

solution pour maintenir *Hubble* en état de fonctionnement. Il est vrai que le développement d'un robot est au moins aussi onéreux qu'une mission humaine. De plus, un robot peut présenter de graves inconvénients, car contrairement à un astronaute, il ne peut engager une intervention imprévue. La communauté scientifique internationale s'inquiète, et l'Académie des sciences américaine vient de recommander l'arrêt de la mission robotisée, privilégiant une mission humaine.

La NASA ne se trouve-t-elle pas d'ailleurs en pleine contradiction, alors que le président américain lui impose de s'engager dans l'exploration humaine de la Lune et de Mars ? L'envoi d'astronautes à des mois de distance de la Terre semble bien plus dangereux qu'une mission vers *Hubble*, plus proche de nous que ne l'est Marseille de Paris. Et si l'on peut confier à des robots les réparations « chirurgicales » de *Hubble*, quelle logique sous-tend l'envoi d'hommes pour explorer l'espace ?

L'Europe, de son côté, a déjà largement profité de la mission. La contribution financière de l'ESA était fixée à 15 pour cent du coût initial de *Hubble*, en échange d'une proportion égale du temps d'observation attribuée à la communauté scientifique européenne. Le coût de *Hubble* a depuis largement dépassé les budgets initiaux, atteignant plus de six milliards de dollars. Pour autant, l'ESA n'a pas dépensé plus de 10 pour cent de cette somme tout en conservant ses 15 pour cent de temps d'observation, ce qui rend ses éventuelles revendications peu légitimes. Certes, maintenir *Hubble* en fonctionnement, que ce soit à l'aide de robots ou d'astronautes, a un prix. Malheureusement, afin de ne pas drainer les crédits qu'il veut attribuer à son initiative d'exploration, le président Bush n'a attribué à la NASA que 93 millions de dollars pour cette opération, qui coûterait au moins dix fois plus selon les estimations officielles. Il faudra donc faire des choix.

Pour le moment, la NASA privilégie la station spatiale internationale (ISS), un autre projet international d'envergure menacé par l'arrêt des vols de la navette spatiale, et *Hubble* est considéré comme moins prioritaire. Qui plus est, certains astronomes, qui ne bénéficient pas directement des résultats de *Hubble*, s'opposent à toute mission de réparation financée aux dépens d'autres missions. C'est en particulier le cas du projet d'observation en rayons X *Constellation-X*, alors que ce type d'observation est pourtant assuré par les satellites XMM-Newton de l'ESA, et *Chandra* de la NASA.

Maintenir *Hubble* en fonctionnement jusqu'à la mise en service du JWST me semble pourtant être une priorité. L'ESA possède des missions d'observations en rayons X (XMM-Newton et XEUS), gamma (INTEGRAL) et infrarouges (*Herschell*), qui peuvent combler les besoins des astronomes du monde entier dans ces domaines pour les cinq à six années à venir. Le sursis de *Hubble* devrait logiquement être décidé par l'ensemble de la communauté scientifique internationale et par les agences spatiales impliquées en fonction de ces possibilités d'observations. La NASA réorganisera-t-elle sa planification et trouvera-t-elle les économies nécessaires pour donner vie encore quelques années à la plus populaire de ses missions ? Procéder différemment laisserait une page sombre dans l'histoire plutôt brillante de l'Agence américaine.

Roger-Maurice BONNET dirige l'Institut international des sciences spatiales, à Berne.

PRIX «GAGNA A. & Ch. VAN HECK» - 2006

PRIX «GAGNA A. & Ch. VAN HECK» - 2006

Domaine d'application :

Le Prix «Gagna A. & Ch. Van Heck» est destiné à récompenser un chercheur ou médecin dont les travaux auront contribué à la guérison d'un mal encore incurable à ce jour, ou d'une manière réelle et spectaculaire à la recherche d'une telle découverte.

Montant du Prix :
Le Prix s'élèvera à
75.000 euros

Candidatures :

Ce Prix triennal et international, décerné pour la deuxième fois en 2006, est réservé aux travaux présentés par un ou deux chercheurs.

Les candidatures doivent parvenir à la Secrétaire générale du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à BE - 1000 Bruxelles (Belgique) **pour le 3 octobre 2005**. La personnalité qui introduit la candidature doit joindre à celle-ci un mémoire rédigé en anglais sur les mérites du (des) candidat(s).

Règlement :

Le règlement complet est à votre disposition au secrétariat du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à BE - 1000 Bruxelles, Tél. : 32 (0)2.504.92.11, Tél. Prix : 32 (0)2.504.92.40, fax : 32 (0)2.504.92.92, e-mail : mairese@fnrs.be, site web : www.fnrs.be

Les intégrateurs mécaniques

Au XIX^e siècle, les ingénieurs effectuaient des calculs graphiquement, à l'aide de remarquables instruments de précision – que les ordinateurs ont supplantés il y a 50 ans à peine.

En 1675, à Londres, le cartographe écossais John Ogilby publie un recueil de cartes routières d'une précision inédite. L'atlas d'une centaine de pages, intitulé *Britannia*, offre une représentation étonnamment correcte des routes reliant les principales villes d'Angleterre et du pays de Galles.

C'est le fruit de deux ans passés par le cartographe et ses nombreux assistants à arpenter les chemins anglais en mesurant les distances à l'aide d'une simple roue en bois cerclée de fer munie d'un compteur de tours. Ogilby n'était sans doute pas le premier à exploiter cette idée, sur laquelle reposent encore aujourd'hui les compteurs kilométriques des voitures. On raconte qu'en 1668, l'abbé Jean Picard avait évalué la distance entre Paris et Amiens en comptant les tours de roue d'une charrette.

Peu importe la paternité de la méthode : de la roue d'arpenteur est née une famille d'instruments de calcul des longueurs et des surfaces, puis de résolution d'équations différentielles. Ces instruments, nommés intégrateurs mécaniques, ont connu leur heure de gloire à la fin du XIX^e siècle, et l'usage en a perduré jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, avant que les ordinateurs ne les supplantent. Retraçons-en l'histoire.

Mesurer la longueur d'une ligne droite est aisé : il suffit de reporter autant de fois que

nécessaire un mètre ou tout autre étalon de longueur sur la ligne. Un mètre ne peut cependant pas épouser parfaitement les sinuosités d'une ligne courbe. Pour mesurer la longueur des courbes sur le terrain, sur un plan ou sur une carte, les géomètres, les topographes ou les cartographes utilisaient dès le XVII^e siècle la roue d'arpenteur, ou curvimètre.

Ce système généralise l'observation évidente que lorsqu'on enroule un fil autour d'un cercle, sa longueur est égale à celle de l'arc de cercle correspondant. En suivant une courbe avec une roue constamment maintenue tangente à la courbe et sans glisser, on fait correspondre à tout instant les petits déplacements de la roue aux petits arcs de la courbe. L'angle de rotation total de la roue transcrit alors le cumul des longueurs des portions de la courbe. Le rayon de la roue n'intervenant que comme une constante multiplicative, le nombre de tours de roue effectués au terme du déplacement le long de la courbe donne sa longueur.

L'idée d'intégration se cache derrière cette méthode. Si l'on voit la courbe comme une suite d'arcs infiniment petits assimilables à de minuscules segments de droite, on obtient la longueur de la courbe en sommant les longueurs de ces segments infinitésimaux. Aux erreurs inhérentes à toute mesure physique près, la roue d'arpenteur est ainsi un instrument d'intégration exact, par comparaison avec une méthode approchée, telle celle qui consiste à planter des clous le long d'une courbe et à mesurer la longueur d'un fil tendu entre eux.

Découper les talus en tranches

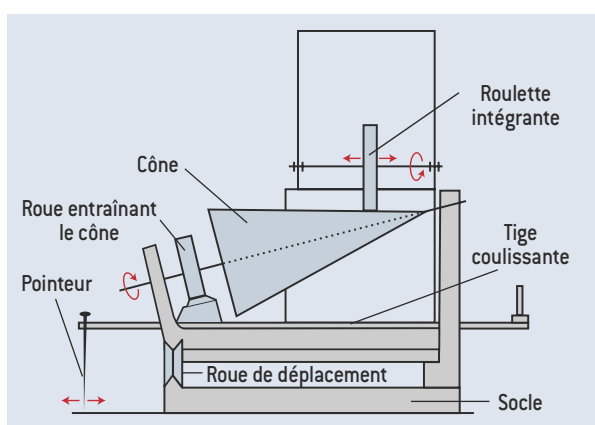
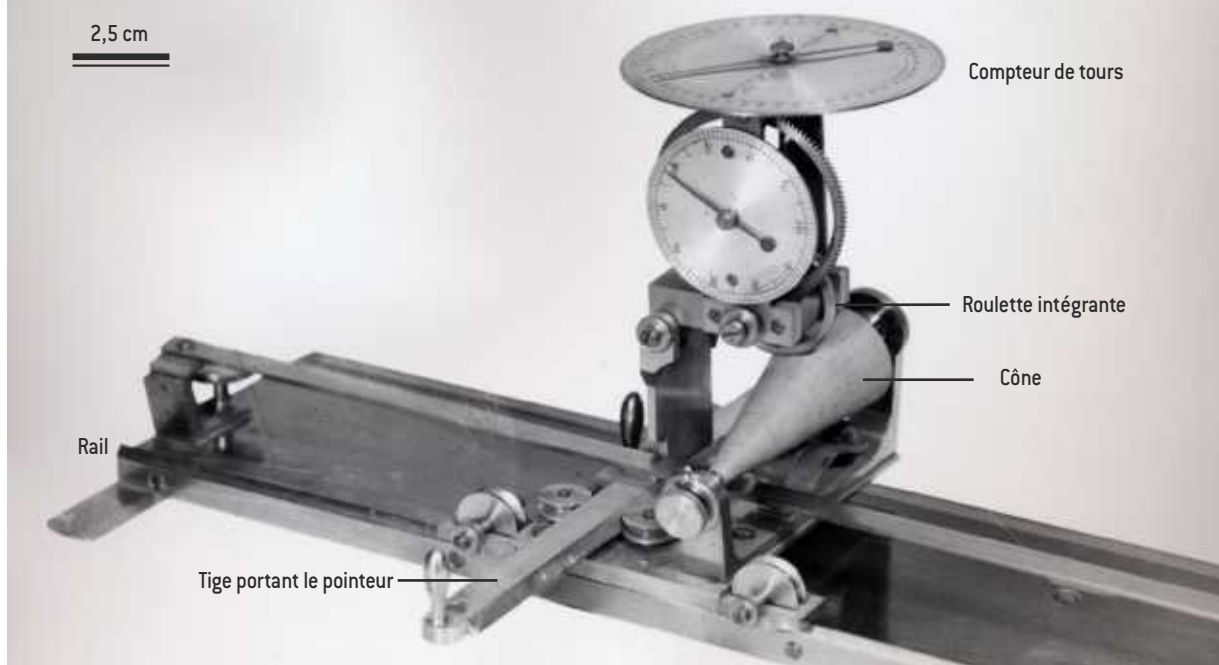
Les roues d'arpenteur ont fleuri au XVIII^e siècle en Angleterre, sous le nom de *waywiser*, puis aux États-Unis, mais elles ont tardé à se répandre sur le continent européen. La mesure des longueurs n'est cependant pas le seul problème qu'ont dû affronter les ingénieurs. Les partages entre héritiers ou les calculs de l'impôt foncier ont depuis toujours nécessité l'évaluation de la superficie de terrains de forme complexe.

C'est toutefois dans la première moitié du XIX^e siècle que le calcul des surfaces prend une importance cruciale. Les

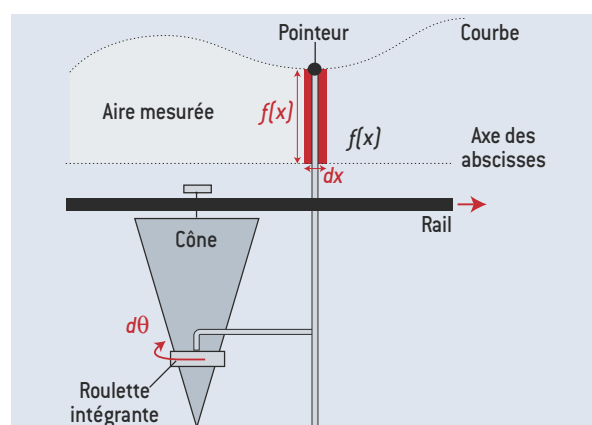
Smithsonian National Museum of American History



1. La roue d'arpenteur (ci-dessus, un modèle londonien du XVIII^e siècle) a longtemps servi à mesurer des distances : le nombre de tours de roue était enregistré par le compteur.



2. Le planimètre à cône d'Hermann (en haut, un exemplaire construit par l'atelier Ernst à Paris vers 1840, de 60 centimètres de longueur) permet de déterminer graphiquement l'aire comprise sous une courbe. L'opérateur déplace le dispositif le long d'un rail selon l'axe des abscisses tout en suivant la courbe avec un pointeur. Ce pointeur est relié par une tige à une roulette qui appuie sur un cône. Le cône, entraîné par le déplacement du dispositif, tourne autour de son axe à vitesse constante (à gauche, vue en coupe). La roulette, solidaire du pointeur, se décale le long du cône (flèches rouges) lorsque le pointeur monte ou descend



en suivant la courbe. Comme la vitesse de rotation à la surface du cône est plus rapide vers la base que vers le sommet, la vitesse de rotation de la roulette est ainsi d'autant plus grande que la hauteur $f(x)$ sous la courbe est grande (à droite, vue de dessus). La rotation instantanée de la roulette $d\theta$ est ainsi à tout instant proportionnelle à l'aire d'une bande infiniment mince sous la courbe $f(x) dx$. Son angle de rotation total θ au terme du déplacement du planimètre est ainsi proportionnel à l'aire A comprise sous la courbe entre l'abscisse de départ et celle d'arrivée ($\theta = \int d\theta = \int k f(x) dx = kA$), la constante k étant fixée par les dimensions de l'appareil.

ingénieurs du génie civil rencontrent quotidiennement ce problème en raison du développement rapide des voies de communication en Europe – routes, voies ferrées, canaux. La construction d'une voie de circulation nécessite en particulier de déblayer la terre dans les zones où le niveau du sol est trop élevé et de la transporter là où le niveau est trop bas. Il convient d'évaluer au mieux ces déblais et remblais afin de minimiser les transports de matériaux, onéreux en termes de main-d'œuvre. Avant le commencement des travaux, à partir des relevés topographiques du terrain, les ingénieurs découpent sur le plan qu'ils ont dressé le sol en tranches verticales perpendiculaires au tracé de la voie, et évaluent graphiquement les surfaces concernées, et, de là, les volumes à déplacer.

Ce procédé entraîne le calcul fastidieux d'un grand nombre de surfaces, de sorte que les ingénieurs du XIX^e siècle sont très motivés pour améliorer et mécaniser les anciennes méthodes de calcul des aires. C'est à cette époque qu'apparaissent progressivement les planimètres, des instruments

qui permettent de mesurer de manière exacte l'aire d'une surface délimitée par une courbe fermée dessinée sur un plan ou un relevé topographique. Comme pour la roue d'arpenteur, le principe repose sur l'intégration. Pour mesurer l'aire comprise sous une courbe, on la découpe en minces bandes parallèles, que l'on assimile à des rectangles. L'aire cherchée est alors approchée par la somme des aires de ces rectangles élémentaires. En prenant, en théorie, des bandes de largeur infiniment petite et en faisant une sommation infinie, on obtient l'aire exacte.

En 1814, l'ingénieur bavarois Johann Martin Hermann, employé au Bureau du cadastre et des impôts de Munich, trouve le moyen de traduire mécaniquement cette sommation en adaptant le principe de la roue d'arpenteur. L'idée est de rendre la vitesse de rotation de la roulette proportionnelle à l'ordonnée de la courbe à chaque instant, de sorte qu'un déplacement infinitésimal du dispositif entraîne une rotation de la roue proportionnelle à l'aire de la bande

infinitésimale située sous la courbe. Au terme du déplacement de l'appareil, l'angle de rotation total de la roue est ainsi égal à la somme des aires des bandes infinitésimales, c'est-à-dire à l'aire sous la courbe. Pour ce faire, Hermann introduit une pièce conique intermédiaire entre la feuille et la roulette, cône qui tourne à vitesse angulaire constante au contact du plan (voir la figure 2).

Les supérieurs d'Hermann ont accueilli d'un œil bienveillant l'idée de fabriquer un tel instrument, mais le projet n'a jamais abouti en raison des problèmes de santé de son concepteur. Après l'oubli de la trouvaille d'Hermann, le principe de la roulette intégrante tournant sur un cône a été redécouvert deux fois indépendamment, vers 1824 par le mathématicien italien Tito Gonella, professeur à Florence, puis en 1849, par l'ingénieur suisse Kaspar Wetli.

Au passage, Gonella et Wetli remarquent que l'angle au sommet du cône ne joue aucun rôle dans le processus de sommation continue, hormis celui d'une constante multiplicative, et que l'on peut en fixer arbitrairement la valeur. En prenant un angle limite de 180 degrés, Gonella et Wetli remplacent le cône par un disque, ce qui facilite notablement la réalisation de l'appareil (voir la figure 3). Le déplacement de la roulette d'une moitié du disque à l'autre, où le sens de rotation est inversé, permet en outre de comptabiliser les aires négativement, et ainsi de mesurer l'aire d'une figure fermée même si celle-ci coupe l'axe des abscisses.

Les planimètres à cône ou à disque sont des instruments onéreux et de fabrication complexe, aussi n'ont-ils rencontré qu'un succès relatif. Le nombre d'exemplaires produits depuis l'invention d'Hermann est estimé à environ 500 pièces. Vers le milieu du XIX^e siècle, quelques rares ateliers de mécanique de précision s'en partageaient le marché, parmi lesquels Oppikofer à Zurich, Ernst à Paris, Stark à Vienne et Ausfeld à Gotha, en Allemagne. Seuls quelques exemplaires de cette époque ont été conservés.

Les planimètres seraient sans doute restés des instruments coûteux, rares et méconnus sans la réflexion du mathématicien Jacob Amsler. Né en Suisse en 1823, ce fils de fermier étudie d'abord la théologie avant de s'orienter

vers les mathématiques et la physique, puis vers la fabrication d'instruments mathématiques de précision. L'année 1854 est particulièrement faste dans sa vie. Il convole en justes noces et invente le planimètre polaire, qui connaît aussitôt un succès foudroyant.

Amsler, en cherchant à simplifier le planimètre à disque, va réaliser une série de transformations progressives. Il s'aperçoit qu'il est équivalent de permettre à la roulette d'être inclinée tout en restant tangente au bord du disque, plutôt que parallèle à l'axe des abscisses. Dans cette configuration, seul compte que la distance de la roulette au centre soit fixe, ce qu'une simple tige assure, et le disque devient inutile. Enfin, le déplacement du disque le long de l'axe des abscisses (un cercle de rayon infini) est équivalent, d'un point de vue théorique, à déplacer l'extrémité de cette tige sur un cercle de rayon fini. Pour réaliser ce mouvement circulaire, mécaniquement beaucoup plus simple que le mouvement rectiligne, Amsler articule le bras portant la roulette à un premier bras qui tourne autour d'un point fixe, le pôle.

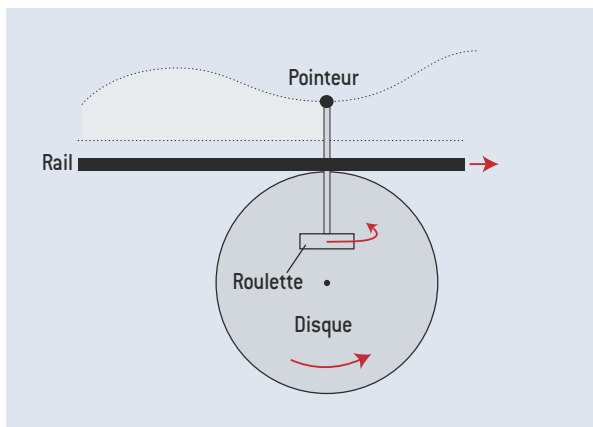
Une simplification progressive

Par ces modifications successives, Amsler réussit à s'affranchir du disque. La roulette intégrante, fixée perpendiculairement au second bras, tourne sur la feuille de papier. Ce bras se termine par un pointeur avec lequel on suit le bord de la surface que l'on veut mesurer (voir la figure 4). Pendant l'opération, seule la composante du mouvement perpendiculaire au second bras entraîne la roulette. L'angle de rotation total, lorsque le pointeur a parcouru tout le bord de la surface, donne l'aire cherchée.

Ce résultat s'explique en termes modernes par une application du théorème de Green, qui ramène le calcul d'une intégrale surfacique (sommation sur des éléments de surface infinitésimaux) au calcul d'une intégrale curviligne (sommation sur des arcs de courbe infinitésimaux). Cette justification – qui vaut aussi pour tous les planimètres reposant sur l'emploi d'une roulette intégrante – a été découverte *a posteriori* au début du XX^e siècle. Auparavant, les inventeurs expliquaient le fonctionnement de leurs instruments par des raisonnements longs et tortueux.

En supprimant la partie la plus complexe des planimètres antérieurs, Amsler aboutit à un instrument plus précis, léger, transportable sur le chantier (les instruments précédents étaient confinés aux bureaux d'études) et, surtout, dix fois moins cher que ses prédécesseurs. Très vite, les ingénieurs remarquent que le planimètre polaire, qui permet un calcul graphique rapide et pratique des déblais et des remblais, est aussi adapté à celui de nombreuses quantités cruciales en mécanique et s'exprimant par des intégrales. Le planimètre d'Amsler reçoit de fait immédiatement la faveur de nombreux ingénieurs, notamment ceux des chemins de fer et de la construction navale.

Dès 1854, Amsler crée un atelier en Suisse pour produire en série son nouvel instrument. Jusqu'à sa mort, en 1912, environ 50 000 planimètres y seront fabriqués. Au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle, deux autres maisons se lancent à leur tour dans la fabrication à grande échelle de planimètres : Ott, à Kempten, dès 1873,



3. Remplacer le cône par un disque facilite la réalisation du planimètre. Le disque tourne à plat le long de l'axe des abscisses, tandis que la roulette, perpendiculaire à sa surface, est décalée le long du diamètre en fonction de la hauteur de la courbe. Selon que la roulette est au-dessus ou en dessous du centre, l'aire est comptabilisée positivement ou négativement.



4. Le planimètre polaire d'Amsler (ci-dessus, un exemplaire construit vers 1860) se compose d'un bras qui tourne autour d'un pôle fixe, articulé avec un second bras qui se termine par un pointeur et où une roulette intégrante est fixée perpendiculairement. Débarassé du cône ou du disque, il est plus précis, plus léger et moins coûteux que ses prédécesseurs. Près d'un million de planimètres polaires seront construits.

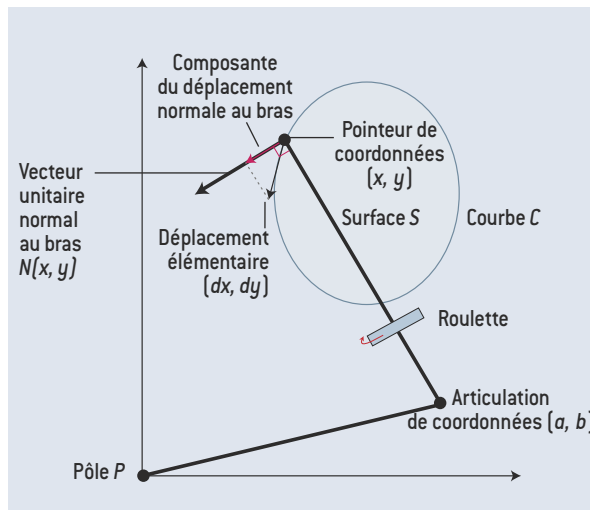
Son fonctionnement, à l'époque expliqué par des arguments empiriques, se justifie aujourd'hui de façon abstraite par le théorème de Green, qui relie l'intégrale sur une courbe fermée C à l'intégrale sur la surface S enclose par cette courbe. En supposant les deux bras de longueur égale à l'unité, notons (x, y) les coordonnées du pointeur, qui suit la courbe, et (a, b) celles de l'articulation (ci-contre). La roulette étant perpendiculaire au second bras, seule compte la composante du déplacement perpendiculaire à ce bras, égale à la projection du vecteur de déplacement infinitésimal du pointeur $[dx, dy]$ sur le vecteur unitaire normal au bras $N(x, y)$. Un calcul rapide donne $N(x, y) = (b - y, x - a)$. La projection s'exprime alors par le produit scalaire :

$$N(x, y) \cdot [dx, dy] = (b - y) dx + (x - a) dy$$

La formule de Green permet alors d'écrire l'égalité :

$$\int_C (b - y) dx + (x - a) dy = \iint_S [\partial(x - a)/\partial x - \partial(b - y)/\partial y] dx dy$$

Cette dernière intégrale, égale à $\iint_S dx dy$, exprime l'aire de la surface S .



et Coradi, à Zurich, à partir de 1880. Le nombre total de planimètres polaires fabriqués depuis 1854 se situe entre 500 000 et 1 000 000, ce qui souligne l'importance technique et économique de cet instrument.

Son déclin n'a commencé qu'avec le développement des ordinateurs. Les ateliers de mécanique de précision d'Allemagne et de Suisse, qui avaient détenu pendant plus d'un siècle un quasi-monopole de la fabrication des intégrateurs mécaniques, se sont effondrés. Aujourd'hui, la production est principalement assurée par quatre fabricants japonais qui réalisent encore quelques planimètres à destination de l'industrie textile ou de l'imagerie médicale, où l'on peut se contenter d'évaluer rapidement la surface approximative d'une pièce de tissu ou d'une tumeur sur une radiographie.

Prédire les horaires de marées

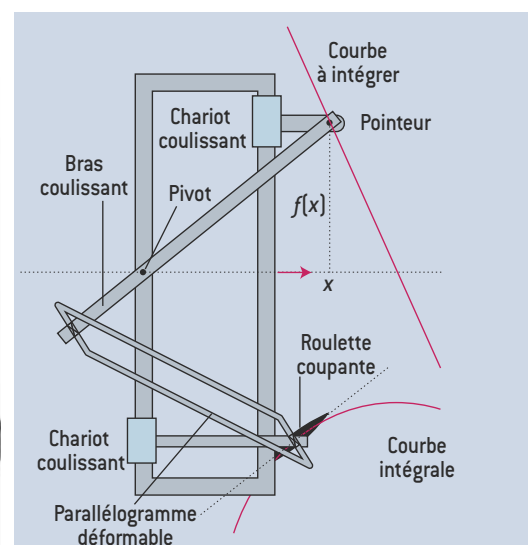
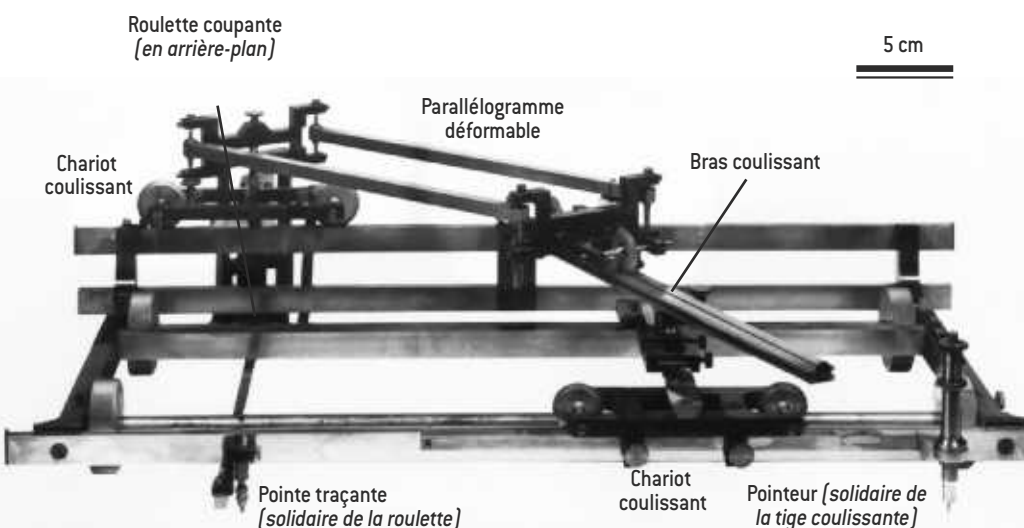
Parallèlement à l'essor des planimètres, se sont développés leurs proches cousins, les intégraphes. Alors qu'un planimètre fournit une valeur numérique, l'aire sous une courbe entre deux bornes, ou, de façon équivalente, l'intégrale d'une fonction f entre deux abscisses a et b , un intégraphe sert à déterminer graphiquement une primitive F d'une fonction f donnée, c'est-à-dire la fonction dont la valeur $F(x)$ en chaque point x est égale à l'intégrale de la fonction f entre deux bornes a et x (en d'autres termes, $F(x) = \int_a^x f(t) dt$).

Un intégraphe peut jouer le rôle d'un planimètre, car il donne simultanément les aires sous une courbe pour toutes les bornes, mais en déterminant les valeurs de l'intégrale pour chaque point, il ouvre surtout la voie à des intégrations successives.

De nombreux problèmes de génie civil se traduisent en effet par des intégrations répétées. Lorsqu'on étudie la résistance d'une poutre soumise à des charges, par exemple, intégrer la courbe de répartition des charges donne le fléchissement en chaque point, dont l'intégration donne à son tour le cisaillement. Un intégraphe permet de déduire sur le plan ces courbes l'une de l'autre de façon exacte, d'un mouvement simple et continu.

Bruno Abdank-Abakanowicz réussit dans les années 1880 à mettre au point un tel intégraphe. Né en Pologne en 1852, ce mathématicien fait ses études aux Écoles polytechniques de Lvov, actuellement en Ukraine, et de Vienne, où il est élève du mathématicien Wawrzyniec Zmurko, qui s'est lui aussi intéressé à l'intégration mécanique. Il s'exile à Paris à la suite de la partition de son pays entre la Russie, la Prusse et l'Autriche.

Le problème du calcul d'une primitive, inverse de celui de la dérivation, consiste à retrouver une courbe à partir de la seule connaissance de ses tangentes. Après plusieurs tentatives, Abdank-Abakanowicz abandonne le principe de la roulette intégrante, et réussit à traduire mécaniquement le calcul des primitives en réalisant un dispositif qui



5. L'intégrateur d'Abdank-Abakanowicz [à gauche un exemple issu de la Maison Coradi vers 1900] permet de tracer la primitive d'une fonction f représentée par une courbe (dans le schéma de droite, certains éléments ont été déplacés par rapport à l'objet réel par commodité). On déplace le cadre le long de l'axe des abscisses tout en suivant la courbe à intégrer avec le pointeur, dont le mouvement est libre selon les ordonnées. Par construction, le bras portant le pointeur coulisse de façon telle que sa pente est constamment égale

à l'ordonnée $f(x)$ de la fonction à intégrer. Il est assujéti à un parallélogramme déformable, dont le côté opposé porte une roulette de sorte que celle-ci et le bras restent parallèles. La roulette, taillée en biseau pour mordre sur le papier et éviter tout dérapage, dessine une courbe dont la pente en chaque point est égale à l'ordonnée de la fonction initiale f , c'est-à-dire une courbe représentant l'une de ses primitives [F est une primitive de f si la dérivée de F est égale à f]. La primitive est ensuite matérialisée par un dispositif d'encrage.

transforme de façon continue les ordonnées de la courbe initiale en pentes de tangentes à la courbe recherchée.

La pièce essentielle est un parallélogramme déformable. Sur l'un des côtés est fixée une tige reliée au pointeur avec lequel l'opérateur suit la courbe à intégrer et le côté opposé porte une roulette coupante, destinée à tracer la primitive recherchée (voir la figure 5). La roulette reste toujours parallèle au bras du pointeur lorsque le parallélogramme se déforme. Par construction, lorsque le pointeur monte ou descend en suivant la courbe, la pente de la tige et, par conséquent, la direction de la roulette, sont constamment égales à l'ordonnée de la courbe initiale. Les tangentes en tout point à la courbe tracée par la roulette sont ainsi égales aux valeurs de la fonction de départ ; il s'agit donc de la primitive recherchée.

Les intégrateurs, assez coûteux et destinés à des applications spécialisées, n'ont jamais été produits en grande série. Dans le catalogue 1900 de la Maison Coradi de Zurich, un intégrateur coûtait 350 francs, soit six fois plus qu'un planimètre polaire. Seuls des laboratoires ou des bureaux de calcul importants pouvaient s'offrir un tel instrument.

L'histoire des intégrateurs mécaniques ne se limite pas aux appareils décrits précédemment. Sans parler des instruments spécifiquement fabriqués pour répondre à un besoin particulier, des appareils plus complexes ont été conçus en associant plusieurs planimètres ou intégrateurs. Vers la fin du XIX^e siècle, en connectant plusieurs planimètres, William Thomson, alias Lord Kelvin, invente un « analyseur harmonique ». Cet instrument calcule simultanément les premières harmoniques d'une fonction périodique, c'est-à-dire les termes prépondérants dans la décomposition de la fonction en une série de fonctions périodiques élémentaires. Grâce à cet appareil, Kelvin analyse graphiquement les mouvements des marées à partir des mesures effectuées dans les ports. En recombinaison ensuite, grâce à un autre dispositif mécanique, les harmoniques trouvées, il détermine une fonction modélisant la marée et permettant d'en prédire les horaires.

De même, en généralisant le principe de l'intégrateur, on peut passer d'un calcul graphique de primitive à l'intégration d'équations différentielles plus complexes. En connectant mécaniquement plusieurs intégrateurs entre eux, on parvient par exemple à intégrer des équations différentielles du second ordre ou d'ordre plus élevé, qui, par nature, nécessitent plusieurs intégrations simultanées. L'idée fut lancée pour la première fois par William Thomson en 1876 ; faute de moyens techniques nécessaires, il ne put la concrétiser. Il a fallu attendre 1901 pour qu'Aleksei Krylov, de l'École navale de Saint-Petersbourg, construise le premier « analyseur différentiel » fondé sur ce principe. Cet instrument n'a cependant pas été conservé et, de ce fait, est mal connu. C'est surtout à partir des années 1930 que de grands analyseurs différentiels ont été fabriqués, par exemple par Vannevar Bush, à l'Institut de technologie du Massachusetts, ou par Douglas Hartree, à l'Université de Manchester, pour résoudre les problèmes apparus avec le développement des réseaux d'électricité et de téléphone. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les principaux pays belligérants ont utilisé de tels appareils pour établir des tables d'artillerie.

De tous les instruments d'intégration, seul le planimètre polaire a été véritablement répandu : c'était un outil dont les ingénieurs se servaient chaque jour, au même titre que la règle à calcul. Après la guerre, cependant, tous les intégrateurs mécaniques ont connu un déclin rapide et ont été éclipsés par les ordinateurs et les calculatrices électroniques.

Dominique TOURNÈS est maître de conférences à l'Institut universitaire de formation des maîtres (IUFM) de la Réunion et chercheur au Laboratoire de recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et les institutions scientifiques (UMR 7596 CNRS/Université Paris 7).

J. MARGUIN, *Histoire des instruments et machines à calculer*, Hermann, Paris, 1994.

Soyez les premiers à profiter de notre offre exceptionnelle d'abonnement

Pour la Science (12 n^{os}) + les Dossiers (4 n^{os})

1 an • 76 € seulement
au lieu de 102,50 €



Retrouvez en plus l'intégralité de votre magazine
en ligne et téléchargez les articles de votre choix compris
dans votre abonnement sur www.pourlascience.fr

■ POUR LA
SCIENCE

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service abonnements • Pour la Science
8 rue Féroü • 75278 Paris cedex 06

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** seul (12 n^{os}) pour un an.

56 € au lieu de ~~74,70 €~~ (prix de vente au numéro) Participation aux frais de port : 12€/an pour l'Europe (hors France) et 25€/an pour les autres pays.

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** (12 n^{os}) + les **Dossiers** (4 n^{os}) pour un an.

76 € au lieu de ~~102,50 €~~ (prix de vente au numéro) Participation aux frais de port : 12€/an pour l'Europe (hors France) et 25€/an pour les autres pays.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations de *Pour la Science*.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations des partenaires commerciaux de *Pour la Science*.

Mes coordonnées :

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Ville : _____

Code postal : _____ Pays : _____

Téléphone : _____

E-mail : _____

Date de naissance : _____

Je règle par :

☐ Chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Carte bancaire

Numéro de carte | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Date d'expiration | | | | | Signature

Code de sécurité* | | | |

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de *Pour la Science*. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir* par simple courrier.

* Merci d'inscrire les 3 derniers chiffres figurant au dos de votre carte.



L'Asie, berceau des anthropoïdes

Un cortège d'espèces de singes anthropoïdes primitifs a été mis au jour récemment au Pakistan, dans des sites vieux de 30 millions d'années. Cet ensemble de découvertes apporte les arguments décisifs en faveur de l'origine asiatique du groupe de primates dont nous sommes issus.

Les gisements de l'Oligocène (entre 38 et 23 millions d'années) du Fayoum en Égypte, puis ceux d'Oman, ont longtemps été les seules sources d'information qui documentaient les premiers temps de l'histoire de cette famille de singes promise à un si bel avenir. C'est pourquoi on considérait cette partie de l'Afrique comme le berceau du groupe.

Au cours de la dernière décennie, une succession de découvertes en Chine du Sud, en Birmanie et en Thaïlande a montré que le Sud-Est asiatique avait abrité plus anciennement, durant l'Éocène (entre 55 et 38 millions d'années), des faunes de primates primitifs très diversifiés qui, par conséquent, avaient vécu sous ces latitudes.

Cependant, il était jusqu'ici difficile de faire le lien entre ces formes très primitives de l'Éocène, la plupart de très petite taille, et celles plus récentes des gisements égyptiens. Qui plus est, il n'existait en Asie du Sud aucun gisement de l'Oligocène susceptible de révéler quelle avait été l'évolution locale de ces primates primitifs.

Les gisements oligocènes découverts au Pakistan dans la région des Bugti, lors des missions pakistano-françaises conduites en 2001 et 2002 par Jean-Loup Welcomme, de la mission paléontologique française au Balouchistan, comblent cette lacune. Les genres et espèces mis au jour sont des groupes frères des singes supérieurs trouvés au Fayoum, en Égypte.

Les reconstitutions paléogéographiques indiquent que toutes ces régions, allant de l'extrême Sud-Est asiatique jusqu'à l'Afrique du Nord, se situaient sur les marges méridionales de la Téthys, une ancienne mer dont la dernière relique est la mer Méditerranée. Lors de la transition de l'Éocène à l'Oligocène, il s'est produit à l'échelle du globe une détérioration climatique qui a entraîné des modifications profondes des paysages végétaux partout dans le monde.

On constate que c'est lors de cette crise que s'est ébauchée la diversification des anthropoïdes dans la région Sud de la Téthys ; située sous les tropiques, cette région a joué un rôle de zone refuge.

Jean-Louis Hartenberger

Sur la carte ont été localisés les sites où l'on a retrouvé des restes de primates de l'Éocène (*silhouettes en noir*) et de l'Oligocène (*en rouge*) sur les rivages de la Téthys. On a également représenté quelques-unes des molaires récemment découvertes au Pakistan.

Prélever de l'ADN sans nuire

Extraire de l'ADN d'exuvies, c'est-à-dire des dépouilles laissées par les larves d'insectes lorsqu'elles se métamorphosent en insectes adultes : c'est ce qu'ont fait Phill Watts, de l'Université de Liverpool, et ses collègues. Ils ont décrit trois techniques d'extraction qu'ils ont appliquées à des exuvies d'une petite libellule protégée en Grande-Bretagne, *Coenagrion mercuriale*.

Il ne s'agit pas tout à fait d'une première, puisque l'année dernière, des zoologistes américains avaient réussi à obtenir de l'ADN issu de débris d'un papillon et d'une abeille.

Quel est l'intérêt de ce résultat ? L'analyse génétique fait partie des outils modernes utilisés par les taxonomistes ou par les écologues. En analysant l'ADN, on peut, par exemple, préciser les relations de parenté entre différents organismes, caractériser des sous-populations et étudier leur répartition ou leur dissémination, etc. Or pour des espèces dont

les organismes sont de petite taille, comme les insectes, l'extraction d'ADN n'est pas anodine : elle exige, sinon de tuer, du moins de capturer l'animal pour y prélever assez de tissu (une patte par exemple) pour l'analyse avant de le relâcher. En dehors de l'aspect éthique et du dommage causé à l'animal, cette opération est problématique dans le cas des espèces protégées – les autorisations de capture étant difficiles, parfois impossibles, à obtenir –, d'espèces rares ou très mobiles et difficiles à capturer. L'extraction d'ADN à partir d'exuvies – à condition qu'elles soient assez fraîches – offre une solution intéressante, puisque les dépouilles larvaires sont souvent plus faciles à trouver que leurs anciens propriétaires. Et point de scrupules éthiques ou écologiques, ni obstacles législatifs.

Maurice Mashaal

Odonatologica, vol. 34(2), pp. 183-187, 2005



Cette libellule (*Anax imperator*) est passée de l'état de larve aquatique à celui d'insecte ailé adulte, et n'a pas encore ses couleurs définitives. L'enveloppe de la larve, ou exuvie, reste accrochée au support jusqu'à ce que les intempéries l'emportent et la détruisent.

M. Mashaal

La lèpre dans le monde au XXI^e siècle

La lèpre a fauché des vies humaines par milliers durant des siècles et sa seule évocation fait frissonner. D'où venait-elle ? On a longtemps cru qu'elle avait pour origine le sous-continent indien et qu'elle avait été introduite en Europe par les soldats d'Alexandre le Grand de retour des Indes. Une étude coordonnée par une équipe de l'Institut Pasteur et portant sur l'ADN de malades du monde entier révèle que la maladie serait en fait venue d'Afrique de l'Est.

Les textes anciens indiquent la présence de la lèpre en Chine, en Inde et en Égypte vers 600 avant notre ère. Certains textes retrouvés en Inde décrivent la perte de sensibilité des doigts et des orteils, un des premiers signes des dommages causés par la bactérie. Au Moyen Âge, les lésions déformantes et les chairs rongées furent souvent rapportées.

En France, on dénombre encore 250 personnes traitées contre la lèpre et 25 nouveaux cas par an. C'est une maladie de la pauvreté et de la promiscuité : dès que le niveau de vie augmente, le nombre de malades diminue. Elle persiste dans les pays pauvres où l'on dénombre 500 000 nouveaux cas chaque année. On connaît mal la bactérie responsable de la maladie, notamment parce qu'on ne sait pas la cultiver en laboratoire et qu'on ne dispose que d'un seul modèle animal (le tatou à neuf bandes). On ignore même comment elle se transmet d'une personne à l'autre.

La bactérie coupable attaque les nerfs. Le premier signe clinique est l'apparition, sur la peau, de taches dépigmentées. Les extrémités (doigts, nez) sont touchées en premier. Les zones qui ne sont plus innervées s'atrophient progressivement. De plus, elles sont insensibles, de sorte que les malades se blessent sans s'en rendre compte, et ce sont ces blessures secondaires qui sont responsables d'infections ou de gangrène.

L'agent de la lèpre a une caractéristique quasi unique : contrairement aux autres bactéries, son génome est extrêmement stable. C'est ce qu'ont

constaté Stewart Cole, Marc Monot, de l'Institut Pasteur, et leurs collègues qui ont analysé le génome des bactéries collectées un peu partout dans le monde. Elle serait la plus stable des bactéries connues. L'équipe pastorienne en a déduit qu'une seule souche a infecté le monde entier.

L'analyse génomique comparative a révélé trois mutations ponctuelles, permettant de définir quatre types de souches. Le type 1 domine en Asie, le type 2 en Éthiopie, le type 3 en Europe, en Afrique du Nord et en Amérique, et le type 4 en Afrique de l'Ouest et aux Caraïbes. Les Pasteuriens ont montré qu'une seule mutation sépare le type d'Afrique de l'Est de celui de l'Europe, lequel est séparé par une mutation du type de l'Afrique de l'Ouest. Une autre mutation sépare le type d'Afrique de l'Est du type d'Asie.

Les biologistes proposent que la maladie serait issue de l'Afrique de l'Est, qu'elle aurait gagné l'Europe, puis, de là, serait revenue en Afrique de l'Ouest. Simultanément, la souche d'Afrique de l'Est aurait migré vers l'Asie. Les soldats d'Alexandre le Grand n'auraient pas rapporté la maladie des Indes, mais l'auraient contractée au Proche-Orient. L'émigration des Européens et la traite des esclaves venant de l'Afrique de l'Ouest auraient eu une importance notable sur la propagation de la maladie, qui s'est répandue au gré des migrations humaines.

La découverte de la stabilité du génome de cette bactérie suscite l'espoir d'un vaccin qui serait efficace sur l'ensemble des souches identifiées. Qui plus est, des tests de dépistage seraient également envisageables, ce qui permettrait que les malades soient traités par les antibiotiques avant que les stigmates de la maladie n'apparaissent – car les malades marqués sont rejetés par la société, même s'ils sont guéris.

Françoise Pétry

Science, vol. 308, pp. 1040-1042, 13 mai 2005