1930) étaient moins perturbés par l'environnement, et leur emploi ne nécessitait ni l'abattage d'arbres ni la construction de bâtiments. Les géologues préféraient employer des cartes où se superposaient les contours d'égale intensité de la pesanteur que des cartes gradiométriques détaillées, encombrées de traits et de flèches énigmatiques. La gradiométrie gravitationnelle tomba donc dans l'oubli.

Le renouveau

Comme la plupart de mes collègues, je ne connaissais de cette technique que ces quelques éléments historiques, rapportés par les manuels de géologie. En revanche, j'utilisais la gravimétrie pour mes travaux : à l'aide d'un gravimètre électronique perfectionné que j'avais installé à bord d'un avion, j'explorais la géologie du socle rocheux de l'Antarctique Ouest.

Il y a quatre ans, mon collègue Roger Anderson me demanda si, avec mon gravimètre, je pourrais survoler la zone qu'il étudiait, dans le golfe du Mexique, afin de comparer mes mesures avec celles recueillies par un navire. Il souhaitait analyser les variations de l'intensité de la pesanteur en fonction de l'altitude, c'est-à-dire faire de la gradiométrie gravitationnelle ! Il recherchait des dépôts de sel dans

le golfe du Mexique, parce que ces dépôts amortissent les ondes sismiques avec lesquelles des prospecteurs pétroliers explorent le sous-sol (les techniques sismiques standards qui reposent sur l'émission et la réflexion d'ondes sonores).

Je savais que des mesures gravimétriques par avion seraient difficiles parce que, même dans de bonnes conditions de vol, l'altitude de vol varie, de sorte que les mesures seraient entachées d'une grande incertitude. Le gradiomètre gravitationnel utilisé dans les sous-marins militaires, dont j'avais appris l'existence par le fabricant de mon gravimètre, résoudrait-il le problème? Pour obtenir le gradient gravitationnel complet, les militaires utilisent cet instrument équipé de six paires de capteurs gravitationnels. Dans chaque paire, les capteurs sont placés de part et d'autre d'un axe

autour duquel l'ensemble tourne. La différence des forces exercées sur les deux capteurs pour différentes positions permet de calculer les composantes du gradient gravitationnel.

La Société *Bell Aerospace*, qui avait fabriqué les gradiomètres pour les sous-marins, n'avait plus de commandes régulières des militaires et recherchait d'autres utilisations. Des ingénieurs avaient imaginé de mesurer la charge de camions en train de rouler, mais cette idée n'avait guère rencontré de succès commercial. Nous avons donc rapidement convaincu les responsables de cette société, la Marine américaine et plusieurs compagnies pétrolières de nous aider à tester le gradiomètre gravitationnel pour la prospection pétrolière dans le golfe du Mexique.

Nous avons testé les instruments dans une zone située à environ 130 kilo-

mètres au Sud-Est de la Nouvelle-Orléans, qui contient une gigantesque masse de sel en forme de botte. Des géologues de la Société *Texaco* nous ont fourni des cartes géologiques qu'ils avaient dressées à partir de relevés sismiques. La Marine a accepté de mesurer des gradients gravitationnels au-dessus de cette zone à l'aide d'un gradiomètre installé à bord d'un de ses navires de recherche.

Comme le gradiomètre était encore un matériel militaire classé secret, nous n'avons pas participé à la mise au point des protocoles expérimentaux ni à l'interprétation des données brutes. Nous nous sommes consacrés à la mise au point de méthodes pour tracer des cartes géologiques à partir des valeurs des gradients gravitationnels : nous avons retrouvé les difficultés qui avaient découragé nos prédécesseurs des années 1930, avec l'heureuse différence que nous disposions d'ordinateurs.

Une meilleure précision

Nos premiers résultats montrèrent que les gradients gravitationnels mesurés par le navire militaire ressemblaient à ceux que nous avions déduits des cartes géologiques. Toutefois, une analyse plus détaillée des gradients révéla la présence d'une masse plus importante que ne le suggérait le relevé sismique. La gradiométrie précisa même sa position, ainsi que ses contours, qui ressemblaient à ceux d'un chapeau.

Comment tester notre hypothèse? Un forage dans le golfe du Mexique, à travers les couches de sel, aurait coûté des dizaines de millions de francs. Nous avons alors demandé aux géophysiciens de la Société *Texaco* de nous communiquer leurs analyses les plus récentes de la géologie de la zone. Sans que nous ayons mentionné nos résultats, ils découvrirent, à l'aide d'un nouveau relevé sismique, une structure géologique, auparavant restée inaperçue, qui ressemblait à un chapeau, et qui était située à l'endroit même où nous l'avions repérée. Cette découverte démontrait que la mesure des gradients gravitationnels était aussi précise que le plus détaillé des relevés sismiques pour la détection des masses salifères. Elle renforça considérablement l'intérêt des prospecteurs pétroliers pour les gradiomètres militaires.

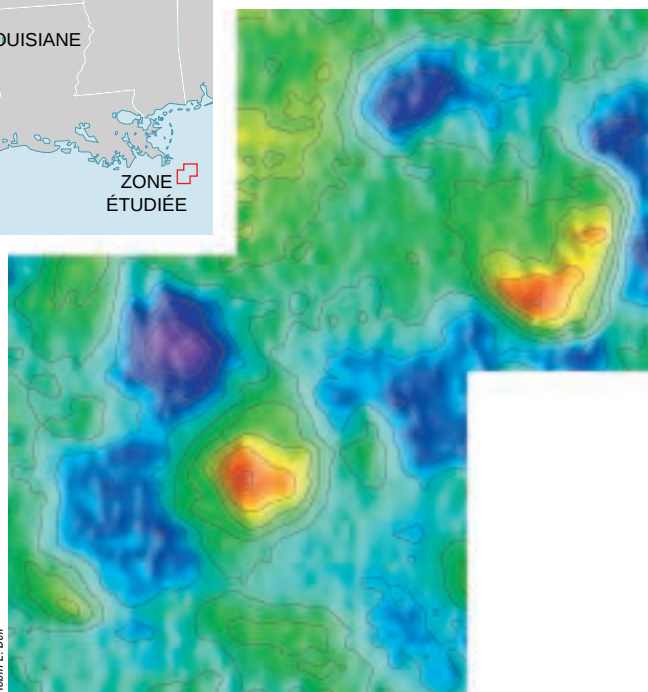
Le gouvernement américain a aujourd'hui levé le secret sur les gra-



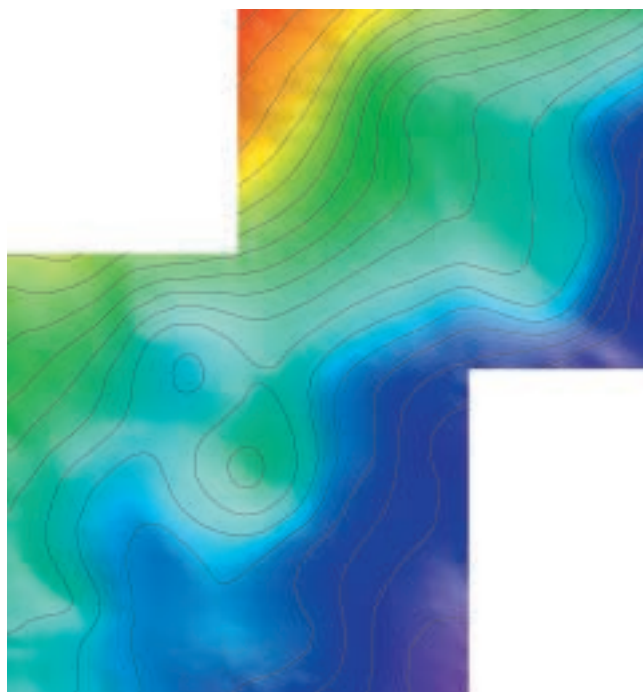
2. UNE ÉTUDE GÉOPHYSIQUE réalisée en 1917 près de Hanovre, à l'aide d'une balance de torsion, prouva que l'on pouvait repérer des dépôts de sel souterrains grâce à la gradiométrie gravitationnelle. Ces formations salifères, moins denses que les roches environnantes, indiquent généralement que des gisements de gaz et de pétrole (zones hachurées) sont situés à proximité.



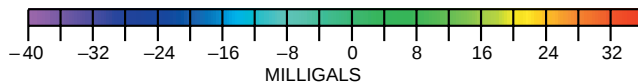
Robin E. Bell



COMPOSANTE G_{zz} DU GRADIENT



ANOMALIE LOCALE DE LA GRAVITÉ



3. LES CARTES GRAVITATIONNELLES permettent aux prospecteurs de détecter des gisements de gaz et de pétrole. Par exemple, les mesures de la composante G_{zz} du gradient gravitationnel (qui indique la variation de l'intensité de la pesanteur suivant la verticale) au-dessus d'une zone du golfe du Mexique ont fourni une description détaillée des formations salifères sous-jacentes

(à gauche, un eötvös vaut 10^{-9} par seconde au carré). En revanche, les mesures directes des anomalies locales dans l'intensité de la pesanteur, obtenues sur cette même zone, n'ont donné qu'une image grossière de la masse de sel (à droite, un milligal vaut 10^{-5} mètre par seconde au carré). Ce relevé a été réalisé en 1995 au large du delta du Mississippi (en haut à gauche).

Mark Rankin, Arms Communications



4. UN GRADIOMÈTRE MODERNE (à droite), analogue à ceux embarqués à bord de sous-marins militaires américains (ci-dessus), comprend six paires d'accéléromètres. Pour chaque paire, on mesure la différence des forces exercées par la gravité. Une grande précision est obtenue par la rotation des paires de capteurs autour d'un axe, qui permet la réalisation des mesures dans plusieurs directions.



Lockheed Martin Federal Systems

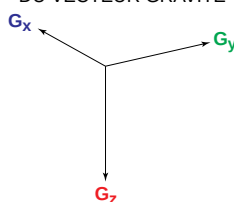
La mesure du champ gravitationnel local

Pour identifier les masses du sous-sol terrestre, les géologues mesurent, non pas l'intensité de la pesanteur, mais son gradient (ses variations). À la différence du champ de gravitation (G), représenté mathématiquement par trois nombres (ses composantes dans les directions x , y et z), le gradient gravitationnel est décrit par neuf composantes (à droite).

L'élément G_{xy} , par exemple, mesure la variation de la composante G_x (la valeur du champ dans la direction x) lorsqu'on se déplace dans la direction y ; l'élément G_{yz} correspond à la variation de la composante G_y (la valeur du champ dans la direction y) lorsqu'on se déplace dans la direction z , et ainsi de suite. La somme de G_{xx} , G_{yy} et G_{zz} étant nulle, et les éléments symétriques étant identiques (par exemple, G_{xy} est égal à G_{yx}), cinq mesures seulement suffisent pour déterminer complètement la matrice.

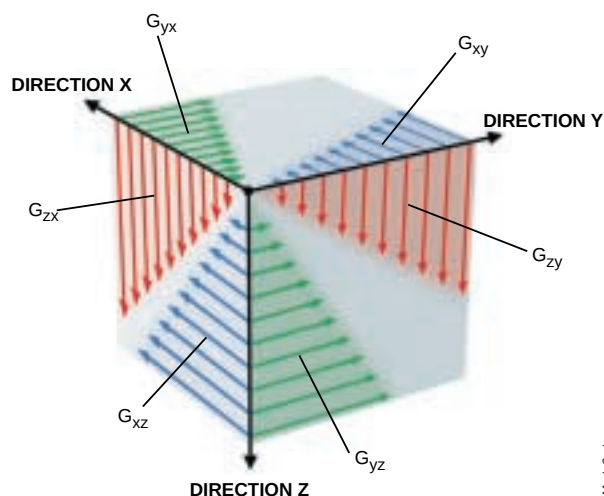
La cartographie réalisée à partir des gradients gravitationnels est un progrès par rapport aux relevés de l'intensité de la pesanteur, car elle donne une image plus détaillée du sous-sol. Par exemple, lorsqu'un avion survole une montagne (un excès de masse) ou une masse salifère souterraine de faible densité (un défaut de masse), un gravimètre embarqué perçoit à peine les variations de l'intensité de la pesanteur. En revanche, les mesures correspondantes du gradient gravitationnel révèlent immédiatement une variation de masse (ci-dessous). De surcroît, les secousses subies par l'avion engendrent une forte incertitude sur le profil gravitationnel, tandis que la différence des valeurs fournies par deux capteurs mesurant le gradient gravitationnel élimine cette incertitude.

TROIS COMPOSANTES
DU VECTEUR GRAVITÉ

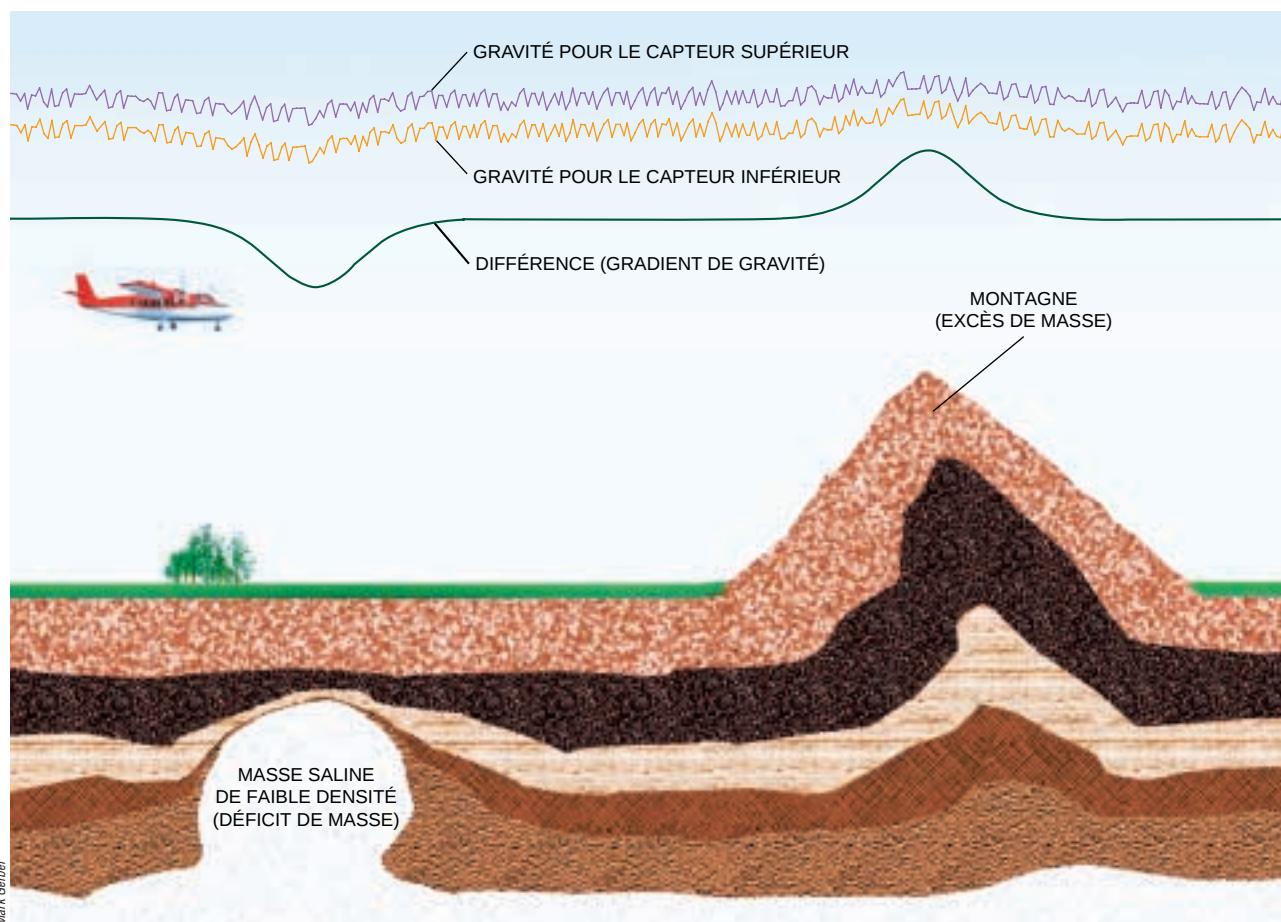


NEUF COMPOSANTES
DU GRADIENT DE GRAVITATION

$$\begin{bmatrix} G_{xx} & G_{yx} & G_{zx} \\ G_{xy} & G_{yy} & G_{zy} \\ G_{xz} & G_{yz} & G_{zz} \end{bmatrix}$$



Mark Garber



Mark Garber

diomètres gravimétriques, que les compagnies pétrolières peuvent désormais utiliser. Sept d'entre elles l'ont déjà fait pour prospecter le golfe du Mexique. Ainsi, après avoir dressé la carte des gradients gravitationnels autour d'un dôme de sel, un géologue de la Société *Shell* a déterminé les structures géologiques sous-jacentes : la base du dôme est très nette sur cette nouvelle carte, alors qu'elle restait floue avec les relevés sismiques.

L'industrie minière s'intéresse aussi aux gradiomètres gravitationnels, pour la recherche de petits gisements enfouis dans des terrains inaccessibles ou pour la détermination de structures géologiques complexes. Pour ce type de prospection, on doit embarquer le gradiomètre à bord d'un avion. Nous avons vu que les irrégularités du vol interdisent des relevés précis avec des gravimètres, mais les gradiomètres gravitationnels permettront de tourner cette difficulté : les accélérations engendrées par la turbulence de l'air sont de même nature que l'attraction gravitationnelle, mais elles n'engendrent pas de gradients gravitationnels. Des ingénieurs australiens ont déjà mis au point une version supraconductrice de la balance d'Eötvös, que l'on peut embarquer à bord d'un avion. La Société *Bell Geospace*, à la fondation de laquelle R. Anderson et moi-même avons participé en 1994, tente d'adapter aux avions le gradiomètre conçu pour les sous-marins.

La gradiométrie gravitationnelle commence à séduire les géologues, comme elle a séduit autrefois les commandants de sous-marins. En outre, au contraire des méthodes actuelles de mesure, qui causent des dégâts environnementaux lorsque les équipes de prospection sillonnent en tous sens une région avec leurs camions et leurs bulldozers, cette technique, mise en œuvre d'un avion, ne nuit pas à l'environnement.

Robin BELL est chercheur à l'Observatoire de la Terre Lamont-Doherty de l'Université Columbia.

Robin E. BELL, Roger N. ANDERSON et Lincoln F. PRATSON, *Gravity Gradiometry Resurfaces*, in *Leading Edge* (Society of Exploration Geophysicists), vol. 16, n° 1, pp. 55-60, janvier 1997.

Robin E. BELL et R.O. HANSEN, *The Rise and Fall of Early Oil Field Technology : The Torsion Balance Gradiometer*, in *Leading Edge*, vol. 17, n° 1, pp. 81-83, janvier 1998.



La conjecture du soufflet

IAN STEWART

Grâce à une formule qui donne le volume d'un polyèdre, on montre que les polyèdres flexibles ne changent pas de volume en se déformant.

Tout bricoleur qui a déjà assemblé quatre planches pour construire une bibliothèque sait que les rectangles ne sont pas rigides. En appuyant sur le bord d'une bibliothèque mal construite, on la déforme en un parallélogramme. En revanche, les triangles sont rigides : on ne peut changer leur forme sans modifier la longueur d'au moins un de leurs côtés. Le triangle est d'ailleurs le seul polygone rigide. Une bibliothèque de n'importe quelle autre forme – rectangle, pentagone, hexagone – doit être consolidée par ajout de traverses diagonales : le polygone initial est alors divisé en triangles rigides.

On peut aussi renforcer une bibliothèque en clouant un fond plat. Le problème entre ainsi dans la troisième dimension, où les choses deviennent bien plus intéressantes. Pendant près de 200 ans, les mathématiciens ont été étonnés par la rigidité des polyèdres, des solides fermés qui comportent un nombre fini de faces polygonales.

Encore récemment, on pensait que tous les polyèdres à faces triangulaires étaient rigides. Cette hypothèse était fautive : il existe des polyèdres flexibles dont la forme change sans que la forme des faces triangulaires soit modifiée. De surcroît, il y a quelques mois, des mathématiciens ont démontré la conjecture du soufflet, selon laquelle le volume d'un polyèdre flexible reste constante lorsque sa forme varie. Cette démonstration, fondée sur une ancienne formule grecque, ouvre un nouveau champ de recherche en géométrie.

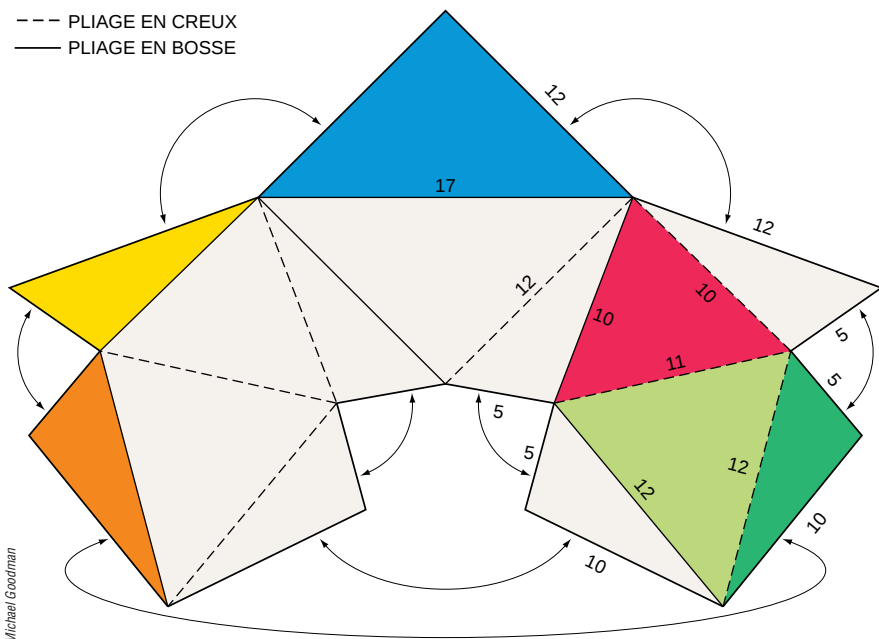
Par pliage d'une feuille de papier, on obtient une foule de formes flexibles, étudiées par les maîtres japonais de l'*origami* : des oiseaux qui battent des ailes, des grenouilles dont les pattes bougent, etc. Ces pliages sont-ils des exemples de polyèdres flexibles ? Non, car lorsque la grenouille en papier bouge ses pattes, le papier s'incurve légèrement. De même, on plie ou l'on déplie le soufflet d'un accordéon parce que les

faces qui le composent se courbent et s'étirent légèrement. En revanche, les faces d'un polyèdre flexible ne se déforment pas. Lorsqu'un polyèdre flexible se déforme, seuls les angles entre les faces adjacentes varient : les arêtes sont comme des charnières, tout le reste demeure parfaitement rigide.

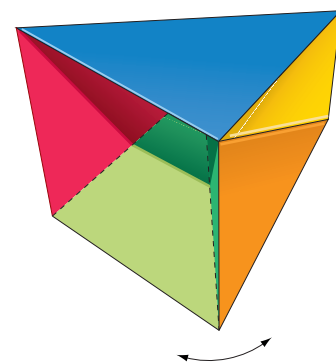
L'étude des polyèdres flexibles commence en 1813, lorsque le mathématicien français Augustin-Louis Cauchy montre qu'un polyèdre convexe – c'est-à-dire dont la courbure est toujours dans le même sens, sans creux, ni bosses – n'est pas flexible. Qu'en est-il des polyèdres non convexes ? En 1897, l'ingénieur français Raoul Bricard découvre que les polyèdres non convexes sont flexibles si leurs faces peuvent s'interpénétrer. Les polyèdres de Bricard sont des objets abstraits, mais on peut s'en faire une idée à l'aide de tiges articulées avec lesquelles on matérialise leurs arêtes (par exemple, avec des pailles que l'on relie par une ficelle).

En 1977, le mathématicien canadien Robert Connelly modifie le polyèdre non convexe de Bricard de sorte qu'il

--- PLIAGE EN CREUX
— PLIAGE EN BOSSE



Michael Goodman



Patron d'un polyèdre flexible (à gauche). Si vous le reproduisez sur une feuille de carton fin et si vous pliez comme indiqué par les pointillés, en collant des arêtes selon les flèches (une petite languette qui dépasse des arêtes vous aidera), vous obtiendrez un polyèdre flexible, dont les mouvements sont indiqués sur la perspective (ci-dessus).