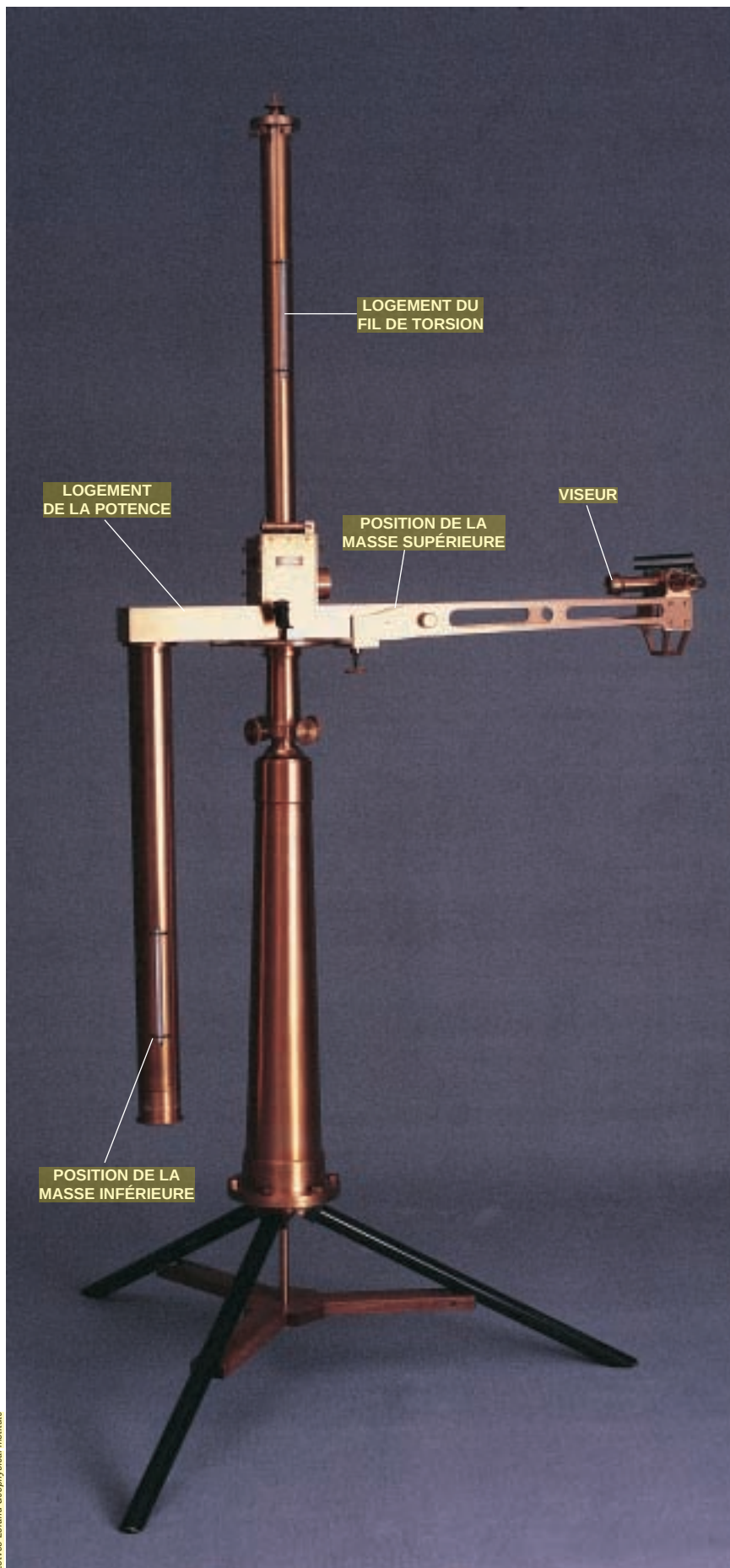




Echivès Lorand Geophysical Institute

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

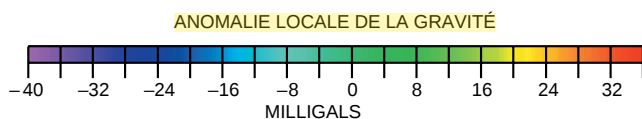
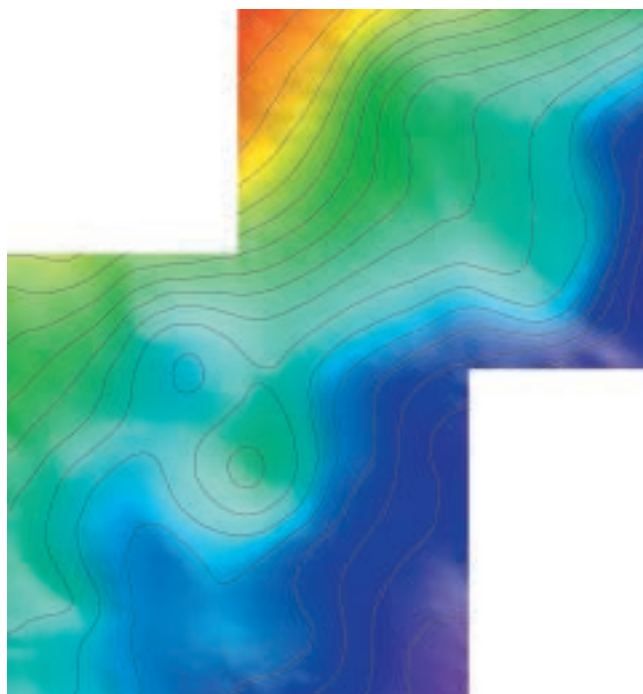
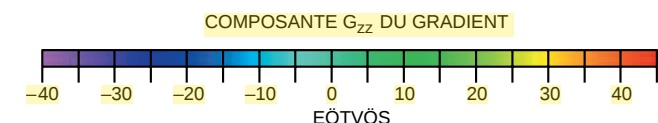
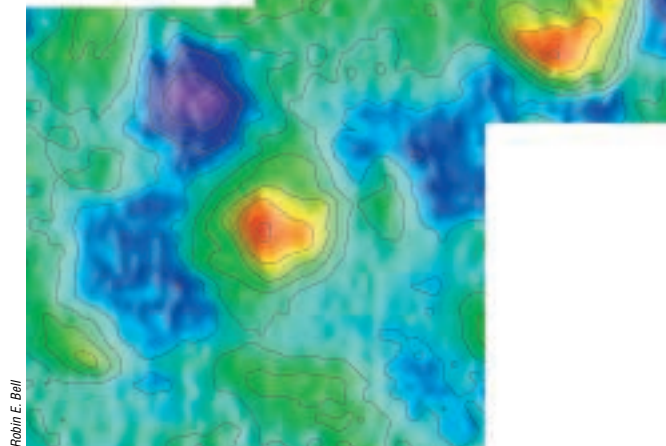
Nos premiers résultats montrèrent que les gradients gravitationnels mesurés par le navire militaire ressemblaient à ceux que nous avions déduits des cartes géologiques. Toutefois, une analyse plus détaillée des gradients révéla la présence d'une masse plus importante que ne le suggérait le relevé sismique. 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.



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).



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.

