

LES TECHNIQUES D'ÉLIMINATION DE L'ARSENIC

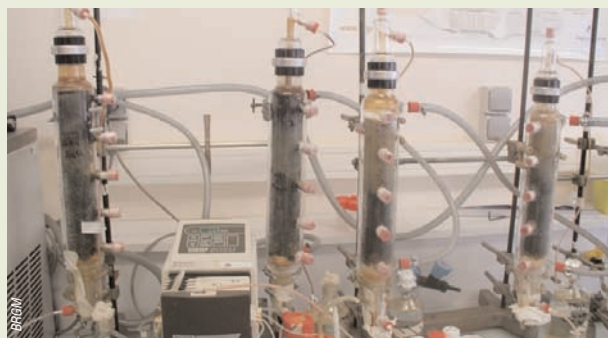
Il existe aujourd'hui une cinquantaine de méthodes pour éliminer l'arsenic de l'eau. Mises au point en laboratoire, certaines sont utilisées par l'industrie. Cependant, la plupart restent inapplicables dans les pays en développement. Les différents procédés sont fondés sur l'inversion des réactions naturelles qui ont entraîné la solubilisation d'un polluant dans les eaux souterraines. Ils reposent sur quatre types de réactions : adsorption, précipitation, floculation (formation de « flocons » accélérant la sédimentation des particules de matière) et oxydo-réduction.

Dans le premier type de réaction, l'arsenic s'adsorbe à la surface du fer et forme un complexe. Dans la réaction de précipitation, l'arsenic est incorporé dans un solide, comme c'est le cas du réalgar As_4S_4 ou certains sulfures et disulfures de fer. C'est également le cas de la floculation, mais les particules solides sont petites. Enfin, les réactions d'oxydation convertissent l'arsenic dont le degré d'oxydation est égal à trois en arsenic dont le degré d'oxydation est égal à cinq, qui s'adsorbe mieux. L'oxydation est soit chimique (par exemple

par le peroxyde d'oxygène ou la limaille de fer), soit photochimique. Dans ce dernier cas, le procédé SORAS (*Solar Oxidation and Removal of Arsenic*) a été développé par des chimistes et ingénieurs de l'Institut EAWAG et testé dans les pays en développement, dont le Bangladesh.

En laboratoire, on ajoute aux eaux à traiter de l'acide citrique (ou jus de citron) et de la limaille de fer, on les place dans des bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET), que l'on expose pendant quelques heures au soleil. L'arsenic dissous se fixe sur des oxydes de fer, qui sont filtrés le jour suivant. Des essais de terrain au Bangladesh sont en cours pour tenter d'adapter le processus aux conditions physico-chimiques de l'eau extraite des puits.

Une autre technique consiste à modifier les conditions physico-chimiques de l'aquifère *in situ* pour oxyder, puis piéger les polluants contenus dans l'eau. Dans ce cas, on injecte de l'oxygène directement dans l'aquifère. Cette méthode est efficace dans la région de Hanoï (au Vietnam), car les eaux souterraines sont riches en fer dissous. Au



EXPÉRIENCES DE BIOREMÉDIATION sur des colonnes de sols dans lesquelles circule une eau polluée en As en présence de particules de Fer et de bactéries qui vont accélérer le processus de dépollution

contact de l'air, le fer s'oxyde en formant des précipités de rouille sur lesquels l'arsenic s'adsorbe. Ces précipités sont ensuite éliminés en surface par un filtre à sable. Des études en laboratoire et sur le terrain ont été réalisées au Bangladesh, au Salvador, en Grèce et en Roumanie pour optimiser le fonctionnement de ces filtres.

Quant aux équipes du projet européen AQUATRAN, elles mettent au point des techniques de dépollution des eaux, testées dans les laboratoires du Bureau de recherches géologiques et minières en France, le BRGM. Parmi elles, des techni-

ques de bioremediation consistant à traiter l'eau polluée par des particules de fer en présence de bactéries réductrices. Ces dernières dégradent les composés arsénisés (voir l'illustration ci-dessus).

Enfin, une technique de piégeage après extraction, qui consiste à faire circuler l'eau dans des colonnes contenant des agrégats nanométriques d'aluminium, ou des oxydes de manganèse pour retenir les polluants, a été récemment mise au point en laboratoire, puis testée sur le terrain en Roumanie et Hongrie. Ce procédé est efficace, mais très coûteux.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Fendorf *et al.*, **Spatial and temporal variations of groundwater arsenic in South and Southeast Asia**, *Science*, vol. 328, pp. 1123-1127, 2010.

D. Polya et L. Charlet, **Rising arsenic risk ?**, *Nature Geoscience*, vol. 2, pp. 383-384, 2009.

L. Winkel *et al.*, **Predicting groundwater arsenic contamination in Southeast Asia from surface parameters**, *Nature Geoscience*, vol. 1, pp. 536-542, 2008.

L. Charlet et D. Polya, **Arsenic in shallow, reducing groundwaters in Southern Asia : An environmental health disaster**, *Elements*, vol. 2, pp. 91-96, 2006.

✓ SUR LE WEB

<http://www.eawag.ch/index>

<http://www.aquatrain.eu/>

polluants dans le riz, mais aussi dans les autres céréales et les légumes cultivés dans les pays concernés.

Devant l'ampleur du problème au Bangladesh, le gouvernement a tenté de trouver des solutions. L'OMS, et l'UNICEF ont soutenu un projet de réduction des concentrations d'arsenic dans l'eau et d'approvisionnement en eau potable. Lancé en 1998, ce projet bénéficia d'un prêt de la Banque mondiale de 32,5 millions de dollars. En outre, les organisations non gouvernementales participent à des campagnes de sensibilisation des populations et à des projets pilotes. Ainsi, l'Institut suisse EAWAG commence à développer une méthode d'élimination de l'arsenic adaptée aux conditions physico-chimiques de l'eau au Bangladesh et au Vietnam, et celle plus prometteuse d'élimination de l'arsenic par photo-oxydation. En Europe, des recherches ont débuté avec le projet AQUATRAN, visant notamment à faire un inventaire des

zones polluées en Hongrie et en Roumanie, et à tester sur le terrain des solutions de dépollution adaptées.

Par ces différents projets européens ou mondiaux, les chercheurs s'associent pour mieux caractériser les pollutions des eaux souterraines en fonction de la géologie et des activités humaines locales. Toutefois, près de 20 ans après la révélation de la crise au Bangladesh, aucune solution à la mesure du problème n'a été mise en place. La première difficulté est scientifique, car s'il existe des techniques performantes en laboratoire, rares sont celles qui s'appliquent à grande échelle. S'ajoutent à cela les incontournables verrous financiers. Face à l'urgence, l'une des solutions serait sans doute d'abandonner les puits tubés pour revenir à l'exploitation des eaux de surface, qui nécessiteraient certes d'être traitées, mais avec des méthodes qui ont fait leurs preuves. Il ne resterait plus qu'à trouver les fonds et à convaincre les autorités locales...

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE



Prochain numéro
« Chimie et mer »
en vente le 30/09

Dossier Pour la Science

Incas, Mayas, Aztèques... Mais aussi Olmèques, Inuits, Cheyennes... Bien avant les Européens, des hommes avaient déjà conquis l'Amérique du cercle arctique à la Terre de Feu et y avaient fondé de nombreuses civilisations. La plupart font encore rêver aujourd'hui. Comment sont-elles apparues ? Comment fonctionnaient-elles ? Ont-elles vraiment disparu ? Ce Dossier retrace l'histoire, entre grandeur et décadence, des peuples d'Amérique.

Numéro 72, juillet-septembre 2011 – Prix de vente : 6,95 €

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Émotions sociales, émotions individuelles, neuropsychologie des émotions : les émotions ont une influence notable sur nos comportements et nos décisions. Dans ce nouveau numéro thématique, découvrez les émotions dans tous leurs états et apprenez pourquoi elles sont les alliées de la raison.

Numéro 7, août-octobre 2011 – Prix de vente : 6,95 €



Format classique
ou pocket



Format classique
ou pocket

Cerveau & Psycho

Notre attention est-elle menacée ? Sollicitations de la publicité, des smartphones, des alertes e-mail au travail : il est de plus en plus difficile de rester concentré. Les enfants sont les premiers à en subir les conséquences à l'école. Neurobiologistes et psychologues dévoilent les rouages de cette capacité. Au sommaire également : les liens entre grands-parents et petits-enfants, des gaz dans le cerveau, et bien d'autres sujets.

Numéro 47, septembre-octobre 2011 – Prix de vente : 6,95 €

■ POUR LA
SCIENCE

HISTOIRE DES SCIENCES

L'art de la navigation dans le Pacifique

Sans cartes ni instruments d'aucune sorte, les peuples océaniens ont conquis le Pacifique bien avant les Européens, grâce à une connaissance exceptionnelle des mers et de la navigation qui n'a rien à envier aux pratiques occidentales.

Emmanuel DESCLÈVES

Pendant cet espace de trois mois et vingt jours, nous parcourûmes à peu près 4 000 lieues dans cette mer que nous appelâmes Pacifique parce que, durant tout le temps de notre traversée, nous n'essuyâmes pas la moindre tempête. Nous ne découvrîmes non plus pendant ce temps aucune terre, excepté deux îles désertes.

Ainsi Antonio Pigafetta, un officier de Magellan, relate-t-il la première traversée connue du Grand Océan par des Européens, réalisée en 1520 – plus de 10 000 milles marins (1 mille marin vaut 1 852 mètres) sans escale, soit près de la moitié de la circonférence terrestre. Au fil des voyages, les îles se sont révélées bien plus nombreuses et... habitées. Et pour cause : les immenses espaces du Pacifique, qui couvrent près de 40 pour cent du globe terrestre et comptent environ 25 000 îles, avaient été explorés, mis en valeur, puis peuplés bien avant l'arrivée des Européens, par des vagues successives de migrants venus des rivages de l'Asie du Sud-Est. La dernière migration avait débuté il y a environ 6 000 ans, pour atteindre la Polynésie centrale au moins cinq siècles avant notre ère, et la côte américaine avant l'an mille. À l'époque où les Vikings parcouraient seulement 200 à 300 milles de navigation hauturière, les Océaniens étaient déjà allés chercher la patate douce en Amérique, qu'ils avaient implantée dans les îles Cook (10 000 milles aller-retour).

Les nombreux voyages hauturiers ainsi réalisés d'île en île, sur des distances parfois bien supérieures à celle de la traversée de l'Atlantique, supposent une exceptionnelle

maîtrise de l'art de la navigation par les premiers colonisateurs du Grand Océan. À bord de pirogues à balancier et de grands catamarans – inventés par leurs ancêtres il y a plus de 2 000 ans –, leurs navigateurs les ont guidés de façon précise, fiable et reproductible, sur des trajets dépassant 5 000 kilomètres hors de vue de la terre, sans cartes ni instruments de navigation. À partir de la fin des années 1960, de nombreux voyages réalisés dans des conditions comparables à celles d'autrefois ont permis d'étudier en détail l'art de la navigation océanien. Depuis, tant la technique de construction des embarcations (voir l'encadré page 87) que celle de la navigation en haute mer ne cessent de nous surprendre.

Sans carte ni boussole

L'épopée des Grandes Découvertes date de siècles récents au regard de l'histoire : traversée de l'Atlantique en 1492 par Christophe Colomb ; ouverture de la route des Indes et de l'Extrême-Orient via le cap de Bonne-Espérance, que Vasco de Gama franchit en 1497 ; grands voyages de circumnavigation inaugurés par Magellan dès 1519 avec la première traversée du Grand Océan ; avènement, enfin, des expéditions à caractère scientifique et humaniste à partir de 1765, commandées notamment par Bougainville, Cook, Lapérouse ou Dumont d'Urville, qui s'illustrèrent particulièrement dans le Pacifique.

Peu à peu, les Occidentaux ont constaté que non seulement les innombrables îles habitables du Grand Océan étaient peuplées, mais que leurs habitants présentaient une

étonnante identité culturelle et linguistique, reflétant une origine commune. L'un des capitaines européens les plus éclairés – James Cook – fut le premier à exprimer officiellement son étonnement : « Il est extraordinaire que la même nation se soit répandue sur toutes les îles dans ce vaste océan, depuis la Nouvelle-Zélande jusqu'à l'île de Pâques, c'est-à-dire sur presque un quart de la circonférence du globe. » En réalité, la zone géolinguistique malayo-polynésienne est encore plus vaste, puisqu'elle s'étend de l'île de Pâques à Madagascar.

Aucun de ces capitaines des Lumières ne semble pour autant en avoir tiré de conclusion sur la maîtrise de l'art de la navigation hauturière par ces populations migrantes. Sans doute aveuglés par une vision trop dualiste du monde, avec d'un côté une minorité de conquérants civilisés et, de l'autre, une masse indigène attardée à un stade primitif, ils ont décrit et commenté, souvent avec éloge, les qualités nautiques des « pirogues » et les connaissances des indigènes en navigation et en astronomie, mais n'ont pas su y voir une culture maritime évoluée.

C'est à partir de ces descriptions et témoignages, conjugués aux rares vestiges astronomiques exhumés dans les îles et au savoir-faire transmis oralement de génération en génération – mais jalousement tenu secret –, que l'on redécouvre aujourd'hui la richesse de l'art océanien de la navigation. Voici un aperçu de l'étendue de ce savoir-faire, reconstitué à partir de ces différentes sources.

Exempt de tout artifice matériel, le secret des premiers navigateurs du Pacifique réside

dans l'utilisation corrélée et cohérente, par un fin pilote doublé d'un observateur averti, de l'ensemble des informations disponibles en mer : données astronomiques indispensables pour les voyages au long cours, mais aussi connaissance approfondie des vents, de la houle et des courants, des phénomènes géophysiques, hydrologiques, météorologiques, océanographiques et hydrographiques, et encore de tout ce qui concerne la vie végétale et animale en mer – oiseaux, poissons, algues, etc.

Le navigateur océanien ne recourt ni aux cartes ni à la boussole ou tout autre instrument. Contrairement aux Occidentaux, il ne dissocie pas la mesure du temps, la vitesse, la dérive due au vent, le courant et la distance à parcourir sur l'eau. Ces facteurs constituent pour lui un ensemble cohérent dont il établit en permanence une synthèse faisant appel à tous ses sens. Son itinéraire est balisé par d'autres symboles, d'autres références inscrites dans le ciel et la mer. Le Soleil, la Lune et les étoiles se déplacent selon des tracés établis depuis la nuit des temps et sont utilisés pour repérer des îles ou des itinéraires. La proximité d'une île est signalée par la forme des nuages et leur couleur :

certaines terres sont surplombées de deux nuages en forme de sourcils ; les lagons reflètent une couleur turquoise sur les nuages localisés au-dessus, tandis qu'une terre couverte de végétation leur donne une teinte brune. Même lorsque l'horizon est sans nuage, le pilote sait observer une légère surbrillance ou un trait plus sombre, marquant par temps clair la présence d'une île à une distance de l'ordre de 30 milles [à l'œil nu, elle n'est visible qu'à environ 10 milles].

Une excellente mémoire

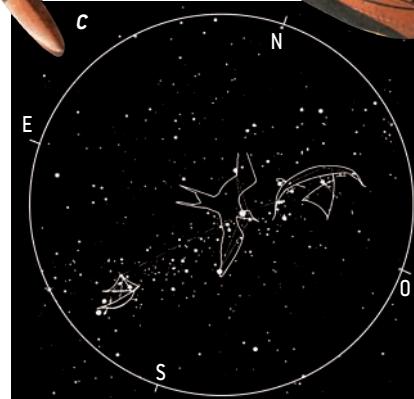
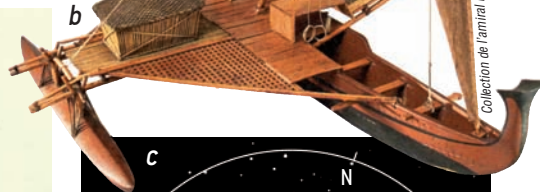
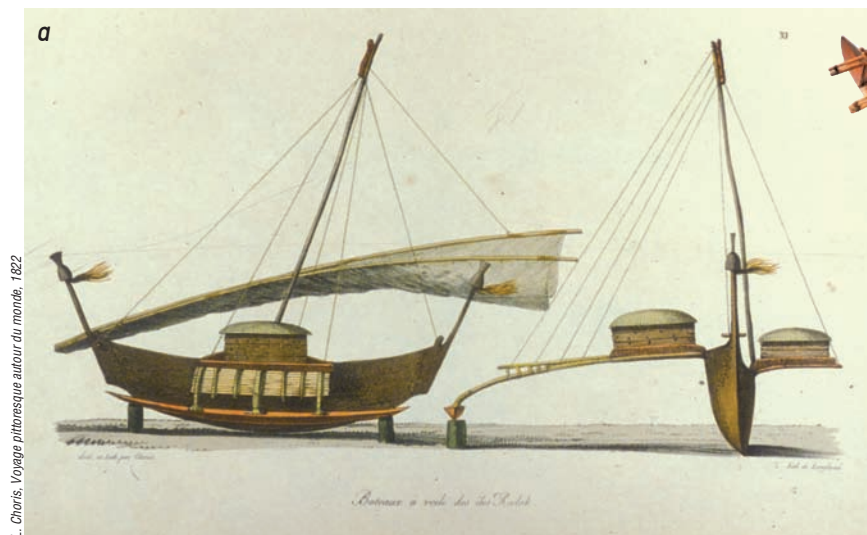
La mer a aussi ses lois : les courants et les vagues sont déviés d'une certaine façon par chaque île qu'ils rencontrent ; les oiseaux peuvent ouvrir la voie ; les algues marquent l'orientation d'un contre-courant ; la houle indique le chemin des tempêtes sur l'océan. Les navigateurs océaniens savent même interpréter les interférences de plusieurs houles croisées : certains pilotes traditionnels discernent encore aujourd'hui une houle particulière parmi une conjugaison de trois ou quatre houles croisées, par la seule sensation qu'ils ont du mouvement du

L'AUTEUR



L'amiral Emmanuel DESCLÈVES est membre de l'Académie de marine.

DEUX PRAOS «VOLANTS» AMPHIDROMES, l'un des îles Mariannes (a), l'autre des îles Carolines (b). Ces pirogues à balancier dépassaient les 20 nœuds, suscitant les éloges des capitaines européens dès le début des années 1600. Les navigateurs polynésiens se repéraient en mer notamment grâce à l'observation astronomique. Associées à de nombreuses légendes de la mer, leurs constellations sont des pirogues, une frégate, etc. (c).



L. Choris, Voyage pittoresque autour du monde, 1822

Collection de l'amiral Pélissier, musée national de la Marine

<http://ceel.polynesien.fra.fr/>

bateau sur l'eau. Ils ont aussi une connaissance poussée des vents, de leur force et de leur direction suivant le lieu et la période de l'année, la façon dont ils soufflent (en continu, par rafales, etc.) : en bons musiciens, ils décryptent à l'oreille la direction et la force du vent, et prédisent ses évolutions à court et moyen termes.

Le navigateur a mémorisé toutes ces connaissances et les relie en mer avec ses observations *in situ*, fruits de ses sens en éveil constant. Il ajuste ainsi sa route, s'aidant des éléments pour tracer son sillage. Compte tenu de l'étendue des connaissances nécessaires à la pratique de cet art, les plus avertis de ces navigateurs devaient faire preuve d'une vaste intelligence encyclopédique, avec en particulier des capacités de mémorisation exceptionnelles. De nombreux témoignages l'attestent, tel celui de Cook, rapportant les précieux conseils de Tupa'ia, un prince de l'île Ra'iātea exilé à Tahiti, qu'il avait embarqué lors de son premier voyage de circumnavigation en 1769 : « Tupa'ia avait beaucoup d'expérience et de lumière sur la navigation. Il nous a fait de temps en temps la description de plus de 130 de ces îles et dans une carte qu'il a tracée lui-même, il en a placé jusqu'à 74. »

À chaque île son étoile

Si les connaissances de la mer et des phénomènes météorologiques constituaient des données importantes pour corriger la trajectoire du bateau, l'itinéraire dans ses grandes lignes était avant tout décidé et suivi grâce à l'observation astronomique. D'après les vestiges archéologiques trouvés sur diverses îles, dès le II^e millénaire avant notre ère, les Océaniens avaient exploré le centre du Pacifique, ce qui suggère qu'ils utilisaient déjà couramment l'astronomie. Face aux distances à parcourir et à la dispersion des îles, ce qui n'était qu'une connaissance expérimentale s'est probablement peu à peu mû en une science de la navigation astronomique, qui atteignit sans doute son apogée au cours du I^{er} millénaire de notre ère, lors de l'exploration et du peuplement du triangle polynésien, entre Hawaï, l'île de Pâques et la Nouvelle-Zélande.

De fait, le ciel astronomique avait peu de secrets pour le navigateur polynésien. À terre, les pilotes restaient des nuits entières à contempler les astres. Par cette expérience systématique et continue, ils ont acquis une mémoire visuelle précise et fidèle des différentes voûtes célestes, à chaque heure et au-dessus de chaque île.

Leur répertoire identifie les noms d'au moins 220 étoiles : « Ils distinguent toutes les étoiles par des noms particuliers ; ils connaissent dans quelle partie du ciel elles paraîtront durant chacun des mois où elles sont visibles sur l'horizon ; ils savent aussi, avec plus de précision que ne le croira peut-être un astronome d'Europe, le temps de l'année où elles commencent à paraître ou à disparaître », souligne Cook.

Louis Antoine de Bougainville observe à son tour : « Les gens instruits de cette nation ont une nomenclature des constellations les plus remarquables ; ils en connaissent le mouvement diurne et ils s'en servent pour diriger leur route en pleine mer. Leur boussole est le cours du soleil pendant le jour et la position des étoiles pendant les nuits. [...] Aoturu, après avoir attentivement considéré le ciel, nous fit remarquer l'étoile brillante qui est dans l'épaule d'Orion, disant que c'était sur elle que nous devons diriger notre course et que, dans deux jours, nous trouverions une terre abondante [...]. Au reste, il nous avait nommé la veille en sa langue sans hésiter la plupart des étoiles brillantes que nous lui montrions ; nous avons eu depuis la certitude qu'il connaît parfaitement les phases de la lune et les divers pronostics qui avertissent souvent en mer des changements qu'on doit avoir dans le temps. »

Pour se repérer en mer, le pilote utilisait notamment les étoiles qui culminent au-dessus des îles. Par exemple, du fait de la rotation de la Terre, l'île de Ra'iātea, dont la latitude est d'environ 16°45' Sud, passe à un moment donné à l'aplomb de Sirius, dont la déclinaison est de 16°33' Sud. Pour apprécier la direction de Ra'iātea, il faut donc attendre le moment de la culmination de Sirius. Le ciel était ainsi une référence fondamentale permettant de se situer et de se déplacer d'île en île, avec une liaison quasi biunivoque entre une île et son étoile culminante.

Cet effet d'« image miroir » du ciel sur l'océan ne vaut qu'à un moment donné et pour une zone géographique limitée, mais le Polynésien est un navigateur : son point de référence n'est ni une terre ni un méridien virtuel, mais son navire sur l'eau, autour duquel tout est mobile et changeant, l'étoile comme l'île. Le pilote a mémorisé les variations du ciel sur la route qu'il doit suivre, jusqu'à l'image finale à son point de destination. Sa vision est proche de celle que l'on a dans un planétarium, où le ciel tourne en permanence autour de soi, à laquelle seraient intégrés les mouvements du navire et des îles sur l'horizon.

Les chemins des étoiles

Comment le pilote repère-t-il sa route par rapport aux variations du ciel ? En connaissant la trajectoire céleste de chaque étoile de son répertoire. À une latitude donnée, les étoiles se lèvent et se couchent à la même place, nuit après nuit. Dans les eaux de Hawaï, par exemple, Deneb se lève à 46° à l'Est du Nord géographique (azimut 046°) et se couche à 46° à l'Ouest (azimut 314°), marquant ainsi deux points sur l'horizon et dessinant un arc de grand cercle entre les deux – le chemin de l'étoile. Cet arc définit un plan donnant une précieuse indication angulaire par rapport à la verticale : toute variation de cet angle signale un écart de route.

Transposés sur une couronne de compas magnétique, ces différents azimuts constituent un « compas stellaire » selon un mode de représentation occidental. À l'instar d'une rose des vents, cet outil fait correspondre les directions données par des étoiles au lever ou au coucher à des azimuts sur l'horizon. Ayant intégré dans sa mémoire les chemins d'étoiles, le pilote océanien est capable de dire qu'à telle époque de l'année, à partir de tel endroit, le premier cap théorique à suivre pour atteindre telle île est donné par l'étoile Mailemua (Bêta du Centaure), puis par telle autre étoile qui se lève ou va se coucher ensuite à l'horizon, et ainsi de suite.

Outre les variations dues à la latitude, il lui faut bien sûr intégrer des corrections à

LES « PIROGUES » DU GRAND OCÉAN

Chez les peuples les plus sauvages, ce qui a rapport à la navigation dénote un degré d'intelligence que l'on chercherait souvent en vain dans la manière dont ils bâtissent leurs habitations ou subviennent à leurs premiers besoins.

Amiral Pâris, 1843

On ne se lance pas dans de grandes traversées sans embarcations sûres et rapides, remontant bien au vent. Les Océaniens avaient atteint un haut degré de perfectionnement dans l'art de la construction navale, encore en partie inégalé. Ils ont construit toutes sortes de navires, tant pour les coques que pour les gréements ou l'agencement des voilures, que l'on peut regrouper en deux catégories : les pirogues à balancier simple ou double (trimaran) et les pirogues doubles (catamarans), à l'exclusion notable de tout monocoque.

Avant l'arrivée des Européens, tous ces navires étaient construits avec des outils en pierre, le métal étant inconnu. Sur les plus grands, on assemblait les différentes pièces

de bois, très soigneusement taillées, avec des cordages de coco. Le calfatage était traité par la bourre de coco enduite de gommages végétales.

Les coques étaient toutes d'une finesse et d'une légèreté inconcevables en Occident. Elles ne comportaient aucun appendice fixe sous l'eau (pas de quilles ni de gouvernail). Même avec l'usage actuel de matériaux composites, le poids des monocoques et des multicoques occidentaux modernes excède encore celui des réalisations océaniques de longueur équivalente, notamment à cause des quilles lestées.

Les gréements étaient d'une grande variété. Il n'y avait jamais de foc, ce qui permettait des mâtures sans étai, légères et réglables. En-

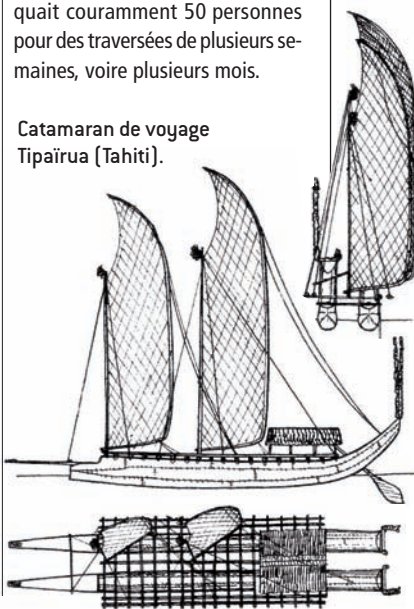
verguées sur au moins deux côtés, les voiles étaient en végétaux tissés assez rigides (pandanus). Leurs formes aérodynamiques permettaient dans bien des cas de dépasser la vitesse du vent. Les voiles de type aile rigide étaient les plus répandues à Tahiti au XVIII^e siècle.

Les pirogues à balancier nommées praos volants dépassaient couramment les 20 nœuds. Certaines étaient amphidromes (capables de se déplacer dans les deux sens : avant et arrière identiques), naviguant toujours balancier au vent, avec des coques souvent dissymétriques sur le plan longitudinal pour contrer les effets de la dérive.

Les pirogues doubles étaient constituées soit de deux coques identiques (navire monodrome), soit de deux coques de tailles différentes (navire amphidrome). Les coques étaient proches l'une de l'autre pour bénéficier d'un effet d'accélération de la veine fluide entre les coques. L'équipage et les

passagers vivaient sur la plateforme au ras de l'eau, sans aucune protection particulière. Les grands catamarans de voyage mesuraient entre 15 et 25 mètres, parfois plus de 30 mètres. On embarquait couramment 50 personnes pour des traversées de plusieurs semaines, voire plusieurs mois.

Catamaran de voyage
Tipaïrua (Tahiti).



l'observation directe : l'étoile n'est pas exactement dans la direction de l'île, le vent et le courant entraînent des dérives, l'azimut de l'astre varie au cours du temps, etc. La ligne directe entre le départ et l'île est connue, et l'art du pilote consiste à apprécier l'écart entre cette direction théorique et la route réelle, lorsqu'il navigue face au vent en tirant des bords. Il utilise notamment des astres guides à tribord et à bâbord, qui servent de garde-fous lorsque des nuages masquent les étoiles de l'avant ou de l'arrière. Le pilote expérimenté sait aussi reconnaître un astre qui apparaît seul au milieu d'un ciel voilé et l'utiliser pour maintenir son cap.

Certaines pratiques se sont perpétuées, mais leur secret est bien gardé. Par exemple, on utilise encore en Micronésie une méthode de navigation fort ancienne, caractérisée par le fractionnement de la route à suivre en plusieurs segments successifs, dénommés *etak*. Le navigateur a recours à un point de

référence, réel ou imaginaire, situé au large de sa route. Ce point sert d'axe autour duquel pivotent les différents repères directionnels qu'il va successivement utiliser. Le premier azimut de référence du voyage est celui qui relie le point de départ à une certaine étoile se levant à l'horizon, en passant par le point pivot. À la fin du premier segment de route – *etak* –, le navigateur verra une deuxième étoile se lever à l'horizon, dans l'alignement du point de référence, et ainsi de suite.

Pour mémoriser ces routes maritimes, les navigateurs ont associé à chaque *etak* des images de la vie en mer – un banc de thons jaunes, un vol de frégates, un croisement de houles... L'ensemble constitue un récit de voyage ponctué d'événements réels ou imaginaires. Simplifiés et chantés en cœur par les équipages, ces récits rythment les efforts et marquent les principaux changements de cap, sans dévoiler aux non-initiés les secrets de la route maritime...

✓ BIBLIOGRAPHIE

E. Desclèves, *Le peuple de l'Océan*, L'Harmattan, 2010.

M.-F. Péteuil, *Ciel d'îles*, *Journal de la Société des Océanistes*, 2003.

B. Finneys, *Voyagers into Ocean Space*, University of California Press, 1985.

J. Neyret, *Pirogues océaniques*, Association des amis du musée de la Marine, 1976.

D. Lewis, *We, the Navigators*, University of Hawai'i, 1972.

E. Dodd, *Polynesian Seafaring*, Dodd, Mead & Company, 1972.

A. Gerbault, *Un paradis se meurt*, Self, 1949.

LOGIQUE & CALCUL

La maîtrise des nombres premiers

Comme l'eau et le feu, les polynômes et les nombres premiers se rencontrent et donnent naissance à un violent bouillonnement... mathématique.

Jean-Paul DELAHAYE

Les polynômes, tels $n \rightarrow 2n + 1$, $n \rightarrow n^2$, $n \rightarrow 5n^3 - 35n^2 + 11$, etc., sont les plus simples des fonctions. Ils représentent l'« ordre mathématique » et ce qui se calcule facilement. Parfois, ils servent d'échelle pour mesurer la difficulté des problèmes.

Les nombres premiers $\{2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, \dots\}$ se situent à l'opposé : ce sont des êtres mathématiques délicats, récalcitrants, incontrôlables, et dont la nature ne sera sans doute jamais entièrement élucidée. Il en résulte que la confrontation entre polynômes et nombres premiers ne peut que produire des idées stimulantes et soulever des problèmes passionnants et difficiles. C'est à ces sujets et à certains résultats nouveaux que nous consacrons cette rubrique.

Existe-t-il une formule polynomiale donnant les nombres premiers ? Une telle formule ne peut donner tous les nombres premiers, ni même ne donner *que* des nombres premiers. Les mathématiciens ont en effet démontré que : Si un polynôme $P(n)$ à coefficients

entiers n'est pas constant, alors il existe une infinité de valeurs entières de n telles que $P(n)$ n'est pas un nombre premier.

Plus puissant, le résultat qui suit, démontré par Robert Bucken en 1946, enlève tout espoir de faire produire uniquement des nombres premiers à une fonction polynomiale ou même à un quotient de fonctions polynomiales : Si un quotient de deux polynômes à coefficients entiers $P(n)/Q(n)$ donne des nombres dont la valeur absolue est première pour les valeurs entières de n , alors $P(n)/Q(n)$ est constant... et donc sans intérêt.

Un polynôme qui fait illusion

Ces résultats et quelques autres du même type montrent que les polynômes sont trop simples pour engendrer les nombres premiers. Ils ne contredisent pas le résultat suivant : le polynôme P de degré 25 à 26 variables (voir la figure 2) est tel qu'il y a identité entre l'ensemble des valeurs posi-

tives qu'il prend pour des valeurs entières de ses variables et l'ensemble des nombres premiers. En bref : ses valeurs positives sont les nombres premiers.

Ce polynôme construit en 1976 par James Jones, Daihachiro Sato, Hideo Wada et Douglas Wiens résulte du codage de la définition de l'ensemble des nombres premiers sous la forme d'un système d'équations, qui ensuite a été réduit à une seule équation. De tels codages sont possibles pour tous les ensembles de nombres dont on connaît un algorithme qui en calcule les éléments les uns après les autres. On sait produire ces polynômes grâce aux méthodes que Yuri Matiyasevich a élaborées pour la résolution du dixième problème de Hilbert et qui a conduit à l'affirmation : Il n'existe aucun algorithme général pour connaître les solutions entières des équations de la forme $P = 0$, où P est un polynôme à coefficients entiers d'une ou plusieurs variables.

Malheureusement, le polynôme de 1976 produit aussi des nombres négatifs qui ne



1. CONTRIBUTEURS à la théorie des nombres premiers mettant en jeu des polynômes. L. Euler (1707-1783, a) a montré que le polynôme $n^2 + n + 41$ donne des nombres premiers pour $n = 0, 1, 2, \dots, 39$. A.-M. Legendre (1752-1833, b) s'est intéressé à $n^2 - n + 41$, qui donne des nombres premiers pour $n = 1, 2, \dots, 40$. G. Dirichlet (1805-1859, c) a démontré le résultat conjecturé par Legendre : si a et b sont premiers entre eux, il existe une

infinité de nombres premiers de la forme $an + b$. V. Bunyakovsky (1804-1889, d) a conjecturé que, sauf pour les cas faciles à repérer, toute formule polynomiale de degré 2 engendre une infinité de nombres premiers. S. Ulam (1909-1984, e) a trouvé des spirales où les alignements correspondent aux suites de nombres premiers. Y. Matiyasevich (f) a montré comment produire des polynômes dont les valeurs positives sont des