

Par exemple, lorsqu'on place un bonbon violet sur l'entrée du « fil » en bas à gauche de la grille de départ représentée dans l'encadré, on crée une chaîne de trois bonbons violets. Cette chaîne est effacée, conformément aux principes de base du jeu, ce qui déplace vers le bas les bonbons des deux colonnes concernées. Et ainsi de suite, le signal se propage et est transmis : à la fin, un bonbon violet apparaît dans la case de sortie.

Nous avons également besoin d'interrupteurs que l'utilisateur peut actionner pour décider quels fils sont actifs. Ces interrupteurs représentent le choix des valeurs de vérité (vrai ou faux) d'une proposition logique. L'utilisateur déplace un bonbon violet soit vers le haut, soit vers le bas, ce qui va envoyer un signal soit vers la gauche, soit vers la droite (voir l'encadré).

Enfin, on peut construire des portes logiques telles que ET, OU et NON à partir d'autres bonbons violets en utilisant ces composants de base. Il nous reste alors simplement à connecter les interrupteurs à ces portes logiques avec des fils suffisamment longs pour obtenir un circuit électrique qui simule notre formule logique. Le circuit électrique a alors une sortie qui représente la valeur de vérité de la formule logique.

En termes de circuits logiques électriques, jouer à Candy Crush consiste à décider judicieusement sur quels interrupteurs agir de façon que les portes logiques s'activent convenablement et que la sortie soit « vrai ». De cette manière, le problème consistant à satisfaire une formule logique est réduit à résoudre un problème dans Candy Crush. Et puisque satisfaire une formule logique est un problème difficile, il en va de même de la résolution d'une grille de Candy Crush.

On peut également montrer l'inverse. En d'autres termes, on peut réduire un problème Candy Crush à celui de la satisfaction d'une formule logique. Il faut simplement écrire une séquence de formules qui représentent le jeu sur une grille de Candy Crush. Or pour l'essentiel, une description logique de Candy Crush se trouve dans n'importe quel programme qui y joue. Par conséquent, Candy Crush

n'est pas plus difficile que l'un ou l'autre des problèmes NP-difficiles, et le jeu est exactement aussi difficile qu'il est difficile de résoudre tous les autres problèmes de la classe NP.

Si nous avions une manière efficace de jouer à Candy Crush, nous aurions un moyen efficace (et prouvable) d'organiser les tournées de livraison, de faire les tableaux de service des hôpitaux et les emplois du temps des lycées. Inversement, si nous avions un moyen efficace de préparer les tournées, faire les tableaux de service et les emplois du temps, alors nous disposerions d'un moyen efficace de jouer à Candy Crush. C'est toute la puissance de la réduction de problème.

**Pourquoi
ne pas profiter de
Candy Crush
pour que les joueurs
effectuent des calculs
longs et utiles ?**

La prochaine fois que vous calez pour résoudre une grille de Candy Crush avec le nombre de coups impartis, vous pourrez vous consoler en sachant que c'était un problème mathématiquement difficile à résoudre. De fait, cette caractéristique participe sans doute à l'attrait du jeu et à son caractère addictif. S'il était aussi facile à résoudre que le morpion, par exemple, il ne serait sans doute pas aussi captivant.

Au cœur de tout cela, il y a la belle notion de réduction de problème, qui a permis aux informaticiens de simplifier le labyrinthe des différents problèmes calculatoires en un nombre plus petit de classes fondamentales telles que P et NP, que les informaticiens appellent le zoo

de la complexité. Actuellement, ce zoo contient 500 classes de problèmes.

Dans l'hypothèse improbable où l'on démontrerait que $P=NP$, le nombre de classes distinctes du zoo de la complexité chuterait brutalement. De nombreuses classes se révéleraient être identiques. En revanche, si $P \neq NP$, comme le croient la plupart des informaticiens, alors le zoo contient effectivement de nombreuses classes distinctes de problèmes. En fait, le zoo continue à s'élargir. Les zoologistes de la complexité ont récemment introduit de nouvelles classes pour décrire la complexité des problèmes que pourraient résoudre de futurs ordinateurs quantiques.

L'idée de réduction de problème offre une possibilité intéressante pour les mordus de Candy Crush. Peut-être pourrait-on tirer parti des millions d'heures passées par l'humanité à résoudre des grilles de Candy Crush ? En exploitant l'idée de réduction de problème, nous pourrions dissimuler des problèmes calculatoires utiles dans ces casse-tête.

D'autres problèmes calculatoires bénéficient de telles interactions : chaque fois que vous prouvez à un site web que vous êtes une personne et non un robot en résolvant un Captcha (acronyme de *Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart*, « test de Turing complètement automatisé pour distinguer les ordinateurs des humains » – un tel test vous demande de taper une séquence de lettres et chiffres apparaissant déformés à l'écran), la réponse aide Google à numériser les anciens ouvrages et journaux. Peut-être devrions-nous atteler les casse-tête de Candy Crush à des tâches non moins importantes !

Nos études de Candy Crush nous ont inspiré un profond respect pour ce passe-temps apparemment anodin. Il offre un éclairage original sur l'une des questions ouvertes les plus importantes des mathématiques d'aujourd'hui, et les implications de cette question s'étendent à de nombreuses applications telles que les algorithmes de chiffrement utilisés pour garantir la sécurité des comptes bancaires. Vous pourrez ainsi expliquer ces enjeux supérieurs à votre patron la prochaine fois qu'il vous surprend à essayer de vous hisser un niveau plus haut ! ■

Changement

Les mauvaises

La montée du niveau des mers menace à long terme les populations des îles coralliennes. Mais l'aide précipitée qu'on leur apporte menace de leur faire plus de mal que de bien. Le cas des îles Kiribati, dans le Pacifique, illustre bien cette situation.

climatique

solutions de Kiribati

Simon Donner

L'ESSENTIEL

- À long terme, l'habitat des petites nations des îles coralliennes risque d'être réduit par la montée du niveau de la mer.
- Nombre d'organisations et d'États investissent de façon précipitée pour sauver ces nations pauvres de la menace, ce qui crée des problèmes inattendus.
- Pour l'heure, la sédimentation a agrandi certaines îles, tandis qu'aucun lieu habité n'a été submergé.
- L'accompagnement international de ces nations insulaires devrait être repensé à plus long terme.

Claire Martin Institute

LA MOITIÉ DE LA POPULATION des Kiribati vit dans l'atoll de Tarawa, formé d'étroites et luxuriantes îles.

Une fois de plus, j'ai atterri en serrant les dents pendant que l'avion roulait vite, bien trop vite, sur l'unique piste de l'aéroport de Tarawa-Sud. J'étais à trois jours de la fin d'un périple de trois semaines dans l'archipel de Kiribati et j'ai enfin vu ce que j'étais venu voir : l'océan en train de noyer une île corallienne.

Aidé par les grandes marées annuelles, le vent de nord-ouest poussait les vagues par-dessus les digues, de sorte que la mer envahissait les routes et les maisons de l'atoll surpeuplé, qui est aussi la capitale de l'État-archipel de Kiribati. Pour la première fois depuis qu'il y avait un marégraphe à Kiribati, la marée est montée ce jour-là trois mètres au-dessus de son niveau de référence... Persuadé que l'impact du réchauffement climatique serait évident dans ce pays en développement et manquant de

L'AUTEUR



Simon DONNER est maître de conférences en climatologie au département de géographie de l'université de la Colombie-Britannique, à Vancouver au Canada.

savoir-faire technique, j'étais venu constater le phénomène sur place. J'étais servi : nous étions alors en 2005 et le futur était arrivé !

Nous sommes aujourd'hui en 2015 et aucune des îles coralliennes de l'archipel de Kiribati n'est noyée. Je suis par ailleurs revenu dix fois étudier l'adaptation de la petite nation kiribatienne aux effets du réchauffement climatique, et jamais le marégraphe n'est remonté au niveau de 2005... Pour autant, la menace que la montée des océans fait peser sur les îles basses, telles Tuvalu, les îles Marshall, les Maldives ou encore les Kiribati est bien réelle... mais à long terme. À court terme, les efforts précipités et les nombreuses bonnes intentions de la communauté internationale pourraient faire plus de mal que de bien. Il n'est pas urgent de réparer les îles, ni de les évacuer, comme je vais l'expliquer ici.

Au cours des dix années passées à étudier le climat et le régime des marées de Kiribati, j'ai aussi étudié leurs habitants et ils m'ont étudié. Ils m'ont par exemple testé en m'invitant à m'asseoir pendant des heures en tailleur dans leurs assemblées ; ils m'ont demandé des miracles pour réparer sans outils leur matériel de plongée, m'ont soigné de la dengue et fait aussi bénir par leurs anciens... Infiniment plus instructive que tout ce que j'aurais pu faire depuis mon bureau, cette expérience de terrain m'a ouvert les yeux : non, les Kiribatiens ne sont pas de pauvres victimes sans défense face à la mer ; il est clair qu'actuellement, ils n'ont pas besoin d'ériger des murs ou d'évacuer des habitants ; ce dont ils ont besoin, c'est d'élaborer des



LES KIRIBATIENS disposent de mille moyens d'agir contre la menace océanique. Ci-dessus, une femme et son fils sont en train d'entretenir la digue qui les protège. Ci-contre, un homme a choisi de vivre dans une maison sur pilotis.



DES ÎLES PLATES ET DISTANTES LES UNES DES AUTRES

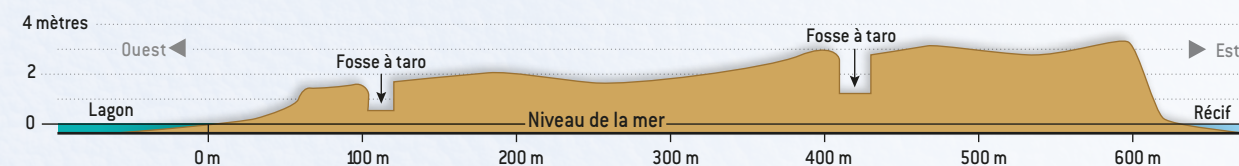
Reef-Island topography and the vulnerability of Atolls to sea-level Rise : Colin D. Woodroffe, in *Global and Planetary Change*, vol. 62 nos 1-2 : May 2008



La république des Kiribati comprend trois archipels : les îles Gilbert, Phoenix et de la Ligne. En tout, 33 îles coralliennes et atolls (lagons délimités par un anneau d'îles coralliennes) la composent, dont 21 sont inhabités. La superficie totale (811 kilomètres carrés) des îles Kiribati est fragmentée sur 3,5 millions de kilomètres carrés d'océan, soit l'équivalent de l'Inde. Environ la moitié des 103 000 Kiribatiens vivent autour de l'atoll de Tarawa (à gauche). La plupart des îles coralliennes de ces atolls ne font que quelques centaines de mètres de large et présentent des profils similaires : une pente douce du côté lagon menant, du côté océan, à un « talus » dont la hauteur peut atteindre 4 mètres. Sur les îles, les accidents de terrain les plus marqués sont les fosses à cultiver le taro, un tubercule tropical.



FORME DE L'ÎLE DE BUOTA



plans de défenses à long terme réalistes et d'une aide internationale durable pour les concevoir et les mettre en œuvre.

En kiribatien, Kiribati se prononce *Ki-ra-bass*, un nom devenu emblématique des effets de la montée du niveau des mers pour les populations. De fait, la situation de cette petite nation perdue au milieu du Pacifique est étonnante : le vaste archipel qui lui sert de pays est le seul à être traversé à la fois par l'équateur et par la ligne de changement de date ; si l'on pouvait rassembler les îles kiribatiennes, leur superficie ne couvrirait que huit fois celle de Paris (105,4 km²), alors qu'elles sont dispersées sur une région grande comme l'Inde...

Les Kiribati comportent trois archipels : les îles Gilbert, les îles Phoenix et les îles de la Ligne. La plupart des 103 000 Kiribatiens habitent sur les îles Gilbert, dont les deux tiers de la surface se trouvent à moins de deux mètres au-dessus du niveau moyen de la mer. Les bandes de terre constituant ces îles sont si étroites que, debout sur la rive du lagon, on entend les vagues se briser

sur la rive maritime. De fait, si l'homme le plus rapide du monde décidait de sprinter à travers Tarawa-Sud, 20 secondes lui suffiraient, si du moins il parvenait à éviter les fosses creusées pour cultiver le taro (un tubercule tropical) ; il devrait aussi prendre garde aux mini-fourgons des années 1990 faisant office de bus et roulant à toute allure, et éviter d'entrer en collision avec un Kiribatien faisant ses besoins dans l'estran...

Un si charmant modèle de catastrophe climatique

Tarawa-Sud est un groupe d'îles gilbertiennes, où se trouve le siège du gouvernement. La moitié de la population de l'État-archipel s'y est installée. L'endroit est couvert d'habitations, d'immeubles gouvernementaux, de débris de construction, de tas d'ordures et d'épaves datant de la Seconde Guerre mondiale, et manque de canalisations et de toilettes en bon état.

Dès lors, il n'est pas étonnant que lorsqu'elle a recherché la nation insulaire

la plus vulnérable aux effets du réchauffement climatique, la Banque mondiale ait arrêté son choix sur les Kiribati, où elle a implanté une agence. Conséquence : chaque semaine, la présidence des Kiribati reçoit jusqu'à cinq demandes de reportage de médias étrangers sur un petit pays pauvre qui se bat seul contre la montée de la mer, à en croire l'attaché de presse de la présidence.

La réalité est que les Kiribatiens perdent du terrain à la mer, mais... en gagnent aussi. Si l'érosion et les inondations marines grignotent de la surface insulaire, la sédimentation en produit ailleurs. Ce bilan entre pertes et gains de terre a toujours existé. De plus, une partie des submersions ne peut être imputée à la montée des océans, du moins pas encore...

Les îles coralliennes sont des formations géologiques parmi les plus jeunes de la Terre, à tel point que certains séquoias de Californie (des conifères géants pouvant vivre plusieurs milliers d'années) sont plus anciens que la plupart des atolls de

Kiribati... Notre compréhension des atolls est aussi relativement récente, puisqu'elle date de Charles Darwin qui, au cours de son voyage sur le *Beagle*, fut le premier à comprendre que les atolls étaient édifiés par les coraux poussant sur les pentes de volcans en train de s'enfoncer. On a longtemps ignoré à quel point la théorie de Darwin était juste, puis, dans les années 1950, des forages dans les îles Marshall, en préparation d'essais nucléaires de l'armée américaine, l'ont démontrée.

En fait, les coraux sont des organismes symbiotiques, dont l'un des partenaires est une micro-algue (organisme pratiquant la photosynthèse), tandis que l'autre est un polype (organisme du groupe des

cnidaires, auquel appartiennent aussi les méduses) qui a la particularité de sécréter un exosquelette de calcaire. Pour profiter le plus possible de la lumière, les coraux se rapprochent de la surface en poussant les uns sur les autres et finissent à la longue par édifier de grands récifs autour des volcans océaniques en voie d'érosion (voir l'encadré ci-dessous).

Des îles nées de récifs coralliens morts

Généralement, les socles calcaires sur lesquels reposent les récifs coralliens se sont construits au cours du dernier âge glaciaire, quand le niveau marin était bien plus bas

qu'aujourd'hui. Puis la mer a monté, a envahi et submergé les anneaux récifaux, ce qui a déclenché leur croissance, laquelle s'est poursuivie jusqu'à atteindre ou dépasser la surface. Les coraux qui la dépassent meurent, mais les anneaux qu'ils forment piègent le sable et les sédiments produits par l'érosion d'autres coraux. Des plages se forment puis s'étendent. Le vent y dispersant les graines, la végétation envahit peu à peu les terres ainsi formées, ce qui favorise de nouvelles accumulations sédimentaires, et ainsi de suite jusqu'à la formation de véritables îles constituées de débris déposés sur des récifs coralliens morts.

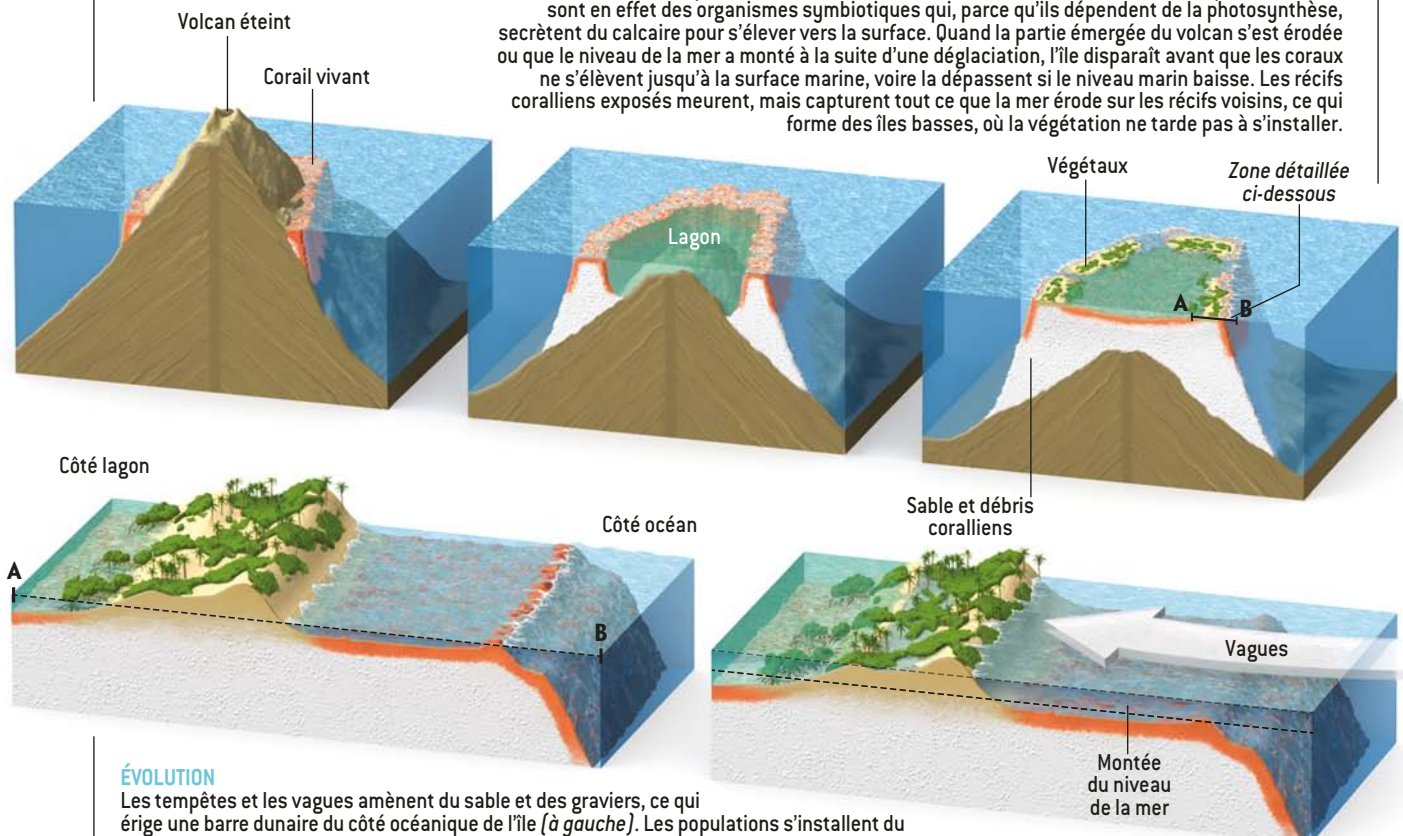
Encore récemment, les chercheurs supposaient que ces accumulations

LA MONTÉE ET LA CHUTE DES ATOLLS

Les îles d'un atoll évoluent avec le temps, de sorte qu'elles peuvent considérablement en quelques siècles seulement. Lorsque la mer monte, l'évolution des îles est variable : parfois, les courants marins contribuent à édifier une île en lui apportant des sédiments tout en érodant sa voisine, à qui ils en enlèvent. Sans qu'on l'ait toujours prévu, même l'édification d'une jetée ou d'un débarcadère peut altérer l'équilibre d'une île.

FORMATION

L'anneau corallien qui formera le futur atoll se construit autour d'une île volcanique. Les coraux sont en effet des organismes symbiotiques qui, parce qu'ils dépendent de la photosynthèse, sécrètent du calcaire pour s'élever vers la surface. Quand la partie émergée du volcan s'est érodée ou que le niveau de la mer a monté à la suite d'une déglaciation, l'île disparaît avant que les coraux ne s'élèvent jusqu'à la surface marine, voire la dépassent si le niveau marin baisse. Les récifs coralliens exposés meurent, mais capturent tout ce que la mer érode sur les récifs voisins, ce qui forme des îles basses, où la végétation ne tarde pas à s'installer.



ÉVOLUTION

Les tempêtes et les vagues amènent du sable et des graviers, ce qui érige une barre dunaire du côté océanique de l'île (à gauche). Les populations s'installent du côté lagon où le terrain est plat et laissent les terres fertiles de l'intérieur de l'île disponibles pour l'agroforesterie. Quand la mer monte (à droite), les vagues peuvent éroder le bandeau dunaire, et il arrive qu'elles inondent le lagon, salinisent l'eau du sol, ce qui tue la végétation. Si la montée du niveau de la mer est lente, du sable et du gravier peuvent s'accumuler assez vite pour maintenir le cordon dunaire ; en revanche, quand la montée est rapide, il arrive que des inondations marines découpent les anciennes terres émergées en morceaux.

Emily Cooper

sédimentaires s'étaient produites peu après la dernière débâcle glaciaire, quand le niveau marin a fini de s'élever puis commencé une lente baisse. Toutefois, au cours des deux dernières décennies, des géologues, tel Paul Kench de l'université d'Auckland en Nouvelle-Zélande, ont montré que certains atolls ont poussé au-dessus de la surface alors que la mer montait encore. Comme l'ont souligné Conrad Neumann de l'université de Caroline du Nord et Ian MacIntyre de la Smithsonian Institution, les îles coralliennes « n'abandonnent pas » forcément face à la mer, et pourraient même être capables de « se maintenir » à la surface ou de la « rattraper ». Tout dépend de l'équilibre entre la montée du niveau marin et le rythme d'accumulation des sédiments.

Plusieurs facteurs qui influencent le trait côtier

C'est là précisément le point qui complique la prévision du futur kiribatien. La trajectoire des courants océaniques, la forme des récifs environnants, les angles côtiers, voire les infrastructures empiétant sur l'eau, tout cela influence l'évolution du trait côtier, qui reculera ici et avancera là bas... Et tous les phénomènes complexes à prendre en compte varient d'une année sur l'autre, comme d'ailleurs le niveau océanique. Résultat : aux Kiribati, certaines îles s'étendent tandis que d'autres se réduisent.

Toutefois, le fait que certaines îles puissent s'agrandir n'est pas la seule raison de ne pas céder à la panique pour les Kiribati. Malgré l'impression créée par les médias, aux Kiribati, à Tuvalu et dans d'autres archipels comparables, les invasions marines ne sont pas quotidiennes. Certes, le changement climatique rend les attaques de la mer plus probables, mais pour autant, le niveau océanique local continue de dépendre avant tout du régime des marées, de la météorologie marine et de la dynamique des océans à grande échelle.

Cette variabilité n'est nulle part ailleurs plus visible qu'aux Kiribati. L'archipel subit en effet le phénomène El Niño, une interaction entre l'océan Pacifique et l'atmosphère si puissante qu'elle perturbe régulièrement le climat terrestre. L'influence d'El Niño sur les vents équatoriaux et les courants fait régulièrement monter le niveau de la mer

aux Kiribati. Ainsi, à Tarawa, la différence entre le niveau marin durant l'épisode d'El Niño en 1997 et l'épisode de La Niña, le mécanisme climatique contraire, l'année suivante, a atteint 45 centimètres... Pour des terres aussi plates et basses que celles des Kiribati, cela représente la hauteur d'une colline !

L'invasion marine de 2005 n'était en fait rien d'autre qu'un épisode d'El Niño : une vaste dépression avait poussé un renflement d'eau vers Tarawa au moment même des grandes marées annuelles. L'inondation était donc le produit de la conjonction de phénomènes naturels normaux, et non pas la manifestation de quelque chose de nouveau : l'élévation du niveau des mers. Les effets conjoints d'El Niño, des facteurs météorologiques et des marées rendent l'influence de la montée du niveau marin difficile à appréhender.

Cela n'empêchera sans doute pas d'évoquer systématiquement la montée du niveau marin quand on cherchera à analyser les séquelles de l'invasion marine de 2005. Le désir de trouver des exemples de lieux et de populations affectés par le changement climatique est si grand que la ligne de séparation entre ce qui *ressemble* à une montée du niveau marin et ce qui *est* vraiment devient floue.

Si tout le monde a l'impression que les Kiribati sont en train de se noyer, c'est seulement parce que leur situation n'a pas été décrite correctement. De fait, la plupart des reportages sur la situation des Kiribati montrent Bikenikoura, un village implanté sur un banc de sable bordé par une mangrove, toujours partiellement inondé durant les grandes marées.

Les autorités des Kiribati sont submergées de demandes de visites de sites menacés. Pour y faire face, elles dirigent les journalistes et les dignitaires, comme le secrétaire général de l'ONU Ban Ki Moon, vers Bikenikoura. « C'est en quelque sorte notre cas d'école », explique Rimón Rimón, le chargé des relations publiques de la présidence. Les visiteurs sont tout contents d'observer la marée envahir la *maneaba*, la maison commune servant aux rassemblements de la communauté. Ils rentrent ensuite dans leurs pays raconter l'histoire d'un pays que la mer engloutit.

En réalité, Bikenikoura, la « plage dorée », n'est en rien caractéristique de ce qui se passe dans cet archipel surpeuplé. Ce village a en effet été créé de toutes

Le corail, animal ou algue ?

Le corail est formé par des colonies d'un animal du même embranchement que les méduses : les cnidaires. Nommés polypes, les individus ont la particularité de sécréter un exosquelette à leur base. Suivant les espèces, cet exosquelette est mou ou dur et, dans ce cas, à base de carbonate de calcium. De nombreuses espèces de corail vivent en symbiose avec des végétaux unicellulaires, dont, dans les mers chaudes, la xanthelle, une micro-algue pratiquant la photosynthèse.

■ BIBLIOGRAPHIE

E. Longépée, *Les atolls, des territoires menacés par le changement climatique global ? L'exemple de Kiribati* (Pacifique Sud), *Géococonfluences*, en ligne le 16 avril 2015 (<http://bit.ly/1FD1xgA>).

S. Donner et S. Webber, *Obstacles to climate change adaptation decisions: A case study of sea-level rise and coastal protection measures in Kiribati*, *Sustainability Science*, vol. 9(3), pp. 331-345, 2014.

E. Longépée, *La résilience des systèmes socio-écologiques des États atolliens dans le contexte du changement climatique. Le cas de Kiribati* (Pacifique Sud), thèse, université de La Rochelle, 2014.

E. Rankey, *Nature and stability of atoll island shorelines: Gilbert island chain, Kiribati, equatorial Pacific*, *Sedimentology*, vol. 58(7), pp. 1831-1859, 2011.

pièces par Les assemblées de Dieu, un mouvement évangélique qui cherchait à loger des immigrants issus d'autres îles de l'archipel venus chercher du travail à Tarawa-Sud. C'est par manque de terrain disponible que l'association religieuse a investi cette plage, ce qui n'a rien d'étonnant, puisqu'aux Kiribati, comme dans de nombreux pays du monde, la surpopulation et la pression économique créent un exode rural. En ville, les nouveaux arrivants s'installent en périphérie sur les seuls terrains disponibles, souvent peu sûrs. La côte du lagon de Tarawa-Sud est pour cette raison parsemée de digues détruites et de marais envahis par la mer, qui témoignent des nombreuses tentatives ratées de repousser la mer.

Pour les touristes du réchauffement climatique, l'autre village emblématique de la montée des eaux est Tebunginako. Toutefois, voir dans sa situation le résultat du réchauffement climatique est aussi de l'ordre du malentendu. Le caractère inondable de Tebunginako résulte d'un événement fortuit : l'obstruction par une tempête du canal naturel qui reliait la mer au lagon. C'est en tout cas l'interprétation donnée dans un rapport de la

SOPAC (*South Pacific Applied Geoscience Commission* ou Commission pour les géosciences appliquées dans le Pacifique Sud, dont fait partie la France). L'ancien nom du lieu jouxtant le village est d'ailleurs Terawabono, qui signifie « canal bouché ».

La mer monte. Et le niveau du débat ?

L'invasion par les eaux marines d'endroits comme Bikenikoura et Tebunginako n'est donc pas due au réchauffement climatique. Mais se rendre aux Kiribati pendant une semaine dans le but explicite d'être témoin des impacts de la montée du niveau marin crée une boucle de rétroaction interculturelle, qui ne fait que renforcer l'idée que ces îles tropicales sont des microcosmes vulnérables qui souffrent dès à présent du réchauffement climatique.

Cette vision naïve, combinée avec le caractère réservé des Kiribatiens et le manque de scientifiques locaux capables de vérifier les affirmations qui circulent, fait que tout village subissant une inondation marine devient une victime évidente du réchauffement climatique. Ajoutez à cela un peu de géopolitique et le fait qu'une

Kiribati dans le catastrophisme des discours

Dans cet article, Simon Donner dénonce les récits journalistiques ou officiels erronés, selon lesquels les Kiribati seraient déjà fortement atteintes par le changement climatique. Il a raison : le catastrophisme des discours politiques et médiatiques est très loin de la réalité du terrain. Pour autant, tout ne va pas bien : le changement climatique est une menace réelle sur les Kiribati.

La science a ses limites, et les chercheurs ne sont pas encore en mesure de se prononcer précisément à propos de l'impact climatique sur les atolls. Ce qui est sûr, c'est qu'à Kiribati, la mer monte de 2,5 millimètres par an depuis 1950 et on estime qu'en 2090 le niveau marin sera plus haut de 40 à 61 centimètres par rapport au niveau actuel, ce qui ne sera pas sans conséquences.

Les travaux d'Arthur Webb et de Paul Kench publiés en 2010 ont montré que des îles coralliennes situées dans les secteurs où la

mer monte conservaient leur superficie ou même s'agrandissaient. Mais Simon Donner n'insiste pas suffisamment ici sur le rôle joué par l'homme dans ces expansions. Par exemple, à Tarawa, un remblai de 3,4 km² a été construit. Ce n'est pas rien pour un atoll dont la superficie de terre émergée est de 31 km² ! Afin de mieux appréhender l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur ces territoires, il faudrait faire ce type d'étude sur des îles coralliennes inhabitées. Cela n'a pas encore été fait. S'agissant du rôle protecteur

des coraux pour les îles, il est vrai que si la mer ne monte pas trop vite pour eux, ils pourraient contribuer au maintien des îles coralliennes. Mais un autre problème se pose : le blanchissement corallien, c'est-à-dire la mortalité des algues des coraux en raison de températures extrêmes des eaux océaniques, de fortes salinités ou de polluants, que le changement climatique amplifie, sans oublier les effets nocifs des activités humaines et l'acidification des océans. Seuls des coraux vivants et en bonne santé pourront suivre l'élévation du niveau de la mer autour d'une île. La question est donc comment s'adapter face à une menace climatique mal comprise. Simon Donner dénonce la dangerosité des aides dispensées dans l'urgence et inadaptées aux besoins locaux. Dans ces pays

sous intraveineuses financières, de nombreuses actions aberrantes sont entreprises pour remédier « aux problèmes de développement » et l'attentisme tend à se développer chez les populations. Il est donc primordial de prendre le temps de comprendre ces milieux atolliens et les communautés insulaires pour mener des actions de développement utile. Il s'agit notamment de s'intéresser aux connaissances et aux techniques locales sans pour autant les surestimer. Il est malin de construire une maison sur pilotis en zone submersible, il est beaucoup moins de construire un mur de protection en pierres coralliennes qui contrarie des processus naturels aidant à se défendre contre l'élévation du niveau de la mer.

— Esméralda Longépée
Géographe, UMR PRODIG 8586, CNRS

QUAND DE L'EAU MARINE PÉNÈTRE DANS LES TERRES, elle infiltre le sol sableux, ce qui peut tuer les cocotiers (*ci-dessous*), rendre les puits saumâtres (*ci-contre*) et endommager les cultures, par exemple les plants de taro, végétal aux racines comestibles que les insulaires cultivent dans des fosses (*en bas*).



© Justin McManus Getty Images



David Gray/Corbis



© Justin McManus Getty Images

petite nation ne peut que légitimement aspirer à ce que les menaces pesant sur son avenir soient reconnues, et les exagérations kiribatiennes de l'impact du réchauffement sur l'archipel paraîtront intentionnelles, qu'elles le soient ou pas.

Pour certaines îles, la superficie augmente

Une exagération, quelle que soit sa motivation, provoque inévitablement une réaction. Ce retour de bâton a commencé en 2010 par un article de Paul Kench et de son collègue Arthur Webb, un spécialiste de géologie côtière, à l'époque à la SOPAC. Ces deux chercheurs ont étudié 27 îles coralliennes des Kiribati, de Tuvalu et des États fédérés de Micronésie pour lesquelles on dispose d'anciennes photographies aériennes. Ils ont trouvé que 23 d'entre elles

avaient augmenté en superficie ou étaient restées stables pendant les décennies qui viennent de s'écouler. Même si l'on n'en dispose pas pour l'ensemble des nations du Pacifique, ces données indiquent une tendance. Des résultats similaires ont du reste été rapportés pour des atolls de la Polynésie française.

Ces constatations signifient que, pour le moment, les courants dominants, le développement côtier et d'autres facteurs naturels ont davantage influencé les surfaces insulaires que la montée du niveau de la mer. Paul Kench et Arthur Webb notent par exemple que le renforcement naturel de la côte du lagon a augmenté la surface de l'île non urbanisée de Buariki de 2 % depuis 1943. Sur les îles urbanisées, l'activité humaine s'est souvent traduite, par inadvertance, par une bien plus grande augmentation de

la superficie. Ainsi, les chaussées que l'on a construites des années durant pour relier les différentes îles de Tarawa-Sud ont bloqué le passage de l'eau, ce qui a dirigé le sable du lagon vers des îlots bondés, tel celui de Bairiki, où se trouve le centre gouvernemental : depuis 1969, sa superficie a augmenté de 16 % !

Ces études ne nous disent pas si les îles se sont élevées, si elles continueront à croître et à stocker de l'eau douce en quantité suffisante pour les hommes et les plantes. Bien entendu, elles peuvent s'éroder aussi, ce qui est évident pour n'importe quel touriste qui regarde à partir de la côte animée de Bairiki vers le lagon vide de l'îlot de Bikeman. Privé de son sable par la construction de la même chaussée qui a élargi Bairiki, Bikeman, ancienne tache verte sur les cartes coloniales britanniques, n'est plus qu'un banc de sable à peine visible à marée haute.



Justin McManus Getty Images

CETTE ROUTE RELIANT LES ÎLES DE BELIO ET BAIRIKI a été construite il y a plusieurs décennies. Depuis, elle a bloqué le flux d'eau et de sédiments qui circulait entre l'océan et le lagon, ce qui a modifié la forme des îles voisines. De même, les mesures d'urgence ont souvent des effets indirects, voire empirent le problème d'érosion qu'elles étaient censées régler.

Le discours politisé sur le changement climatique est moins nuancé que la science des îles coralliennes. Après la publication de l'article de Paul Kench et d'Arthur Webb, les gros titres se sont remplis de moqueries relatives aux affirmations passées que les Kiribati et d'autres nations insulaires étaient menacées par la montée du niveau des mers. La question de l'impact actuel de ce phénomène est devenue une sorte de match entre le président Anote Tong, soutenu par certains activistes, et les sceptiques, tant parmi les Kiribatiens qu'à l'extérieur, qui soupçonnent la présidence d'exploiter le débat sur la montée des eaux pour attirer l'attention et des fonds internationaux.

Trop de rumeurs médiatiques

Qu'en est-il en fait ? La bonne nouvelle qu'apportent les recherches est que les îles coralliennes évoluent, ce qui peut donner du temps – plusieurs décennies sans doute – pour que des endroits comme Kiribati s'adaptent. Pas pour qu'ils soient évacués ! La mauvaise nouvelle est que les rumeurs médiatiques annonçant la submersion des îles compliquent le travail d'adaptation à accomplir, alors que cette tâche est déjà si difficile...

Les Kiribati sont, il est vrai, en danger à long terme. Toutefois, souligner

exagérément leur vulnérabilité nuit aux intérêts des insulaires. En voici un exemple. Les habitants des îles du sud de l'archipel des Gilbert, où la sécheresse règne souvent, sont réputés aux Kiribati pour leur dureté au travail et leur esprit communautaire. Or, quand l'eau du puits de l'une de ces îles est devenue saumâtre, il y a quelques années, ils ont curieusement baissé les bras et blâmé le réchauffement climatique. Ils n'avaient pas soupçonné les pompes à énergie solaire qu'on leur avait fournies en remplacement de leurs anciennes pompes à essence. Appelé à la rescousse, un consultant a découvert que ces pompes, qui ne cessaient jamais de fonctionner, avaient drainé toute l'eau douce... Le problème a été corrigé depuis, mais cet incident illustre les effets pervers produits quand des étrangers bien intentionnés accourent sauver les insulaires... Le discours ambiant sur la menace climatique peut conduire les gens les plus autonomes à blâmer le monde pour leurs problèmes, au lieu d'agir.

L'insistance sur la vulnérabilité pousse les médias et même le gouvernement des Kiribati à des mises en scène qui entraînent plus de trafic internet que de progrès concrets sur le terrain. Il pousse aussi les insulaires à se prétendre victimes : ainsi, un citoyen des Kiribati a demandé un statut de réfugié en Nouvelle-Zélande,

en arguant du fait que le changement climatique menacerait sa maison... En réalité, il souhaitait surtout rester dans ce pays. De même, récemment, l'achat de terres aux îles Fidji par le gouvernement des Kiribati, en réalité à des fins alimentaires ou autres, a été présenté comme la préparation d'une solution de repli pour les groupes insulaires les plus menacés, et les opposants politiques du président Tong n'y ont vu qu'une comédie publicitaire.

Pour autant, il est vrai qu'au cours des prochaines décennies, les îles coralliennes basses devront relever un grand défi, celui de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques. Pour cela, il ne suffira pas d'acheter des terres hors d'eau ou de recevoir des aides limitées : il faudra des années de travail et un investissement à long terme de la communauté internationale.

Faire face au défi climatique requiert une ingénierie spécifique

L'un des projets, le *Programme d'adaptation des Kiribati* financé par la Banque mondiale, a déjà montré à quel point l'adaptation de l'archipel est une tâche difficile. Pas moins de huit ans de consultation, de formation, de développement de politique et d'identification des priorités ont été nécessaires pour que le projet aboutisse en 2011 à du concret : quelques digues, notamment au bout de la piste d'un aéroport, et des parties de deux chaussées. Sous la pression des donateurs, du gouvernement de Kiribati et du public, les chefs de projets et les entreprises se sont unis autour d'un concept simple, susceptible d'être réutilisé à l'avenir. Hélas, la solution résultant de tous les compromis ne comprenait aucune des mesures coûteuses de réduction de l'énergie des vagues et de l'érosion qui avaient été recommandées par les experts.

Résultat : en quelques mois, les extrémités de digues tout juste construites furent endommagées par les vagues et l'érosion des plages adjacentes, ce qui dans un cas mit à nu le tuyau d'acheminement de l'eau potable à Tarawa-Sud. On montra du doigt la Banque mondiale et les donateurs internationaux pour la lenteur et la rigidité de leurs procédures. Quant aux chefs de projets et au gouvernement des Kiribati, ils furent vertement critiqués pour ne pas

avoir mieux évalué les éventuels impacts négatifs des digues.

Cet échec pourrait encore être transformé en succès : on restaure actuellement les digues en leur donnant un profil plus incliné et en les couvrant de végétation afin d'absorber une partie de l'énergie des vagues. Les chefs de projets ont aussi changé leurs méthodes afin de tenir compte de l'expérience acquise. Manifestement, dans les Kiribati, faire face au défi climatique implique d'apprendre des erreurs du passé afin de développer les bonnes techniques de résistance face à la mer.

Se préparer aux changements à venir

La redécouverte du fait que les îles coralliennes évoluent, et pas toujours pour s'amenuiser, ne sauvera pas les Kiribati si l'humanité échoue à réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Les projections des modèles climatiques montrent que si nous restons sur la trajectoire actuelle d'émission, le niveau de la mer augmentera cinq fois plus vite qu'aujourd'hui d'ici la fin du

siècle. Même dans l'hypothèse favorable où nombre d'îles coralliennes continueront à accumuler des sédiments comme aujourd'hui, leurs superficies se réduiront, de sorte que leurs côtes deviendront abruptes et qu'elles stockeront moins d'eau douce, ce qui les rendrait moins habitables.

Il serait pratique que Tarawa ou Malé, l'île-capitale des Maldives, puissent s'élever à mesure que la mer monte. Toutefois, nous ne sommes plus à l'époque où les maisons insulaires, toutes couvertes de chaume, ne duraient en moyenne que sept ans : les îles sont aujourd'hui couvertes de routes, de maisons en dur, d'hôpitaux, d'aéroports, etc., ce qui gêne le dépôt naturel de sédiments. Ainsi, soit l'infrastructure empêche la sédimentation naturelle, soit l'évolution des îles pourrait obliger à la déplacer, ce qui est coûteux ou irréaliste. Quant au déplacement de populations entières sur les îles moins peuplées, comme le vaste et sec atoll de Kiritimati situé à des milliers de kilomètres à l'est de Tarawa, il serait insensé.

Plutôt que de se lancer dans cette voie hasardeuse, Kiribati a lancé le projet

Migration with dignity (« Migration dans la dignité ») à la recherche de pays à la population vieillissante, telle l'Australie, susceptible d'accueillir des travailleurs immigrés issus de la jeunesse kiribatienne. L'idée est que si la population doit quitter un jour l'archipel, elle pourra rejoindre une communauté expatriée déjà intégrée, plutôt que de devenir une population de réfugiés dispersée et soumise à tous les aléas.

Cette initiative doit faire comprendre au reste du monde qu'au lieu de lui faire jouer un rôle narratif dans le débat sur le changement climatique, du genre « Il faut réduire les émissions de gaz à effet de serre afin de sauver ces insulaires de la noyade », ou de faire-valoir d'une aide au développement dispensée en dépit de bon sens, le peuple des Kiribati a besoin qu'on le respecte. Concrètement, cela implique que dans le cadre de relations durables, il faut l'aider à faire face à son futur. En 2005, je me suis rendu aux Kiribati, pensant que trois semaines suffiraient pour comprendre comment le problème du changement climatique s'y pose. Dix ans plus tard, j'essaie toujours de l'appréhender. ■

Toutes les ARCHIVES

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis

1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr*

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.



LORS D'HIVERS TRÈS FROIDS
au XVII^e siècle, les fleuves
gelaient, telle la Tamise
en 1677, ici peinte à l'époque
par Abraham de Hondt. Enfin,
les savants pouvaient étudier
le gel de l'eau mouvante.

L'eau qui gèle, une énigme au temps des Lumières

Frédérique Rémy

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, de nombreux savants ont tenté de comprendre comment la glace se forme dans l'eau, les fleuves et la mer. Ils se sont longtemps empêtrés, en partie à cause d'un vocabulaire inapproprié.

