SEPTEMBRE 2021

Peut-on sauver Istanbul d'un mégaséisme?

Chasse aux neutrinos au fond d'un lac russe

QUÉBEC SCIENCE

Ces gaz qui nous polluent la vie



Certains réchauffent l'atmosphère, d'autres empoisonnent l'air. Il est temps de renverser la vapeur.

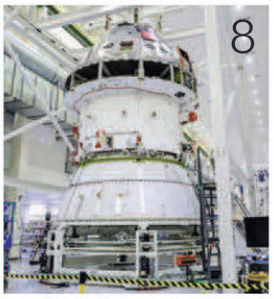

UNE ÎLE AU TRÉSOR
GRANDE RÉOUVERTURE
BIOSPHÈRE
RÉSERVEZ EN LIGNE
JEAN-DRAPEAU
espacepourlavie.ca
Environnement et Changement climatique Canada
Environment and Climate Change Canada
Québec
Montréal
espace pour la vie montréal

SOMMAIRE



ILLUSTRATION DE LA COUVERTURE : FRANÇOIS BERGER









DOSSIER SPÉCIAL

Ces gaz qui nous polluent la vie

20 CO_2 : opération enfouissement
Capter le dioxyde de carbone dans l'air pour le renvoyer sous terre ? La solution est controversée.

26 Le mal de l'air
Nous respirons quotidiennement 12 000 litres d'air. Est-il sain ?

32 Pergélisol : la lente fuite
Le dégel du pergélisol n'est pas aussi brutal qu'on le pensait, mais les communautés locales restent inquiètes.

35 Traquer le méthane à partir de l'espace
Une entreprise québécoise repère les fuites de méthane grâce à ses satellites.

38 Revisiter un air d'autrefois
Des archives d'échantillons d'air retracent l'histoire de gaz nocifs pour la couche d'ozone ou le climat.

REPORTAGES

41 C'est quoi, être un homme ?
L'implantation d'une culture de la masculinité positive en Afrique subsaharienne se heurte à l'histoire, aux religions et à la pauvreté.

46 Avant que la terre tremble
Un mégaséisme guette Istanbul. La mégapole est-elle prête ?

SUR LE VIF

6 LE CABINET DES CURIOSITÉS
Un détecteur installé au fond du lac Baïkal tentera d'intercepter des neutrinos cosmiques.

8 VERS UN RETOUR SUR LA LUNE
Les Américains ont amorcé le programme Artemis. Et ça commence avec le vol d'essai d'*Orion*.

10 DANS LA PEAU D'UNE PERSONNE NOIRE
La réalité virtuelle peut-elle réduire les préjugés raciaux ?

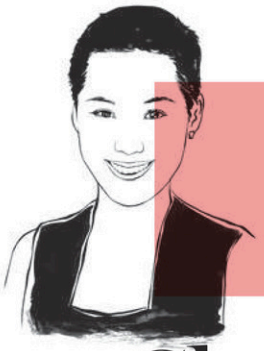
11 EINSTEIN ET SA BOULE DE CRISTAL
Une lettre montre que le savant imaginait déjà les oiseaux comme une clé pour comprendre des phénomènes physiques.

14 VIVE LES DONNÉES LIBRES !
Dominique Roche milite pour que tous accèdent aux données brutes des chercheurs pour faire avancer le savoir.

CHERCHEUSE EN VEDETTE

50 SUS AUX CONTAMINANTS !
Valérie Langlois étudie les répercussions des contaminants sur les vertébrés et sensibilise le public à cette question.

4 **Éditorial** Par Marie Lambert-Chan | 5 **Babillard** | 9 **Carnet de santé** Par la Dre Alexandra S. Arbour
11 **Technopop** Par Chloé Freslon | 12 **Polémique** Par Jean-François Cliche | 52 **Culture** Par Émilie Folie-Boivin
54 **Rétroviseur** Par Saturnome



MARIE LAMBERT-CHAN @MLambertChan

Éditorial

Chercheuses à *boutte*

La situation des mères scientifiques s'est aggravée pendant la pandémie. Plus que jamais, il est nécessaire de les soutenir.

Troy Littleton ne croyait pas causer une telle commotion dans la twittosphère en publiant une photo de son bureau où l'on voyait, coincé entre sa table de travail et un classeur, un parc portatif décoré de motifs d'animaux. « Mon achat d'équipement préféré pour le laboratoire ! » a écrit ce professeur de biologie du Massachusetts Institute of Technology. Le lit accueille la petite Katie, âgée de neuf mois, afin que sa mère, Karen Cunningham, puisse poursuivre ses travaux de doctorat en attendant qu'une place en garderie se libère. Plusieurs ont salué la générosité du chercheur – ce à quoi il a répondu que la véritable héroïne est plutôt son étudiante. D'autres ont souligné que le geste, bien qu'honorable, est symptomatique d'un système qui en a trop peu fait pour les chercheuses qui ont des enfants.

On me dira que cette anecdote est typiquement américaine : comment faire autrement dans un pays qui n'offre pas de congés parentaux ni de services de garde abordables ? Cependant, même dans les contrées qui soutiennent les parents, être mère et scientifique n'a jamais été une sinécure. Les inégalités de genre persistent dans le milieu universitaire qui, pourtant, est souvent perçu comme progressiste. Évidemment, la pandémie a amplifié tous les obstacles qui se dressaient déjà sur leur route. Et les effets sont palpables et inquiétants.

Différents coups de sonde indiquent que les chercheuses sont à bout de souffle – à l'image de bien des femmes qui, peu importe leur emploi, ont porté le poids de la conciliation « travail-famille-école-garderie » à la maison. Au printemps, les Académies nationales des sciences, de l'ingénierie et de la médecine des États-Unis dévoilaient un rapport montrant que le confinement a nui de manière disproportionnée à la carrière et au bien-être des femmes scientifiques. Un sondage réalisé par le magazine spécialisé *The Chronicle of Higher Education* révèle que 75 % des chercheuses se sentent stressées (contre 59 % de leurs collègues masculins) alors que cette proportion était de 34 % un an avant la pandémie.

Leur contribution à la science s'en trouve affectée, forcément. Des analyses montrent qu'elles ont soumis moins d'articles que leurs confrères depuis le début de la pandémie. Ce qui ne veut pas dire qu'elles ont moins travaillé, au contraire : elles ont enseigné, soutenu des étudiants et des collègues en détresse, participé à des comités pour réorganiser le travail à distance… Une charge de travail invisible, rarement reconnue. Plusieurs femmes ont raconté avoir été ainsi réduites à travailler de nuit pour avancer leurs recherches.

Personne ne s'étonnera que les mères scientifiques en aient assez. Selon différentes études, elles sont désormais plus enclines à vouloir quitter le milieu universitaire, diminuer leurs heures de travail et décliner des postes de direction que les hommes et les femmes sans enfants. Que peut-on faire pour freiner ce repli qui creusera davantage la sous-représentation des femmes en science ?

De façon générale, il faut injecter de la souplesse et de l'empathie dans le milieu de la recherche – ce qui est beaucoup moins compliqué qu'on se l'imagine. Les Instituts de recherche en santé du Canada (IRSC) en ont fait la démonstration il y a un an, et les résultats ont été publiés par trois chercheuses québécoises dans les *Proceedings of the National Academy of Sciences*. En février 2020, alors que la panique gagnait la planète, l'organisme lançait un appel de projets pour financer des travaux sur le coronavirus. Les participants n'avaient qu'une semaine pour déposer leur dossier – ce qui est assez inhabituel, mais l'urgence de la situation semblait l'exiger. Cependant, la proportion de dossiers proposés par des femmes s'est elle aussi révélée inhabituelle : seulement 29 %, soit une baisse de sept points de pourcentage comparativement à des concours similaires. Effarés, les IRSC ont corrigé le tir lors d'un deuxième appel, annoncé au printemps 2020 : le délai est passé à 19 jours, la paperasse a été réduite et le sexe et le genre ont été pris en compte à toutes les étapes de révision des projets. Résultat : les femmes ont participé en plus grand nombre (39 %) et ont obtenu un taux de succès deux fois plus élevé (passant de 22 à 45 %).

En somme, ce ne sont pas les chercheuses qui ont eu à s'adapter ; c'est l'organisme qui a pris cette charge sur ses épaules. Et c'est exactement ce que demandait un groupe de scientifiques américaines en avril dernier dans un article provocateur illustrant la profondeur du ras-le-bol. « *F**ck* la résilience individuelle ! » écrivent-elles. Les auteures rappellent que les femmes, qu'elles soient mères ou proches aidantes (un rôle majoritairement féminin), ne peuvent tout surmonter à la seule force de leur poignet ni compter sur la gentillesse ponctuelle des autres.

La communauté scientifique n'a plus le choix de mettre en place des mesures pour épauler ses membres qui croulent sous le poids des responsabilités… peu importe leur sexe. Comme le conclut ce collectif de chercheuses : « Nous vivrons *tous* des crises au cours de notre carrière ; nous avons besoin d'une résilience organisationnelle et communautaire si *chacun* d'entre nous espère "rebondir". »

SEPTEMBRE 2021
VOLUME 60, NUMÉRO 2

Rédactrice en chef
Marie Lambert-Chan
Journalistes
Marine Corniou, Mélissa Guillemette
Journaliste Web et médias sociaux
Annie Labrecque
Collaborateurs
Maxime Bilodeau, Jean-François Cliche, Miriane Demers-Lemay, Émilie Folie-Boivin, Chloé Freslon, Martine Letarte, Etienne Plamondon Emond, Charles Prémont, Fanny Rohrbacher, Hugo Ruher, Alexandra S. Arbour, Saturnome
Correctrice-réviseure Sophie Cazanave
Directrice artistique Natacha Vincent
Photographes/illustrateurs/graphiste
Françoise Abbate, François Berger, Louise Bilodeau, Nicole Aline Legault, Niti Marcelle Mueth, Christinne Muschi, Donald Robitaille, Vigg

Éditeur Jean-François Rheault
Comptabilité Mimi Bensaid
Chargée de projets, communications marketing Maryvonne Charpentier
Conseillère, relations de presse et marketing Stéphanie Couillard
SERVICE AUX ABONNÉS :
514 521-8356, poste 504, ou
1 800 567-8356, poste 504
serviceclient@velo.qc.ca

PUBLICITÉ :
Claudine Mailloux
514 909-4601 cmailloux@velo.qc.ca
Impression Solisco
Distribution Messageries Dynamiques
Parution : 26 août 2021 (572e numéro)

Abonnement Canada, 1 an : 36 $ + taxes
États-Unis, 1 an : 84 $
Outre-mer, 1 an : 124 $
Québec Science est publié par Vélo Québec Éditions

Dépôt légal : Bibliothèque nationale du Québec, Bibliothèque nationale du Canada : ISSN-0021-6127
Envoi Poste-Publications Convention nº 40065387.
© Copyright 2021 – *Québec Science*. Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés.

Indexé dans repère
Québec Science reçoit l'aide financière du ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec. Nous reconnaissons l'appui financier du gouvernement du Canada.

Le magazine *Québec Science* est imprimé sur du papier certifié FSC® (Forest Stewardship Council®), donc issu de forêts bien gérées et d'autres sources responsables.

Babillard

NOTRE COUVERTURE



La pollution atmosphérique évoque tout de suite les pétrolières et les panaches de fumée. Si l'image est saisissante et parle d'elle-même, elle a souvent été utilisée dans les magazines, les journaux et les publicités. Comment la réinventer ? Une illustration conceptuelle m'apparaissait la voie à suivre pour aller plus loin tout en captant l'attention.

Avec sa touche unique, l'illustrateur François Berger nous propose une couverture très graphique telle une affiche. L'image et la typographie habitent l'espace de façon très simple, mais équilibrée, afin d'en renforcer l'effet. Ludwig Mies van der Rohe, grand représentant du Bauhaus, ne disait-il pas « *Less is more* » ?

Dans ce ciel jaune – couleur iconographique des produits nocifs pour la santé –, une cheminée de pétrolière se dresse au centre. Une fumée s'en échappe qui rappelle une main à l'allure menaçante. Une menace environnementale qui nous guette… et nous poursuit à l'intérieur du magazine en page 19. En plus de cette suite narrative, François Berger nous offre d'autres illustrations magnifiques qui ponctuent ce dossier aussi important pour notre environnement que pour notre santé.

– Natacha Vincent, directrice artistique

DES HONNEURS POUR NOTRE ÉQUIPE

Encore cette année, nos journalistes sont finalistes au prestigieux prix Roberval, un concours qui récompense des œuvres en langue française dont le sujet est l'explication d'une technologie.

Mélissa Guillemette est en nomination dans la catégorie Journalisme scientifique et technique pour son reportage « Les scientifiques augmentés », qui faisait une incursion dans le monde des laboratoires autonomes dont l'objectif est d'accélérer la découverte de matériaux. Marine Corniou se distingue dans la même catégorie grâce à son texte « Un pas de géant vers l'infiniment petit », qui racontait les exploits et les promesses de la cryomicroscopie électronique. Les lauréats seront connus cet automne.

CE QUE NOUS AVONS LU OU ENTENDU AU COURS DE CE NUMÉRO

Jusqu'au mois de mai 2022, le Musée des sciences de Londres expose des objets fabriqués à partir du carbone extrait directement de l'air : tube de dentifrice, tapis de yoga, lunettes… Et même de la vodka ! L'exposition *Our Future Planet* s'interroge aussi sur la pertinence de la capture du carbone.

– Marine Corniou, journaliste

Les flatulences et les rots de vaches sont souvent désignés comme des sources importantes de méthane. Qu'en est-il de l'humain ? Il libère lui aussi ce puissant gaz à effet de serre lors de l'expiration et de pets, ainsi que par la peau. Certaines personnes en produisent beaucoup, d'autres presque pas ; tout dépend de l'âge, du sexe, de l'alimentation et de facteurs environnementaux. Des chercheurs allemands ont estimé que, avant l'ère industrielle, l'ensemble des humains émettaient environ 34 gigagrammes de méthane par année, contre 344 aujourd'hui. Cela reste très peu comparativement aux émissions des vaches, que des chercheurs évaluaient à 119 000 gigagrammes en 2011…

– Mélissa Guillemette, journaliste

Abonnez-vous	Écrivez-nous	Suivez-nous
www.quebecscience.qc.ca/abonnez-vous 514 521-8356, poste 504 1 800 567-8356, poste 504 Un changement d'adresse : changementqs@velo.qc.ca	**courrier@quebecscience.qc.ca** Magazine *Québec Science* 1251, rue Rachel Est Montréal (QC) H2J 2J9	**www.quebecscience.qc.ca**

Conseil de recherches en sciences humaines du Canada | Social Sciences and Humanities Research Council of Canada | Canada



TÉLESCOPE AQUATIQUE POUR NEUTRINOS COSMIQUES

Immergé dans le lac Baïkal, un détecteur tentera d'intercepter des particules «fantômes»: les neutrinos cosmiques.

Par Marine Corniou

Le lac Baïkal fait 1 700 m de profondeur et serait le plus ancien sur Terre (25 millions d'années).

Chaque hiver depuis 2015, le lac Baïkal, situé au sud-est de la Sibérie, en Russie, est le théâtre d'une étrange opération. Une équipe de scientifiques creuse des trous au milieu de l'étendue gelée, à quatre kilomètres des côtes, et plonge une à une, à l'aide de câbles, des dizaines de sphères au fond de l'eau.

Si l'opération a des airs de pêche sur glace, il n'en est rien : on construit ici, très patiemment, le plus grand détecteur de neutrinos de l'hémisphère Nord. Appelé Baïkal-GVD (pour Gigaton Volume Detector), ce télescope est constitué de globes optiques accrochés le long de cordes verticales qui s'étirent dans les eaux glaciales entre 600 et 1 300 m de profondeur. Ces lignes de 36 modules sont elles-mêmes regroupées par 8 sous forme de «grappes», qui confèrent à l'ensemble l'allure d'une méduse géante. «L'installation couvre un volume de 0,4 km^3. Nous espérons atteindre 1 km^3 d'ici 2027», explique Grigori V. Domogatsky, de l'Institut de recherche nucléaire de Moscou, qui travaille sur le projet depuis 40 ans. À terme, l'ensemble formera un immense filet en trois dimensions destiné à «attraper» les particules cosmiques les plus insaisissables qui soient : les neutrinos.

Ces derniers sont pourtant extrêmement abondants. Des centaines de milliards d'entre eux nous traversent chaque seconde, venus du cœur d'étoiles ou produits par des cataclysmes cosmiques. Mais ils n'interagissent presque pas avec la matière. De fait, en traversant la Terre, seul 1 neutrino sur 10 milliards entre en collision avec un atome. Les détecteurs de neutrinos doivent donc être aussi gigantesques que sensibles, en plus d'être logés à l'abri des rayons cosmiques qui bombardent la surface de la planète. On les construit sous terre, comme celui du SNOLAB au fond d'une mine d'Ontario, ou sous l'eau.

Cette deuxième option offre l'avantage d'utiliser l'étendue d'eau elle-même comme matériau de détection. Le lac Baïkal se transforme peu à peu en un détecteur colossal ! Lorsqu'un neutrino frappe un atome d'hydrogène ou d'oxygène dans l'eau, cela entraîne la production de particules chargées. «Ces particules peuvent voyager plus vite qu'à la vitesse de la lumière dans l'eau. Elles émettent un rayonnement, une lumière bleue qui peut être observée par les détecteurs de photons», résume Roxanne Guénette, spécialiste des neutrinos à l'Université Harvard. Le lac Baïkal, par son volume et sa clarté, offre donc un écrin de choix.

La mise en fonction progressive du Baïkal-GVD confirme l'entrée de l'astronomie dans une nouvelle ère : celle de l'utilisation des neutrinos en tant que «messagers» pour sonder le cosmos autrement qu'avec la lumière.

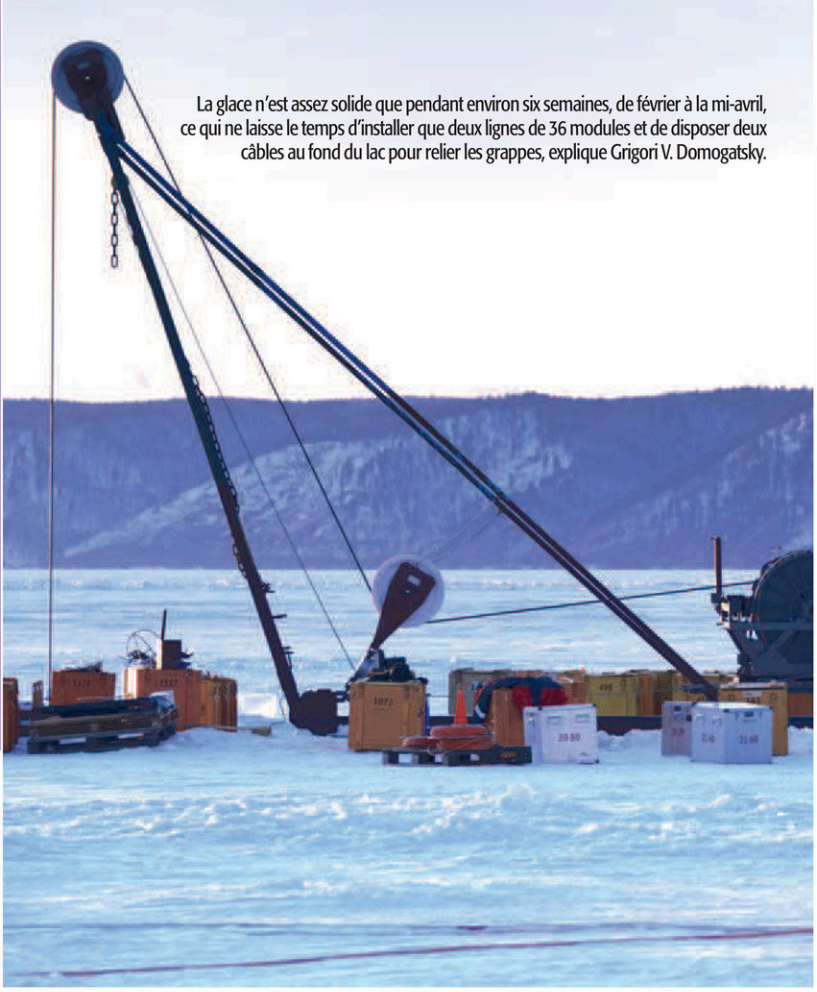
En Sibérie, la traque a déjà commencé. «Les analyses préliminaires en 2019 et en 2020 nous ont permis de repérer huit évènements qui peuvent être considérés comme des neutrinos d'origine astrophysique», détaille le professeur Domogatsky, porte-parole de la «collaboration Baïkal», qui rassemble des scientifiques de Russie, de République tchèque, d'Allemagne, de Pologne et de Slovaquie. «Ce résultat concorde avec le taux d'évènements détectés par l'IceCube», ajoute-t-il.

Car le Baïkal-GVD n'est pas le seul observatoire «grandeur nature». L'IceCube, mis en service fin 2010, est le modèle du genre. Ses 5 160 modules optiques sont enfouis à plus d'un kilomètre dans la glace, près du pôle Sud. Grâce à son volume de 1 km^3 — la glace servant de cible —, il a prouvé qu'il était possible de capter des neutrinos de source astrophysique. En 2017, il a même permis de localiser pour la première fois une source de neutrinos très énergétiques : un quasar actif au centre d'une galaxie, confirmant une théorie qui taraudait les scientifiques depuis des décennies.

Le Baïkal-GVD sera rejoint en Europe en 2026 par les 230 lignes de détection du télescope KM3NeT, ancrées dans les abysses de la mer Méditerranée. En avril dernier, 5 d'entre elles ont été installées au large de la Sicile, pour un total de 6 lignes en service pour l'instant. Et au Canada, l'observatoire P-ONE (Pacific Ocean Neutrino Explorer), à l'ouest de Victoria, pourrait à terme s'ajouter au réseau. Une ligne expérimentale de 10 modules a été posée en septembre 2020.

«L'IceCube, le KM3NeT et le Baïkal-GVD proposent des vues complémentaires du ciel. On ne sait pas où se trouvent les sources astrophysiques de neutrinos et l'on doit ratisser large, dit Roxanne Guénette. Il y a plusieurs objectifs en commun : comprendre l'interaction des neutrinos, chercher les neutrinos stériles [une sorte de neutrino hypothétique] et tenter de trouver des indices d'une nouvelle physique.» On a déjà hâte à l'hiver prochain pour que se mettent au travail ces capteurs porteurs de tant de promesses. ●

La glace n'est assez solide que pendant environ six semaines, de février à la mi-avril, ce qui ne laisse le temps d'installer que deux lignes de 36 modules et de disposer deux câbles au fond du lac pour relier les grappes, explique Grigori V. Domogatsky.





Chaque grappe constitue un détecteur autonome de 0,05 km^3, ce qui permet de commencer les mesures avant la fin de l'installation.

Les détecteurs captent les neutrinos qui ont traversé la Terre. L'IceCube, en Antarctique, permet donc de sonder le ciel côté nord. Les détecteurs de l'hémisphère Nord, eux, sondent le ciel au sud, vers le cœur de la Voie lactée, là où se situent la plupart des sources de neutrinos, comme les étoiles à neutrons et le trou noir supermassif au centre de la galaxie. Avec un peu de chance, c'est peut-être là aussi que surviendra une supernova , une explosion d'étoile en fin de vie. Ici un globe optique qui détecte les photons.

• IMAGES : BAIKAL-GVD COLLABORATION

Première étape du retour sur la Lune

Les Américains ont amorcé le programme Artemis afin de remarcher sur la Lune. Et ça commence avec le vol d'essai d'*Orion*. **Par Hugo Ruher**



Des techniciens du Centre spatial Kennedy de la NASA installent un adaptateur qui reliera le vaisseau spatial *Orion* à la fusée Space Launch System pour la mission Artemis 1.

Voilà près d'un demi-siècle que la bannière étoilée est plantée sur le sol de la Lune sans personne pour la contempler. Un délaissement qui sera bientôt corrigé par le lancement du programme Artemis, de la NASA. L'objectif : amener un équipage sur le pôle sud de notre satellite en 2024. Cette date officielle paraît optimiste, mais la phase 1 de la mission est bien enclenchée. Le coup d'envoi sera le décollage prévu début 2022 du vaisseau spatial *Orion*, sans équipage, mais avec un enjeu capital.

La mission n'est pas qu'un test grandeur nature. Artemis 1 est une opération à part entière qui va durer pas moins de 25 jours, soit le temps nécessaire au vaisseau pour se rendre jusqu'à la Lune, survoler sa face cachée à 150 km d'altitude environ, puis revenir sur Terre. « Ce type de voyage n'est pas anodin, considère Marie-Michèle Limoges, directrice du contenu scientifique au Cosmodôme de Laval. Cela fait très longtemps que nous ne sommes pas allés sur la Lune et il nous faut tout réapprendre. »

Orion sera accompagné de 13 nanosatellites qui se placeront en orbite autour de la Lune pour analyser entre autres la présence d'eau, les gaz volatils, le champ magnétique du Soleil… L'un d'eux va même se poser sur la surface lunaire pour tester la possibilité de faire atterrir de petits engins. Le défi est de taille, selon Marie-Michèle Limoges : « Cela peut paraître plus facile qu'avec les ordinateurs si peu puissants des années 1960, mais aujourd'hui la technologie est beaucoup plus complexe et les objectifs plus nombreux. »

Durant ce voyage et au retour, tous les équipements d'*Orion* seront scrutés de près. Il faut dire que c'est la première fois depuis des décennies que les États-Unis construisent un vaisseau qui, à terme, transportera des humains au-delà de la Station spatiale internationale et les ramènera en bonne santé. Il a notamment fallu mettre au point un bouclier thermique capable de résister à une rentrée atmosphérique de 11 km par seconde, d'autant que le vaisseau, conçu pour se poser sur l'eau, est réutilisable.

D'ailleurs, pour construire *Orion*, les ingénieurs de la NASA se sont inspirés du design un peu rétro du vaisseau *Apollo 8*, le premier avec équipage à avoir atteint l'orbite lunaire fin 1968. Mais contrairement à son aïeul qui avait fait un voyage d'à peine six jours, *Orion* pourra accueillir jusqu'à quatre astronautes pendant près d'un mois ! Il a donc fallu ajouter un module de service, fabriqué par Airbus. Placé en dessous de l'habitat des astronautes, il est équipé d'un système de propulsion pour se mettre en orbite autour de la Lune. Il assurera aussi l'alimentation électrique grâce à des panneaux solaires, le maintien de la température, sans oublier l'approvisionnement en eau et en oxygène.

LA FUSÉE LA PLUS PUISSANTE DU MONDE

Malgré quelques changements au fil des années, l'élaboration d'*Orion* est en cours depuis 2006. Il a même fait un test orbital en 2014 ; les équipes de la NASA sont donc bien préparées. « Toutes les missions comportent des risques, précise Nico Dettmann, responsable de l'exploration lunaire à l'Agence spatiale européenne. Mais ici, c'est en vue de vols habités, donc le développement est très différent. Sur papier, le lancement d'*Orion* est le plus sûr jamais réalisé depuis des décennies. »

Si les ingénieurs semblent être en terrain connu avec *Orion*, l'autre élément clé de la mission, l'immense fusée Space Launch System (SLS), constitue un défi technique colossal. Haut de 111 m, lourd de plus de 4 000 t, c'est le plus grand lanceur jamais assemblé. L'opération dure plusieurs mois, puisqu'il faut, à chaque étape, soulever les divers composants à l'aide d'une grue et les emboîter avec précaution.

• IMAGE : NASA



À ce stade, l'édifice fait déjà plus de 60 m de haut, ce qui est plus grand qu'une fusée Falcon 9, mais il faut encore ajouter un étage dit de propulsion cryogénique sur lequel sera placée la charge utile, c'est-à-dire *Orion*! Et c'est seulement à ce moment-là que les derniers tests seront menés pour s'assurer que tous ces morceaux communiquent bien avant le lancement.

On mise gros sur le SLS, et pour cause : ses objectifs ne se limitent pas à la Lune. C'est l'engin qui devrait, si tout se passe comme prévu, envoyer des humains sur Mars dans quelques années.

UNE COURSE AVEC LA CHINE

S'ils souhaitent prendre toutes les précautions nécessaires, les Américains ne veulent pas non plus perdre trop de temps. De son côté, la Chine prépare aussi une mission habitée sur le sol lunaire. Et les derniers succès de *Chang'e 5* sur la Lune et de *Tianwen-1* sur Mars démontrent le savoir-faire et la rapidité de l'adversaire. Une situation qui rappelle la course à la Lune des missions Apollo. « À l'époque, il s'agissait de montrer sa supériorité idéologique et sociale sur l'URSS. Ici, c'est davantage une course pour prouver sa force économique », analyse Chris Gainor, historien spécialisé dans l'exploration spatiale. Une course dans laquelle la Chine a beaucoup plus à jouer, ajoute-t-il : « Si les États-Unis alunissent en premier, ce ne sera pas la même victoire totale qu'en 1969, car ce n'est plus une première. En revanche, quand les Chinois se poseront, cela confortera leur statut de superpuissance mondiale. »

Artemis 1 reste néanmoins une étape cruciale pour les États-Unis parce que, en cas d'échec, tout le programme sera, au pire, remis en cause et, au mieux, largement repoussé. Et la phase 2, qui doit amener un équipage avec *Orion* en orbite autour de la Lune, est planifiée pour l'été 2023. « Nous voulons tous à nouveau voir des gens sur la Lune, d'autant plus si l'équipage est diversifié [le groupe d'astronautes d'Artemis comprend des femmes et des membres des minorités visibles], dit Marie-Michèle Limoges. Alors nous n'espérons qu'une chose, c'est que ce programme réussisse ! » ●

Une affaire de statistiques

Laissez-moi vous raconter une petite fable médicale. Imaginons deux hommes de 75 ans, non fumeurs, souffrant d'hypertension traitée. Les deux prennent de l'aspirine à raison de 80 mg par jour : le premier le fait de son propre chef, à titre préventif ; le second, sur recommandation de son médecin parce qu'il a fait un infarctus il y a 10 ans. Mais ils ont lu sur le Web que ce médicament est associé à des saignements gastro-intestinaux et cérébraux. Ils me posent donc cette même question : « Docteure, j'aimerais arrêter l'aspirine. Qu'en pensez-vous ? »

Au premier, je réponds, avec un grand sourire : « C'est super que vous vous souciiez ainsi de votre santé ! J'allais vous proposer la même chose ! » Au second, je dis plutôt en fronçant les sourcils : « Ça demeure votre décision, mais je pense que vous devriez continuer à la prendre ! »

Ne vous méprenez pas, comme gériatre, je suis en croisade perpétuelle contre la polypharmacie — le fait de prendre plus de cinq médicaments. J'essaie toujours de réduire la pharmacopée de mes patients pour diminuer ses effets indésirables et améliorer leur qualité de vie. Alors pourquoi deux poids, deux mesures pour mes deux patients ?

Pour répondre à cette question, il faut d'abord comprendre que la médecine, qui n'est pas une science fondamentale à l'instar de la chimie ou de la physique, se fonde sur les statistiques et le calcul de probabilités. L'épidémiologie — qui se définit comme « l'étude de la fréquence et de la répartition d'états ou d'évènements relatifs à la santé de populations […] et l'application de ce savoir pour contrôler les problèmes de santé » — sous-tend la majorité, sinon la totalité des décisions prises par les médecins au quotidien.

Pour recommander un traitement ou même un vaccin, il faut se baser sur des études épidémiologiques qui démontrent son efficacité et sa sécurité. Le clinicien chevronné cherchera des preuves provenant d'essais randomisés contrôlés, des études expérimentales dans lesquelles on administre ledit médicament à un groupe de patients et un placébo à un autre groupe similaire. La différence d'évènements positifs et négatifs entre les deux groupes permet de juger du bien-fondé du traitement.

Outre la qualité d'une étude, déterminée entre autres par le nombre de participants et la rigueur de son protocole, le concept de « nombre de sujets à traiter » (ou NNT pour *number needed to treat*) est fondamental. Il s'agit du nombre de patients qui doivent être traités par ce médicament pour une durée donnée afin de prévenir chez un seul d'entre eux une issue indésirable, par exemple un nouveau cas de maladie, un infarctus ou même le décès. En contrepartie, le « nombre nécessaire pour nuire » (ou NNH pour *number needed to harm*) existe aussi : c'est la quantité de patients qui doivent être traités par un médicament pour que se manifeste un effet néfaste. Ainsi, plus le NNT est bas, plus un médicament est « efficace » ; plus le NNH est élevé, plus il est « sécuritaire ».

Reprenons l'exemple de l'aspirine. Cet antiplaquettaire est utilisé dans le traitement de l'infarctus. Il plaît donc à l'esprit qu'il soit efficace pour le prévenir ! Or, les études ont montré qu'il fallait que 1 667 patients en pleine santé prennent un cachet d'aspirine tous les jours pendant un an pour prévenir un seul infarctus dans cette population ! Avoir un antécédent d'infarctus change la donne complètement : ce sont plutôt 77 individus qu'il faut traiter pour prévenir une récidive. Et la molécule n'est pas inoffensive non plus : ses complications gastro-intestinales et hémorragiques sont bien documentées, comme l'ont souligné mes patients.

Voilà pourquoi j'ai demandé au premier patient de cesser l'aspirine — il n'est d'ailleurs pas indiqué de prendre de l'aspirine à titre préventif — et suggéré au second d'en poursuivre la prise. Dans les faits, ce n'est pas si simple. Plusieurs autres facteurs entrent en ligne de compte : âge, habitudes de vie, facteurs de risque, autres comorbidités, etc. Sans compter que l'essor de la génétique et de la médecine personnalisée risque de complexifier encore plus le processus de décision à l'avenir, mettant définitivement un terme aux solutions toutes faites.

La morale de cette fable médicale : parlez-en toujours à votre médecin ou à votre pharmacien avant de cesser une médication. Et ce qui est bon pour Pierre ne l'est pas nécessairement pour Jean ! ●

Dans la peau d'une personne noire









Une équipe montréalaise vérifie si « changer de corps », grâce à la réalité virtuelle, ne réduirait pas les préjugés raciaux.

Par Mélissa Guillemette

L'adage dit que nous ne devrions pas juger de la vie de quelqu'un sans avoir marché un mille dans ses souliers.

Pour tenter de court-circuiter les préjugés envers les personnes noires, l'étudiant Rémi Thériault, sous la supervision du professeur de l'Université McGill Amir Raz, a forcé l'application de cet adage. Il a utilisé le logiciel The Machine to Be Another, inventé par un collectif artistique et scientifique international, qui donne l'impression d'habiter le corps d'un autre.

Les premiers résultats de l'équipe ont été publiés en mai dans le *Quaterly Journal of Experimental Psychology*. Des participants ont défilé tour à tour dans un laboratoire où ils ont été jumelés à une personne noire du même sexe qu'eux (et complice des scientifiques). Chaque membre du duo était ensuite isolé dans un lieu identique où il mettait un casque de réalité virtuelle muni d'une caméra. Ce qui était capté par la caméra de l'un était envoyé vers le casque de l'autre. Un scientifique indiquait alors les mouvements à réaliser en simultané. Par exemple, si le participant touchait ses jambes, il voyait les jambes et les bras de la personne noire qui bougeait comme lui.

À la fin, les participants remplissaient une série de questionnaires mesurant leurs biais et leur niveau d'empathie. Enfin, un groupe témoin, c'est-à-dire des sujets qui ne changeaient pas de corps, mais passaient par le même processus (casque, mouvements et questionnaires), servait à mesurer l'efficacité de l'exercice.

Cependant, une surprise attendait les chercheurs : les résultats ont montré que l'ensemble des participants n'avaient pratiquement pas de préjugés inconscients envers les personnes noires ! Difficile, alors, de vérifier si la stratégie fonctionne… Elle a néanmoins stimulé l'empathie des sujets. L'étude est actuellement reprise par la même équipe en Californie.

Cette expérience est allée un pas plus loin que deux autres études menées en 2013 grâce à la réalité virtuelle : dans la première, des femmes blanches se trouvaient dans la peau d'un avatar noir ; dans la seconde, des chercheurs donnaient l'impression à des participants blancs d'avoir une main foncée. Chaque exercice a diminué les préjugés raciaux.

Le chercheur de l'Université de Barcelone Mel Slater, qui a conduit les travaux en 2013 avec l'avatar, a été étonné que l'expérience de l'Université McGill n'ait pas entraîné une baisse des préjugés. Il pense que le profil diversifié des participants – ils n'étaient pas tous blancs – a pu avoir une influence. « Une autre différence majeure par rapport aux travaux précédents est que, avec The Machine to Be Another, vous changez de corps avec une véritable personne. Il vous faut donc suivre ses mouvements. Quant à l'avatar, il suit automatiquement vos gestes grâce à la captation en temps réel de vos mouvements. » Peut-être que l'illusion est meilleure et donc plus efficace.

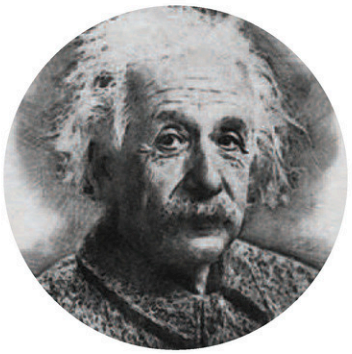
Rémi Thériault explique que, si l'intervention testée se révèle positive en Californie et dans des études subséquentes, elle pourrait être utilisée dans des écoles. « Cela étant dit, je pense que l'illusion de l'échange de corps ne peut pas facilement être appliquée à grande échelle, car elle demande beaucoup de logistique et, pour l'instant, l'équipement est toujours relativement dispendieux », dit celui qui a été finaliste en 2019 du concours *J'ai une histoire à raconter*, du Conseil de recherches en sciences humaines du Canada, où il devait résumer son projet en trois minutes.

Dans le cadre de son doctorat à l'Université du Québec à Montréal, il s'intéresse à des approches plus simples, comme la méditation, qui permet de cultiver la bienveillance. « C'est sûr que la méditation peut sembler moins *cool* que la réalité virtuelle. Mais elle a plus de potentiel pour un effet maximal, je crois. » ●

• IMAGES : RAZ LAB

Einstein et sa boule de cristal

Par Charles Prémont



Une lettre écrite par Albert Einstein en 1949 montre que le célèbre physicien imaginait déjà les oiseaux comme une clé pour comprendre des phénomènes physiques.

C'est en regardant un reportage de la BBC sur les abeilles en 2019 qu'une certaine Judith Davys s'est rappelé l'existence d'une lettre qu'Einstein avait adressée à son défunt mari, Glyn. Dans les années 1940, ce dernier s'était intéressé aux recherches de l'éthologue Karl von Frisch portant sur la capacité d'orientation des abeilles grâce à la polarisation de la lumière du ciel.

Dans ce court message, Einstein raconte être au fait des travaux de Karl von Frisch. Surtout, il dit croire que l'analyse des perceptions animales pourrait permettre la compréhension de processus physiques encore inconnus. Il cite l'examen du comportement des oiseaux migrateurs comme un exemple prometteur.

Une intuition qui a été démontrée 70 ans plus tard ! C'est en 2004 qu'une étude a prouvé pour la première fois que des grives se dirigent grâce à une forme de boussole magnétique. Une des théories pour expliquer ce phénomène provient de la biologie quantique qui, comme son nom l'indique, s'intéresse aux liens entre la mécanique quantique et la biologie.

«Cela nous montre à quel point Einstein était un chercheur exceptionnel, mentionne Adrian Dyer, le scientifique que Judith Davys a pu voir dans le reportage de la BBC. Il devait avoir réfléchi à ce problème, à ces oiseaux qui s'orientent précisément sur d'incroyables distances. Il entrevoyait le degré de difficulté de cet exploit et pressentait que l'étude de celui-ci pourrait pousser les limites de notre compréhension de la physique.» Le professeur Dyer et ses collègues ont relaté toute l'affaire dans un article du *Journal of Comparative Physiology A* publié en mai dernier.

Une anticipation qui n'a rien de surnaturel pour Annie Angers, professeure au Département de sciences biologiques de l'Université de Montréal. « Tous les scientifiques sont conscients que la nature a beaucoup à nous apprendre, cela ne me surprend donc pas qu'Einstein ait pu penser à cela. »

C'est plutôt le travail d'enquête du professeur Dyer qui l'a impressionnée. En effet, Adrian Dyer et son équipe ont dû fouiller les mémoires de la famille Davys et les archives de l'époque pour préciser l'objet de la lettre initiale de Glyn Davys (aujourd'hui introuvable) et comprendre pourquoi il avait communiqué avec Einstein en premier lieu. «J'ai trouvé le propos de M. Dyer très convaincant, déclare Annie Angers. Mais lorsqu'on lit enfin cette fameuse lettre d'Einstein, on se rend compte qu'elle ne fait que 10 lignes. Ça tombe un peu à plat ! » De quoi renforcer la réputation qu'avait ce grand esprit d'être un homme de peu de mots. ●

• IMAGE : SHUTTERSTOCK.COM

CHLOÉ FRESLON @f_chloe



Technopop

Est-ce la fin de l'ère des développeurs ?

Concevoir une application Web complexe sans avoir recours à un développeur, est-ce vraiment possible ? Absolument : il suffit de coder sans code ! Des outils existent déjà pour le faire et la tendance va croissant. La firme de recherche et de conseils en technologie Gartner a prédit cette année que 80 % des tâches technologiques seront ainsi réalisées par des personnes non spécialisées dès 2024 !

Ironiquement, le sans-code fonctionne avec du code… mais sans avoir besoin de programmer. On mise plutôt sur des éléments de type «glisser-déposer» conçus pour être réutilisés et mis à l'échelle. On voit alors instantanément comment se présentera l'application sur un appareil mobile, une tablette ou un ordinateur de bureau.

Les avantages de la technologie sans code sont nombreux. C'est flexible : en utilisant le glisser-déposer visuel, on peut créer et tester une application rapidement. C'est bon marché : embaucher des développeurs coûte cher et les meilleurs sont déjà très courtisés. Les jeunes entreprises peuvent ainsi rivaliser avec de grandes sociétés même si leur main-d'œuvre est 10 fois plus petite.

En revanche, il y a des inconvénients. Tout d'abord, les utilisateurs doivent avoir une idée claire de leurs besoins afin de bien choisir leur plateforme. Les Airtable, Bubble, Thunkable de ce monde fournissent divers modèles et composants qui peuvent être configurés de différentes façons, mais leur palette reste limitée. Et enfin, la sécurité informatique pose problème. Ne pas connaître son application de fond en comble peut comporter un certain nombre de risques. Et si un jour on souhaite migrer ailleurs et qu'on obtient son code source, il se peut qu'il vienne sans documentation claire et donc qu'il soit impossible à réemployer !

L'avènement de la technologie sans code signifie-t-il la fin de l'ère des développeurs ? Pas vraiment. Dans un monde virtuel qui ne cesse de se complexifier, nous aurons toujours besoin d'eux. Le mouvement du sans-code pourrait même les aider en permettant l'exécution de tâches faciles afin qu'ils puissent se concentrer sur des opérations plus délicates.

L'idée du sans-code est de donner aux personnes qui n'ont pas l'expertise la possibilité de mettre au point des applications et de résoudre des enjeux sans être tributaires d'un tiers. Il y a donc un côté très démocratique et «ouvert» à cette démarche qui nous ramène aux bases de la technologie : outiller les humains. ●



JEAN-FRANÇOIS CLICHE @clicjf

Polémique

La droite est-elle si crédule ?

J'ai toujours tiqué sur l'idée, très répandue, que les gens de droite seraient plus vulnérables aux fausses nouvelles que les centristes et les gauchistes. D'abord parce que je me suis toujours méfié des commentaires qui lient les penchants politiques à des traits psychologiques. Ces liens-là peuvent exister, je ne le nie pas. Mais trop souvent, on s'en sert pour décrire comme des « maladies » des idées avec lesquelles on est en désaccord.

Ensuite parce que, comme journaliste scientifique, j'ai vu bien des faussetés persister tant à droite qu'à gauche au fil des années. Le mythe de la toxicité des OGM, par exemple, n'a rien de particulièrement conservateur. En 2015, un sondage mené pour le Pew Research Center, aux États-Unis, a révélé que 56 % des électeurs démocrates pensaient que les OGM sont mauvais pour la santé – ce qui est complètement faux – contre 51 % des républicains. D'autres travaux ont montré que le fait d'être conservateur ou progressiste ne change rien au sentiment antivaccin : c'est le fait d'être extrémiste qui compte.



Or, je vais peut-être devoir changer (un peu) d'idée. Une étude – possiblement la meilleure que j'ai vue sur le sujet – est parue en juin dernier dans *Science Advances*. Pendant six mois, en 2019, ses auteurs ont scruté les réseaux sociaux afin d'en tirer les 20 « nouvelles » politiques les plus virales toutes les deux semaines – 10 vraies et 10 fausses chaque fois. Puis, ils les ont soumises à un échantillon de 1 200 Américains qui devaient se prononcer sur la véracité de chacune. En moyenne, les plus conservateurs croyaient à plus de faussetés (5 ou 6 sur 10) que les plus progressistes (2 ou 3 sur 10) et adhéraient à moins de vérités, soit environ 7 sur 10, contre 8 pour les gens les plus à gauche.

Cependant, et c'est ici que cette étude devient vraiment éclairante, ses auteurs – R. Kelly Garrett et Robert Bond, de l'Université d'État de l'Ohio – ont également relevé un énorme biais de l'« écosystème médiatique » américain : parmi les affirmations vraies véhiculées sur les réseaux sociaux, pas moins de 65 % favorisaient le Parti démocrate, contre seulement 10 % de vérités qui faisaient l'affaire des républicains. Les 25 % restants étaient considérés comme « neutres ». À l'inverse, près de la moitié (46 %) des faussetés rapportées par l'étude étaient favorables à la droite, soit deux fois plus que la proportion des fausses nouvelles qui faisaient bien paraître la gauche (23 %).

« Les résultats constamment mauvais des conservateurs lorsque vient le temps de distinguer le vrai du faux semblent s'expliquer en grande partie par […] le flot de désinformation favorable à la droite », concluent les auteurs. En d'autres termes, les conservateurs ne seraient pas tellement plus naïfs que les autres, ils seraient surtout plus souvent exposés à des faussetés (et moins souvent à des vérités) qui confortent leur vision.

L'étude a également mis en lumière que la réaction des uns et des autres aux nouvelles défavorables « n'est pas aussi simple que les théories passées pourraient le laisser entendre ». Ainsi, on pensait que les gens de droite avaient une forte tendance à percevoir comme des menaces les nouvelles négatives pour eux, alors que les données indiquent que ce réflexe n'est finalement pas si répandu chez eux.

Autre point majeur : l'étude a montré que, même en limitant l'effet de l'environnement médiatique et d'autres variables, les républicains étaient plus susceptibles de croire en la désinformation. « Il semble de plus en plus probable que cela provient, du moins en partie, de différences psychologiques individuelles associées au conservatisme », écrivent les auteurs. Si, par exemple, les gens plus à droite sont en moyenne – j'insiste : en moyenne parce qu'il y a toutes sortes d'individus qui sont conservateurs – moins ouverts d'esprit et ont plus de difficulté à se laisser convaincre par de nouveaux faits, cela implique qu'ils se corrigent moins que la moyenne et qu'ils pourraient, au fil de temps, accumuler plus de fausses croyances.

Il semble donc que je vais devoir changer d'idée : il y aurait bel et bien un fond de vérité à ces histoires de vulnérabilité plus grande des conservateurs aux fausses nouvelles. Ce n'est pas la caricature de la droite crédule qui circule fréquemment dans les médias, mais je ne pourrai plus dire que c'est un biais méthodologique. ●

• ILLUSTRATION : VIGG

INRS

Institut national de la recherche scientifique

CHANGER LE MONDE PAR LA RECHERCHE

INRS.CA



1er au Canada en intensité de recherche

Vive les données libres !

Permettre à tous d'accéder aux données brutes des chercheurs pour faire avancer le savoir : c'est l'idée défendue par Dominique Roche, qui milite pour une « science ouverte ».

Par Marine Corniou





C'

est pendant son doctorat en écologie, en 2013, que Dominique Roche a commencé à réfléchir à la notion de science ouverte. Il est tombé sur le sujet un peu par hasard, à la faveur d'une discussion organisée par le club de lecture du Département de biologie de l'Université nationale australienne, où il étudiait les poissons des récifs coralliens. Immédiatement, il s'est passionné pour la question : et si, au lieu de garder jalousement leurs données, les chercheurs les partageaient pour permettre à d'autres équipes de tirer parti de leur travail ? Le thème est délicat dans un milieu hautement compétitif.

Puis, en 2020, le biologiste obtient une bourse Marie-Skłodowska-Curie de la Commission européenne pour se consacrer à cette réflexion pendant trois ans, dans le cadre d'un postdoctorat réalisé conjointement à l'Université Carleton, à Ottawa, et à l'Université de Neuchâtel, en Suisse.

Le moment ne pouvait être meilleur : la pandémie a montré que la science ne va jamais aussi vite que lorsque ses artisans travaillent main dans la main. Même le G7, en juin dernier, a reconnu publiquement l'importance de renforcer la collaboration en matière de recherche et de promouvoir la science ouverte. Un signe que le vent tourne.

Québec Science : **Qu'est-ce que la « science ouverte » ?**

Dominique Roche : L'idée est simple : il s'agit de rendre plus accessibles le processus et les résultats de recherche.

Cela peut être fait de plusieurs façons. D'abord, en autorisant l'accès libre aux articles scientifiques. La recherche est financée par l'argent des contribuables, c'est donc illogique qu'elle soit ensuite publiée par des éditeurs privés derrière un mur payant ! Quand les gens réalisent cela, ils n'en reviennent pas.

La science ouverte encourage aussi le partage des jeux de données qui ont servi à la publication et celui du code utilisé par exemple pour les analyses statistiques.

QS **Pourquoi est-ce important, selon vous ?**

DR L'objectif est de favoriser l'avancement du savoir, plutôt que la compétition et la progression de carrière des individus. C'est d'autant plus important lorsqu'on fait face à des problèmes urgents et planétaires, comme les changements climatiques, la perte de biodiversité ou une pandémie.

C'est d'ailleurs pendant la crise de la COVID-19 qu'on a commencé à parler davantage du partage des données. Les génomes viraux ont ainsi été rendus publics et il y a eu plus de collaboration dans un domaine habituellement régi par la course au brevet. Cela étant, c'était loin d'être parfait : une étude a montré que seulement 13 % des articles publiés sur la COVID-19 [entre décembre 2019 et avril 2020] incluaient des données de recherche. Cela m'a beaucoup surpris ; ce n'est pas encore une pratique acceptée de tous.

QS **Quelle est la différence entre l'accès aux articles scientifiques et l'accès aux données ?**

DR L'article scientifique, c'est une interprétation des données, qui repose en général sur des analyses statistiques spécifiques. C'est très superficiel. Il y a plein d'étapes entre la collecte des données et la publication, avec des possibilités d'erreurs ou encore des divergences d'opinions sur la façon dont on devrait analyser et interpréter les données.

Quand on a accès à l'article de recherche, on a des tableaux, des figures, mais c'est souvent incomplet et mal expliqué. Ce que les chercheurs veulent maintenant, c'est pouvoir évaluer le processus entre la collecte des données et l'interprétation, en ayant accès aux données primaires recueillies.

QS **Le processus de révision par les pairs, qui consiste à faire revoir un article avant sa publication par plusieurs spécialistes du**

• IMAGES : SHUTTERSTOCK.COM ; SANDRA BINNING

Le but de la science ouverte, c'est aussi d'améliorer ce processus de révision par les pairs. Cela permet à plus de gens, dotés de compétences diverses, d'estimer la qualité des données, la pertinence des analyses, leur interprétation et donc la validité des conclusions de l'article.

domaine, ne permet-il pas de s'assurer que l'article est solide ?

DR La révision par les pairs est une étape importante de la recherche et un sujet qui suscite beaucoup de discussions en ce moment. Elle contribue à empêcher la publication d'études erronées, mais ce n'est pas parfait. On le voit d'ailleurs au nombre grandissant d'articles qui sont rétractés.

Un des problèmes est que les éditeurs et les réviseurs sont eux aussi des chercheurs avec des horaires surchargés. Ils n'ont souvent pas le temps de revoir en profondeur les analyses présentées dans une étude et encore moins les données, quand elles sont disponibles.

Certains journaux, comme *Science* ou *Nature*, exigent depuis quelques années que les données nécessaires pour reproduire les analyses statistiques, figures et tableaux dans un article soient disponibles au moment de la publication. D'autres journaux se limitent à le recommander – sans obligation – alors que d'autres encore n'ont pas de politique à cet effet.

Dans tous les cas, la qualité des données partagées est très variable, donc il y a encore place à l'amélioration. Avec des collègues, nous avons établi un barème pour évaluer cet aspect – plus précisément la complétude et la réutilisabilité des données. Une bonne pratique est de partager les données brutes dans un format qui facilite leur réutilisation, comme un fichier texte ou CSV. Pour l'instant, c'est rarement le cas. Ce n'est parfois qu'un PDF ou la photo d'un tableau Excel. C'est inexploitable !

Le but de la science ouverte, c'est aussi d'améliorer ce processus de révision. Cela permet à plus de gens, dotés de compétences diverses, d'estimer la qualité des données, la pertinence des analyses, leur interprétation et donc la validité des conclusions de l'article. Avec plus de transparence, on augmente la confiance.

QS **N'y a-t-il pas de limites éthiques à rendre publiques des données sensibles ou confidentielles ?**

DR Ce sont des aspects importants, mais il est possible de prendre des précautions. C'est ce que fait le Neuro [Institut-hôpital neurologique de Montréal], qui fait partie des établissements avant-gardistes. Avec d'autres instituts de neurosciences, il a travaillé pour s'assurer de rendre les données publiques sans porter atteinte à la confidentialité des dossiers des patients.

On peut ainsi anonymiser les résultats ou partager les métadonnées en disant qu'une étude a été menée auprès de 2 000 patients sur telle maladie. Les personnes ou organismes qui veulent avoir accès aux détails doivent présenter leur demande à un comité qui veille à l'utilisation appropriée des données.

QS **Dans certains domaines, comme l'astronomie ou la physique, les données sont publiques. Pourquoi est-ce différent en biologie ?**

DR Dans certains secteurs où les expériences et les outils coûtent extrêmement cher, comme l'accélérateur du CERN [Organisation européenne pour la recherche nucléaire] ou les grands télescopes, il y a tellement de données que ce serait impossible pour une seule équipe de les analyser. On les rend accessibles pour en tirer un maximum d'informations. En génomique aussi, la culture du partage est plus ancienne.

En revanche, dans les domaines où les expériences sont plus petites, comme en écologie et en biologie de l'évolution, ce n'est pas répandu. Pour les gens qui effectuent des études de terrain, qui travaillent d'arrache-pied pour obtenir du financement et qui suivent leurs populations d'oiseaux pendant des décennies par exemple, le partage des données est moins attirant. Ils ont peur que d'autres scientifiques publient des articles avec leurs données qu'ils auraient pu publier eux-mêmes.

QS **Quand on sait qu'il y a une véritable course à la publication, on comprend ces réticences !**

DR En effet, c'est un tiraillement pour les chercheurs : d'un côté, ils peuvent faire avancer la science en partageant leur travail ; de l'autre, ils craignent de favoriser leurs compétiteurs et de nuire à leur carrière. Et l'on sait qu'en ce moment, c'est dur de faire carrière en recherche, la compétition est féroce. Mais les avantages sont indéniables : d'abord, cela oblige les scientifiques à mieux gérer et organiser leurs données, pour que d'autres puissent les comprendre. Eux-mêmes y gagnent : ils peuvent également mieux les exploiter, même quelques années plus tard. Les chercheurs ne sont pas très doués sur ce plan :

leurs données sont souvent consignées dans une multitude de fichiers Excel avec des codes de couleurs mal définis ! Au bout du compte, c'est donc un gain de productivité. Et souvent, le partage peut mener à des collaborations lorsque le jeu de données intéresse une autre équipe. Mais il faut que les chercheurs soient récompensés pour cette contribution scientifique.

Une étudiante et moi avons interrogé 140 chercheurs de 20 universités canadiennes, et l'on a constaté que la majorité d'entre eux estiment que les avantages du partage sont plus importants que les coûts. Seulement 20 % des chercheurs rapportent un aspect négatif, déplorant le plus souvent le temps que cela leur prend. Certains affirment que leurs données ont été mal interprétées par d'autres ou qu'ils se sont fait couper l'herbe sous le pied pour un article, mais c'est très rare.

QS **Quelle forme pourraient prendre les récompenses aux chercheurs qui donnent dans la science ouverte ?**

DR Il faut que les organismes de financement et les universités encouragent les chercheurs à travailler de façon collective et accordent de l'importance au fait de partager des données de qualité, qui sont réutilisées par d'autres. Le nombre de publications ne doit pas être le seul critère pour une embauche ou l'obtention d'un financement.

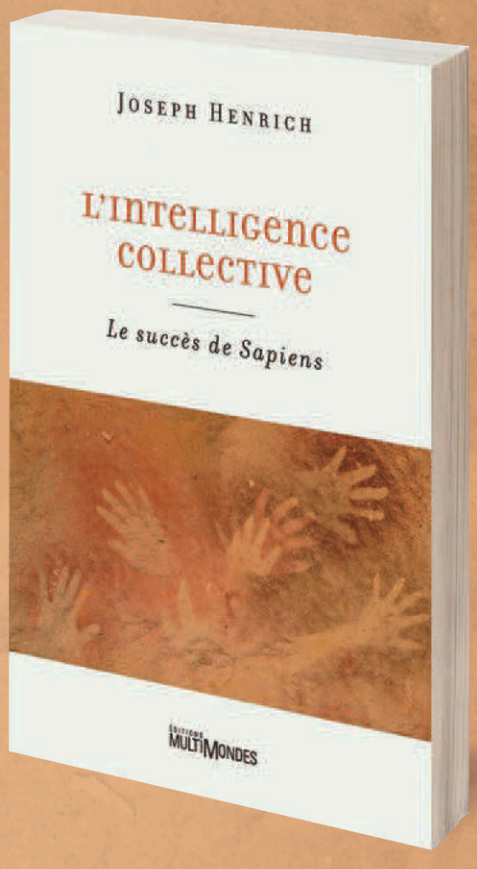
Il y a un mouvement dans cette direction. Je pense entre autres à la Déclaration de San Francisco sur l'évaluation de la recherche, signée par plusieurs universités, qui permet d'évaluer les chercheurs non seulement sur la publication d'articles, mais aussi sur tous les autres produits de la recherche [prépublication d'articles, jeux de données, logiciels ouverts, retombées sociales, etc.]. On veut favoriser un équilibre entre les chercheurs qui recueillent des données et ceux qui les analysent, car il ne faut pas non plus dévaloriser la collecte de données, qui est fastidieuse et qui ne se traduit pas toujours par un grand nombre de publications.

QS **Vous proposez un vrai changement de paradigme alors !**

DR Oui, c'est une révolution. Il y a un appétit de la part des jeunes chercheurs pour changer le système. C'est possible et cela a déjà commencé. Selon moi, le partage des données pourra démocratiser la recherche. Les pays plus riches peuvent se payer de gros laboratoires, des équipements, des voyages… Si les données sont ouvertes, des chercheurs avec moins de moyens y auront accès aussi. Cela ouvre la voie à un rééquilibre des ressources, y compris au sein d'un même pays. ●

Comment SAPIENS *a-t-il cessé d'être* UNE BÊTE *comme les autres ?*

Une formidable synthèse des plus récentes découvertes sur l'évolution.



ÉDITIONS MULTIMONDES

editionsmultimondes.com

Également offert en version numérique

HUMAINE
>>>> CRÉATIVE
AUDACIEUSE

UQAT
CENTRE DU TÉMISCAMINGUE

L'UQAT, fière de participer au développement de modèles agricoles innovants

capables d'accroître la séquestration du carbone et de s'adapter aux changements climatiques!

> Les activités en lien avec l'agriculture **émettent 9,5 % des gaz à effet de serre** (GES) au Québec. Cependant, l'agriculture a le potentiel d'être un acteur clé dans la lutte à la réduction des GES.

> **Comment?** Par la gestion des sols, des cultures, des engrais et des élevages.



Vincent Poirier, professeur en sciences du sol



Station de recherche agroalimentaire de l'Abitibi-Témiscamingue de l'UQAT

10 ans DE RECHERCHE

L'équipe scientifique en agriculture de l'UQAT

s'investit jour après jour à bonifier les connaissances visant à améliorer les conditions environnementales et à promouvoir des pratiques agricoles durables pour l'avenir des générations présentes et futures!

L'expertise de l'UQAT en agriculture, c'est :

- Une équipe scientifique reconnue au Québec, au Canada et ailleurs dans le monde ;
- Une station de recherche équipée à la fine pointe de la technologie ;
- Des connaissances de haut niveau sur les fourrages, les sols et les racines des plantes ;
- Un laboratoire d'analyse agricole ouvert au public.

uqat.ca/recherche/agriculture

Dioxyde de carbone, méthane, oxyde de soufre, particules fines : certains réchauffent l'atmosphère, d'autres empoisonnent l'air. Comment renverser la vapeur ?

CO_2 : OPÉRATION ENFOUISSEMENT
p. 20
LE MAL DE L'AIR
p. 26
PERGÉLISOL : LA LENTE FUITE
p. 32
TRAQUER LE MÉTHANE À PARTIR DE L'ESPACE
p. 35
REVISITER UN AIR D'AUTREFOIS
p. 38



ILLUSTRATION : FRANÇOIS BERGER • DIRECTION ARTISTIQUE : NATACHA VINCENT

CO_2 OPÉRATION ENFOUISSEMENT

Pour sortir de la crise climatique, ou plutôt éviter le pire, l'une des voies envisagées consiste à capter le dioxyde de carbone dans l'air et à le renvoyer… sous terre. Une solution controversée.

PAR MARINE CORNIOU

La ville d'Estevan est la plus ensoleillée du Canada, mais ce n'est pas pour cette raison qu'elle brille à l'étranger. Située dans les plaines poussiéreuses de la Saskatchewan, à 15 km de la frontière américaine, elle est célèbre auprès de ceux qui s'intéressent à l'énergie propre. Pas pour sa filière solaire, non : ironiquement, c'est à sa centrale au charbon que la municipalité doit sa notoriété. En 2014, la centrale de Boundary Dam est devenue la première de la planète à intercepter – du moins en partie – le dioxyde de carbone (CO_2) qu'elle produit avant qu'il soit craché par ses cheminées. Purifié et concentré à l'aide de solvants, le CO_2 capté est ensuite séquestré sous terre, où il ne peut contribuer à l'effet de serre. Ni vu ni connu, en somme.

En sept ans, l'installation a ainsi empêché le relâchement de quatre millions de tonnes de CO_2 dans l'atmosphère – ce qui équivaut aux émissions d'un million de voitures pendant un an.

La technologie est encore en rodage, mais Boundary Dam est le fier chef de file d'un domaine en plein essor : celui de la capture et du stockage du carbone (CSC). Une vingtaine d'installations de CSC fonctionnent déjà dans le monde, dont 13 en Amérique du Nord, et des dizaines de projets sont à l'étude, en particulier aux États-Unis, en Chine et en Europe, pour réduire les émissions de centrales à combustibles fossiles, à biomasse ou celles d'industries polluantes (cimenteries, aciéries, raffineries, usines d'engrais). Pour plusieurs experts, cette stratégie est un passage obligé si l'on veut respecter l'Accord de Paris, qui vise à contenir la hausse de la température moyenne de la planète bien en dessous de deux degrés Celsius par rapport aux niveaux préin-



ILLUSTRATION : FRANÇOIS BERGER

dustriels. « Il y a urgence, c'est pourquoi les projets se multiplient », résume Isabelle Czernichowski-Lauriol, géologue au Bureau de recherches géologiques et minières en France et spécialiste internationale du stockage géologique du CO_2.

Le concept est le même partout : on intercepte le CO_2, on le comprime sous forme quasi liquide, on l'achemine par pipeline si nécessaire et on l'injecte quelque part en profondeur dans le sous-sol. En bref, on le renvoie d'où il vient !

Car à force d'extraire charbon, pétrole et gaz naturel des entrailles de la Terre et de tout brûler, les humains ont libéré des milliards de tonnes de gaz carbonique. La teneur en CO_2 dans l'atmosphère, associée à un effet de serre, est ainsi passée de 280 ppm (parties par million, soit 0,028 %) à près de 420 ppm en 200 ans. Or, on connaît la chanson : si le taux de CO_2 continue à croître, l'humanité va droit dans le mur. C'est pour cette raison que de nombreux États, dont le Canada, visent la carboneutralité (soit un bilan d'émissions nul) pour 2050. « C'est un énorme défi et il y aura toujours des émissions incompressibles, qu'on ne pourra pas annuler malgré les efforts pour changer les procédés ou améliorer l'efficacité énergétique. Il va falloir les compenser par des puits de carbone, qu'ils soient naturels, comme les forêts et les sols, ou géologiques, poursuit Isabelle Czernichowski-Lauriol. Ce n'est pas une solution miracle, mais c'est indispensable. »

Le rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publié en 2018 lui donne raison. Il stipule qu'il faut non seulement diminuer de 45 % les émissions de CO_2 d'ici 2030 et les ramener à zéro avant 2050 (la fameuse carboneutralité), mais qu'il faudra aussi éliminer « de 100 à 1 000 gigatonnes [milliards de tonnes] de CO_2 de l'atmosphère au cours du 21e siècle » pour limiter la casse. Cette évacuation du trop-plein, en quelque sorte, est désignée par l'expression « émissions négatives ». Et c'est principalement sur la CSC qu'on mise pour y parvenir.

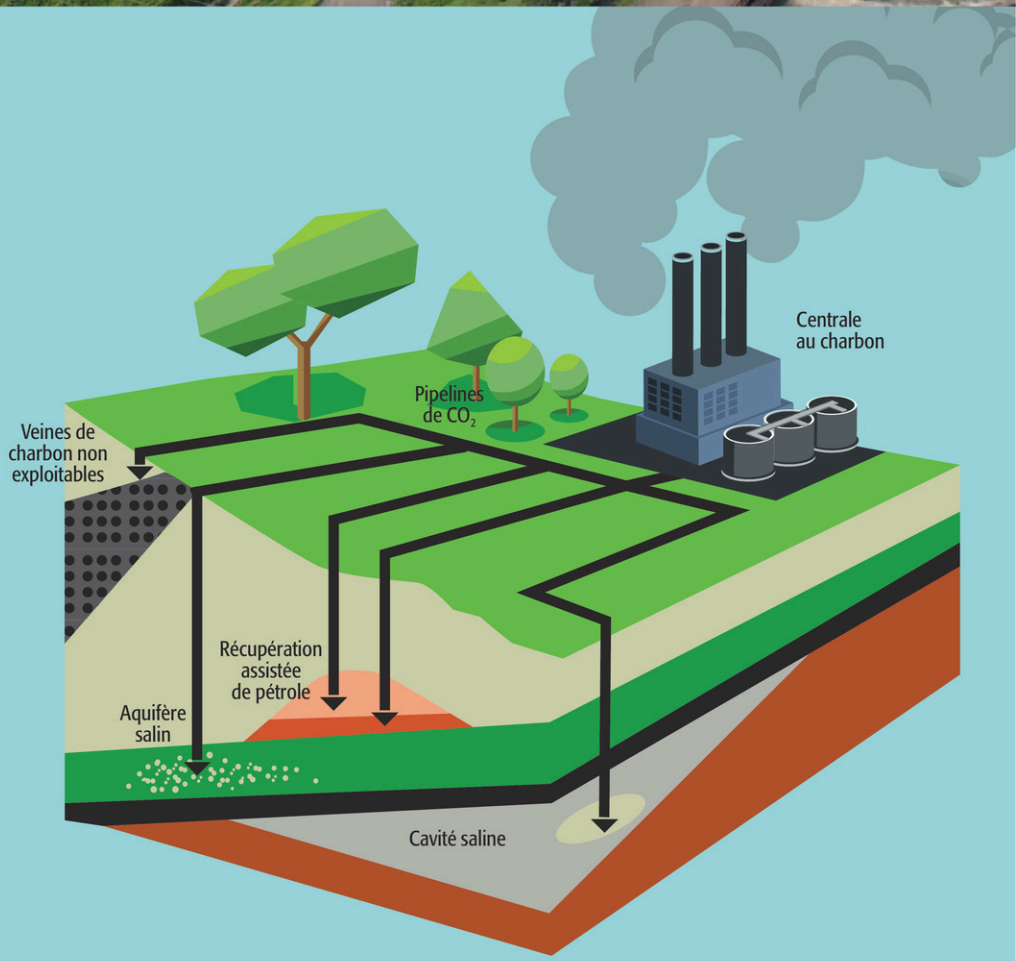
UNE HISTOIRE DE PÉTROLE

Si Boundary Dam fait figure de pionnière, les techniques de capture du CO_2 sont en fait maîtrisées depuis longtemps, rappelle Louis-César Pasquier, professeur à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) et spécialiste de la récupération et de l'utilisation du CO_2. « La captation du CO_2 par une solution d'amine [un solvant] est brevetée depuis les années 1950 parce que c'est ce qu'on utilise pour purifier le gaz naturel avant

Photo aérienne de la centrale de Boundary Dam. L'installation de capture du CO_2 est à droite. Dans un premier temps, un solvant retire le dioxyde de soufre des fumées, qui passent ensuite dans un second solvant qui retient le CO_2. Celui-ci est purifié, puis comprimé pour voyager par pipeline.

« Dans l'avenir, nous aurons besoin de ces technologies d'émissions négatives. C'est pourquoi il faut les développer. »

– Dale Beugin, spécialiste en politique environnementale et en économie à l'Institut canadien pour des choix climatiques



• PHOTO : SASKPOWER • SCHÉMA ADAPTÉ DE 2015 PEARSON EDUCATION, INC.

sa commercialisation », précise-t-il. Les premiers projets à visée « climatique », eux, ont vu le jour dans les années 1990, sans grand enthousiasme en raison des coûts énergétiques et financiers élevés. « Malheureusement, l'environnement est quelque chose qui ne paie pas », dit laconiquement le chercheur.

Il y a toutefois un domaine où le CO_2 possède une valeur économique : les industries gazière et pétrolière. Si bien qu'en matière de CSC, ce sont pour l'instant les Total, Shell et autres BP qui mènent la danse. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), sur les quelque 40 millions de tonnes de CO_2 de source industrielle captées et stockées chaque année, environ 70 % concernent des opérations gazières et pétrolières.

C'est que le gaz carbonique peut être utilisé à la place de l'eau comme piston pour « purger » le pétrole qui stagne au fond des puits. Une pratique courante depuis les années 1970, appelée récupération assistée de pétrole. « On va ainsi chercher les 30 % de pétrole résiduel », explique la géologue Susan Hovorka, de l'Université du Texas à Austin. Ce faisant, la quasi-totalité du CO_2 reste piégée pour de bon au fond du puits. « Le CO_2 s'infiltre par capillarité dans les pores entre les grains de sable, à la place du pétrole. Un peu à la manière d'une tache de gras qui imprègne les fibres d'un vêtement, une fois sur place il ne peut pas être délogé facilement », souligne-t-elle. De manière générale, les gisements matures, partiellement vidés, de pétrole ou de gaz se prêtent donc bien au stockage du carbone.

Quelque 500 000 barils de pétrole sont produits quotidiennement dans le monde à l'aide de cette technique, d'après l'AIE. À Boundary Dam, une partie du CO_2 (la quantité est confidentielle) est ainsi utilisée pour exploiter les gisements de pétrole avoisinants – l'autre étant plutôt enfouie dans le sous-sol sans servir à l'extraction.

Autre exemple d'installation en fonctionnement depuis l'été 2020 : l'Alberta Carbon Trunk Line, qui collecte le CO_2 d'une raffinerie et d'une usine d'engrais du nord-est d'Edmonton et le transporte par pipeline à 240 km de là, dans des champs pétroliers matures. Un million de tonnes de gaz carbonique ont ainsi été enfouies en huit mois d'activité tout en permettant la récupération de pétrole.

Cette pratique est particulièrement prisée aux États-Unis depuis les années 2010, où elle est soutenue par des crédits d'impôts fédéraux (jusqu'à 50 $ par tonne de carbone séquestrée). Certaines études menées au Texas concluent même que le stockage du CO_2 dans le réservoir de pétrole compense les émissions de gaz à effet de serre engendrées par la combustion du produit final (le carburant par exemple).

Cette notion contre-intuitive d'« hydrocarbures carboneutres » est fortement mise à mal par le fait que, pour l'instant, la majorité du gaz injecté dans les puits de pétrole est lui-même extrait de réservoirs souterrains naturels de CO_2. Rien à voir, donc, avec un quelconque « recyclage ». Ainsi, aux États-Unis, seuls de 15 à 30 % du CO_2 injecté proviendraient d'activités industrielles, comme des usines d'engrais, comptabilise l'AIE.

Mais surtout, les experts du climat sont unanimes : pour limiter le réchauffement, il faut se libérer des combustibles fossiles au plus vite. L'AIE a rendu en mai 2021 un rapport sans équivoque sur les mesures à prendre pour atteindre les objectifs de « zéro émission nette » en 2050. Selon l'organisation, il faut cesser dès aujourd'hui tout investissement dans les nouveaux gisements d'énergies fossiles et favoriser massivement les énergies renouvelables comme l'éolien et le solaire tout en électrifiant les transports.

Dale Beugin, spécialiste en politique environnementale et en économie à l'Institut canadien pour des choix climatiques, reconnaît que le paradoxe de la récupération assistée de pétrole avec du CO_2 ternit la réputation de la CSC. « Mais dans l'avenir, nous aurons besoin de ces technologies d'émissions négatives. C'est pourquoi il faut les développer », estime-t-il.

Qu'on l'approuve ou non, l'industrie pétrolière a donc une longueur d'avance pour innover : elle possède les installations d'injection et de transport, le savoir-faire et les connaissances géologiques. Ce poids lourd du réchauffement climatique, responsable de plus de 40 % des émissions globales de gaz à effet de serre, subit aussi de plus en plus de pression pour verdir ses activités. Et voit dans l'enfouissement du CO_2 rejeté par d'autres pollueurs une nouvelle occasion d'affaires.

LE COUVERCLE SUR LA MARMITE

Depuis peu, les pétrolières investissent donc dans des projets de CSC d'envergure avec l'appui des gouvernements, notamment en Europe. Plutôt que des puits en fin de vie, qui peuvent poser des problèmes d'étanchéité et sont souvent éloignés des zones industrielles, ce sont surtout des formations rocheuses profondes, les aquifères salins, qui sont ciblées pour du stockage géologique à grande échelle. Il s'agit de roches sédimentaires poreuses, de type grès ou calcaire, imbibées d'eau très salée et donc impropre à la consommation. Au-dessus de ces aquifères se superposent plusieurs couches géologiques imperméables telles que des argiles, qui font office de couvercles. « Au-delà de 800 m de profondeur, la pression et la température sont telles que le CO_2 se trouve dans un état dense dit supercritique, aux propriétés intermédiaires entre un gaz et un liquide, explique la géologue Isabelle Czernichowski-Lauriol. Il remplit l'espace poral des roches comme un liquide dans une éponge. »

Les estimations quant à la capacité de stockage totale varient ; mais les aquifères salins de la planète seraient suffisamment abondants pour absorber de 1 000 à 20 000 milliards de tonnes de CO_2. En clair, on ne manque pas d'espace !

Histoire de maximiser l'efficacité du procédé, des chaînes de captage, de transport et de stockage se mettent en place. En décembre 2020, le Parlement norvégien a ainsi voté le financement d'un projet de séquestration du CO_2, nommé Langskip, le plus avancé en Europe. L'un de ses volets, baptisé Northern Lights, est porté par Shell, Total et Equinor (mais financé à 80 % par le gouvernement). Le but : mettre sur pied un service de collecte et de stockage du carbone par injection dans un aquifère salin à 2 600 m sous la mer du Nord. Au début, le projet permettra de récupérer le CO_2 d'une cimenterie et d'un incinérateur de déchets en Norvège, mais il pourrait à terme être étendu aux industries des pays voisins. « Dès 2024, on injectera sous terre 1,5 million de tonnes par an, puis 5 millions dans une deuxième



QUELQUES CHIFFRES

Les rejets de CO_2 cumulatifs dus à des activités humaines ont été estimés à environ

2 000 GIGATONNES

entre 1870 et 2015.

Aujourd'hui, les émissions anthropiques annuelles atteignent

40 GIGATONNES.

Environ la moitié de ces émissions sont absorbées naturellement par les océans et la biosphère, le reste s'accumule dans l'atmosphère et contribue au réchauffement planétaire.

Au total, à peine

260 MILLIONS DE TONNES DE CO_2

ont été stockées dans des puits géologiques à ce jour.

phase. Nous serons la première chaîne commerciale à proposer le transport du CO_2 par bateau, puis par pipeline pour un stockage géologique permanent », indique Jean-Philippe Hiegel, directeur de la stratégie et du marché pour Northern Lights.

De leur côté, les Pays-Bas ont annoncé en mai qu'ils investiraient deux milliards d'euros pour enfouir du gaz carbonique produit par les industries de Rotterdam dans d'anciens gisements gaziers au large des côtes. Un partenariat entre BP, Royal Dutch Shell, Total et le gouvernement britannique devrait également aboutir à un réseau de transport et de stockage en mer du Nord en 2026. Avec l'ambition d'avoir la première zone industrielle carboneutre au monde d'ici 2040.

En Amérique du Nord aussi, on mutualise les efforts. L'entreprise américaine Summit Carbon Solutions a annoncé cette année un projet de deux milliards de dollars destiné à recueillir le CO_2 de 17 usines de biocarburant en Iowa. Un réseau de pipelines permettra ensuite d'aller enterrer la récolte dans les aquifères salins du Dakota du Nord. Si tout se passe bien, en 2024, 10 millions de tonnes de CO_2 pourraient être ainsi injectées en profondeur – ce qui équivaudrait à retirer deux millions de véhicules de la circulation.

À ce chapitre, le Canada possède un des sous-sols les plus avantageux du monde. « On peut imaginer que le modèle d'affaires de l'Alberta devienne un jour le stockage du CO_2 », illustre Dale Beugin. La Saskatchewan est bien équipée aussi : le projet pilote Aquistore accueille une partie du CO_2 de Boundary Dam, à trois kilomètres de profondeur. La zone est bardée de capteurs et d'outils de surveillance permettant notamment de s'assurer de l'étanchéité du réservoir.

Au Québec, le gouvernement avait financé une chaire de recherche à l'INRS de 2008 à 2013 pour étudier le stockage géologique dans les aquifères de la région de Bécancour. La deuxième phase du projet, consistant en des tests d'injection, n'a finalement jamais eu lieu. « Il y a eu un désintérêt vers 2014; la recherche a cessé d'être subventionnée. Mais je ne serais pas surpris que les choses reprennent », avance Louis-César Pasquier. Il précise toutefois qu'autour de Bécancour « l'acceptabilité sociale est un enjeu ».

Le fait d'enterrer un « polluant » à proximité de zones peuplées enthousiasme rarement les résidants. Ces derniers craignent principalement des fuites de CO_2 au travers des puits de forage ou des failles rocheuses, soit vers l'atmosphère, soit dans les nappes phréatiques, et des microséismes lors de l'injection. « Plusieurs expériences de relâchement contrôlé de CO_2 ont montré que d'éventuelles fuites ne causeraient pas de dommages majeurs. De plus, nous avons un recul de 50 ans quant à certains lieux d'enfouissement qui sont très stables », assure Susan Hovorka, signalant que le CO_2 n'est pas toxique en soi. De son côté, Isabelle Czernichowski-Lauriol est elle aussi très confiante. « L'inquiétude des populations est tout à fait compréhensible, mais sur le plan scientifique, on sait que le stockage peut être sûr pendant de très longues périodes [des milliers d'années]. Les gisements naturels de CO_2, ça existe ! On ne fait qu'imiter la nature. »

Quant au déclenchement de secousses sismiques, la probabilité semble plutôt minime à en juger par les projets de surveillance, dont celui qui a débuté en 2000 dans les champs pétroliers de Weyburn-Midale, en Saskatchewan.

D'UNE PIERRE DEUX COUPS

Mais pour plusieurs chercheurs, la voie la plus sûre demeure le stockage du carbone sous forme rocheuse. En présence de calcium ou de magnésium, contenus dans certaines roches, le CO_2 gazeux se transforme en minéraux carbonatés – en pierre, autrement dit. « La carbonatation minérale garde le CO_2 sous une forme stable, inerte, et ce, indéfiniment », mentionne Louis-César Pasquier.

L'autre avantage, c'est qu'il n'y a pas besoin d'enfouir le CO_2 pour le carbonater : il suffit de le mettre en contact avec de l'eau et des roches de surface, par exemple des déchets miniers. Mais la magie opère aussi avec des résidus de béton ou des scories d'aciérie. On fait ainsi d'une « pierre » deux coups : on séquestre le gaz carbonique et l'on valorise des déchets. « C'est de l'économie circulaire ! On crée des matériaux qui peuvent être valorisés dans le génie civil, en remplacement du ciment dans la construction, fait observer le chercheur, qui s'est associé à l'entreprise

• IMAGE : SHUTTERSTOCK.COM

ECO2 Magnésia pour produire de l'oxyde de magnésium à partir de résidus de mines d'amiante. À terme, on pourra aussi utiliser le CO_2 pour fabriquer des plastiques et des carburants. Cela demande encore trop d'énergie, mais dans des endroits comme le Québec, avec l'hydroélectricité, ça pourrait devenir intéressant. »

Faire du CO_2 une richesse plutôt qu'un rebut est assurément une voie d'avenir. Elle séduit ceux qui estiment que le stockage géologique revient à « cacher les miettes sous le tapis » en permettant aux compagnies pétrolières et autres industries polluantes de prolonger leurs activités et de retarder la transition énergétique. À cela, les chercheurs répondent tous la même chose : aucune de ces solutions ne suffira à elle seule ; tous les moyens possibles doivent être mis en œuvre, au premier rang desquels la réduction des émissions. « Ce n'est pas avec une seule méthode qu'on va régler le problème. Il faut trouver des solutions à l'échelle du défi », résume Louis-César Pasquier.

UNE GOUTTE DANS L'OCÉAN

Et justement, c'est en parlant d'échelle que le bât blesse. La plupart des installations actuelles de CSC ou de carbonatation sont de taille modeste ou ne sont que des projets pilotes. Pour que la CSC ait un effet sur le climat, il faudrait un immense saut d'échelle : selon l'AIE, pour suivre les recommandations du GIEC, de 30 à 60 lieux de stockage devraient être mis en service chaque année jusqu'en 2050. Et pour passer au volet des émissions négatives, ce nombre devrait être doublé à partir de 2050. Les efforts actuellement déployés reviennent à vider la mer à la petite cuillère : on capture 40 millions de tonnes de CO_2 annuellement, mais on en relâche 1 000 fois plus.

Pour les détracteurs de la CSC, le danger est grand de compter sur des technologies aussi incertaines pour nous sortir de la crise climatique. Dans leurs scénarios de transition, le GIEC et l'AIE proposent des options dans lesquelles la CSC joue un rôle plus ou moins important, mais jamais nul. Idem pour l'Institut canadien pour des choix climatiques, qui a envisagé 60 trajectoires (faisant en partie appel à la CSC) vers la carboneutralité du Canada dans un rapport paru début 2021.

Dans un article publié en mai dernier dans *Nature Communications*, deux chercheurs en développement durable, Lorenz Keyßer (École polytechnique de Zurich) et Manfred Lenzen (Université de Sydney), dénoncent ce pari hasardeux et « spéculatif ». Plutôt que de se reposer sur des technologies non éprouvées à grande échelle, ils proposent un modèle prônant la décroissance, c'est-à-dire la fin de la croissance économique infinie, insoutenable avec des ressources finies, pour atteindre les objectifs du GIEC avec plus de probabilité. « La décroissance devrait être considérée, et débattue, au moins aussi sérieusement que les voies technologiques risquées sur lesquelles les politiques climatiques traditionnelles se sont appuyées », notent-ils.

Pour Dale Beugin, l'avenir de la CSC dépend surtout de sa rentabilité. « Dans nos 60 scénarios, on a joué avec différentes hypothèses concernant la baisse des prix de la CSC. Avec des politiques audacieuses, les coûts pourraient diminuer », dit-il. L'élément clé : le prix du carbone, c'est-à-dire la tarification des émissions (par exemple faire payer les pollueurs pour chaque tonne de CO_2 rejetée). Pour l'instant, la capture d'une tonne de CO_2 (l'étape qui représente 80 % des coûts de la CSC) coûte de 15 à 120 $ US selon le taux de dilution du CO_2 dans les flux de gaz récupérés. Trop cher au regard d'une taxe sur le carbone timide sur tous les marchés.

« Il faut mettre en œuvre des mécanismes financiers permettant aux industriels d'investir dans les technologies innovantes pour le climat, déclare Isabelle Czernichowski-Lauriol. Mais je pense que la principale limite est le manque de reconnaissance de ce type de puits de carbone et le manque de volonté pour passer à l'action. » Là-dessus, tout le monde s'entend.

À LIRE SUR LE WEB :

Capter le CO_2 dans l'air et l'océan
www.quebecscience.qc.ca/environnement/capter-co2-air-ocean

Emprisonner le CO_2 dans les résidus miniers
www.quebecscience.qc.ca/environnement/co2-mines-vertes



CANTONS-DE-L'EST

MAURICIE
ET LANAUDIÈRE

OUTAOUAIS

Grâce au programme Explore Québec, profitez de 25 % de rabais sur les escapades de 3 jours en formule En liberté. Belles occasions de découvrir le Québec!

RÉSERVEZ VOTRE ESCAPADE

veloquebecvoyages.com
514 521-8356 • 1 800 567-8356, poste 506

Vélo Québec VOYAGES
Titulaire d'un permis du Québec

Photo : Didier Bertrand

LE MAL DE L'AIR

NOUS RESPIRONS QUOTIDIENNEMENT ENVIRON 12 000 LITRES D'AIR. EST-IL SAIN ?

PAR MÉLISSA GUILLEMETTE

ILLUSTRATION : FRANÇOIS BERGER
DIRECTION ARTISTIQUE : NATACHA VINCENT

Entre le parterre fleuri d'un jumelé et l'allée asphaltée d'une résidence unifamiliale de Rivière-des-Prairies, dans l'est de Montréal, un bout de terrain accueille une étrange cabane. Comme une minimaison sans fenêtres.

Il s'agit en fait de l'une des 257 stations du Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique du Canada, un programme fédéral qui existe depuis 1969. Le responsable des 11 stations de l'agglomération montréalaise, Fabrice Godefroy, nous fait faire le tour du propriétaire. Du trottoir, il attire notre attention sur la coiffe de la cabane, une structure métallique où sont installés des préleveurs. « Une fois tous les trois jours, pendant 24 heures, on pompe l'air qui passe à travers des filtres qui sont envoyés ensuite au laboratoire pour analyse. »

À l'intérieur de la cabane, des analyseurs gros comme des tourne-disques fonctionnent quant à eux en continu. M. Godefroy pointe des conduits au mur. « L'air extérieur arrive dans ces petits tubes et chaque analyseur aspire ce dont il a besoin. » Chaque appareil se spécialise dans la détection d'un polluant en particulier : l'ozone, le monoxyde de carbone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et les particules respirables d'un diamètre de moins de 2,5 microns (désignées par le terme $PM_{2,5}$). Ces instruments permettent de définir en temps réel l'indice de la qualité de l'air autour de la station.

Son équipe a publié un rapport sur l'effet du confinement sur les résultats des analyses réalisées par les stations montréalaises de la mi-mars à la mi-avril 2020, alors que la ville tournait au ralenti. En moyenne, l'indice de la qualité de l'air a été 10 % meilleur que celui des semaines correspondantes des années 2017 à 2019. De plus, il n'y a eu aucun jour de mauvaise qualité de l'air, comparativement à un à huit pour les années précédentes. Si l'influence exacte du confinement sur ces





La station 55 du Réseau de surveillance de la qualité de l'air de Montréal est entre autres équipée d'un analyseur qui suit les concentrations de carbone noir, ces particules fines issues du chauffage au bois et des transports. En 2019, 6 500 tonnes de carbone noir ont été émises au Québec, d'après un rapport fédéral récent.

observations reste à préciser (voir l'encadré à la page suivante), le retrait temporaire d'une partie des émissions « permet de se rendre compte de ce qui peut être fait », souligne Fabrice Godefroy.

Bien que la qualité de l'air s'améliore continuellement depuis 50 ans à Montréal comme ailleurs au pays, des enjeux demeurent. Chaque année, 15 300 Canadiens (dont 4 000 Québécois) meurent de façon prématurée à cause de la pollution atmosphérique, selon un rapport récent de Santé Canada. Plusieurs autres en souffrent de façon chronique : par exemple, les Canadiens ont collectivement accumulé 35 millions de jours avec symptômes respiratoires sévères causés par la pollution en 2016. Et tout cela coûte cher ! La même année, le fardeau économique des répercussions sanitaires de cette pollution s'élevait à 120 milliards de dollars. De toute évidence, le combat pour une meilleure qualité de l'air n'est pas terminé.

Pourtant, ce n'est plus un sujet « à la mode », remarque André Bélisle. Ce militant environnementaliste a cofondé l'Association québécoise de lutte contre la pollution atmosphérique (AQLPA) en 1982 (pour la petite histoire, un article de *Québec Science* sur les pluies acides a grandement contribué à sa réflexion). Cet organisme fait partie de ceux qui ont mis de la pression pour obtenir l'accord Canada–États-Unis sur la qualité de l'air, en 1991. Trente ans plus tard, « on parle uniquement de gaz à effet de serre et de réchauffement de l'atmosphère, et je trouve qu'on fait une grave erreur ».

André Bélisle juge qu'il y a eu trop peu d'actions politiques pour réduire les $PM_{2,5}$ et les oxydes d'azote. Ces derniers sont aussi connus sous le nom de NO_x et ils sont produits surtout par le secteur des transports. À cet effet, M. Bélisle déplore particulièrement l'abandon du programme d'inspection environnementale des véhicules automobiles à la suite des élections provinciales de 2012. Le chauffage au bois est aussi dans sa mire. « Ça fait 10-15 ans que l'AQLPA dit que les particules relâchées par les poêles peuvent être nocives pour la santé, et tout le monde le reconnaît aujourd'hui. Mais les autorités n'ont toujours pas mis en place les mesures nécessaires pour les limiter. » Seules Montréal et quelques municipalités de la région ont adopté des règlements à ce chapitre ces dernières années, et la Ville de Québec commence à soutenir financièrement le retrait et le remplacement des poêles qui n'ont pas de certification environnementale; ces appareils y seront carrément interdits à partir de septembre 2026. Il faut savoir qu'au Québec 44 % des $PM_{2,5}$ proviennent du chauffage au bois et que ces particules fines sont considérées comme le polluant atmosphérique le plus mortel.

DES POUMONS AU PLACENTA

À chaque inspiration, les polluants pénètrent dans nos précieux et fragiles poumons, d'où les problèmes respiratoires. « Mais malheureusement, cela ne s'arrête pas là, car certains des gaz et les particules les plus fines vont au-delà, dans la circu-

• PHOTO : DONALD ROBITAILLE



EN CHIFFRES

AU COURS DE 2019 AU QUÉBEC,
L'INDICE DE LA QUALITÉ DE L'AIR A ÉTÉ

Bon 62 %
Acceptable 37 %
Mauvais 2 %

Les taux ont été arrondis par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, d'où le total de 101 %.

lation sanguine, et peuvent affecter tous les organes, du cœur au placenta chez la femme enceinte – c'est l'un des organes les plus irrigués », explique Rémy Slama, épidémiologiste environnemental et directeur de recherche à l'Inserm (Institut national de la santé et de la recherche médicale), en France.

Pour l'instant, on estime que de 60 à 80 % des décès attribuables à la pollution sont liés à des maladies cardiaques ou circulatoires. Mais on ne cesse d'élargir le spectre des effets négatifs de la pollution atmosphérique : on évoque maintenant le diabète, les rétinopathies, l'autisme, les maladies de Parkinson et d'Alzheimer, entre autres. Des travaux publiés dans le *British Medical Journal* en 2019 et basés sur les données médicales de millions d'hospitalisations aux États-Unis ont trouvé des associations méconnues entre une exposition à court terme (la veille et le jour même) aux $PM_{2,5}$ et des problèmes aussi variés que la septicémie, l'insuffisance rénale et l'infection urinaire. Si les maladies sont diverses, c'est peut-être que les mécanismes sont nombreux ; on sait que les polluants peuvent notamment causer de l'inflammation, entraîner une augmentation du stress oxydatif – qui perturbe le fonctionnement des cellules – et altérer l'expression de certains gènes.

En mai dernier, Rémy Slama et des collègues faisaient paraître une méta-analyse qui laisse entendre que les polluants atmosphériques influencent le développement de cancers du sein, particulièrement le dioxyde d'azote (NO_2). Les travaux sur cette association sont encore émergents, mais l'équipe évalue que ce polluant pourrait être lié à trois pour cent des cancers du sein diagnostiqués en France. « L'effet est plausible, car l'air pollué contient de nombreuses substances cancérigènes ainsi que des substances perturbant l'axe œstrogénique, qui joue un rôle dans la survenue de certains cancers du sein, précise Rémy Slama. Mais davantage de travaux mériteraient d'être conduits [sur les mécanismes et en toxicologie expérimentale] pour renforcer encore la preuve. »

CERNER L'EFFET DU CONFINEMENT

Ces derniers mois, de nombreuses études ont montré que les polluants sont à la baisse dans de nombreuses villes du monde lors de confinements stricts. Mais dans quelle proportion cette diminution est-elle réellement due au confinement et pas aux conditions météorologiques, à la saisonnalité ou à l'évolution attendue d'une année par rapport à l'autre, sachant que la plupart des polluants diminuent de façon continue depuis plusieurs décennies ?

Une équipe de chercheurs du gouvernement fédéral a exploré cette question dans des travaux qui ont été publiés au printemps dans la revue savante *Air Quality, Atmosphere & Health*. « Le but ultime de cet article était d'essayer de relever tous les facteurs confondants, de souligner la complexité du phénomène », indique une auteure de l'étude, Rabab Mashayekhi, du Centre météorologique canadien, basé à Dorval.

Le groupe s'est penché sur les cas de Vancouver, Calgary, Toronto et Montréal. En fouillant les données du Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique du Canada, les chercheurs ont d'abord remarqué que le déclin était déjà plus prononcé au début de l'année que ce qui était attendu, ce qui laisse croire que 2020 était une année spéciale avant même le début de la crise.

L'équipe a ensuite simulé le printemps 2020 et ses conditions météorologiques selon deux modèles : l'un avec des sources d'émissions « normales » et l'autre avec les sources révisées à la baisse d'après les meilleures informations disponibles (par exemple les données enregistrées par Apple et Google quant aux déplacements des habitants des quatre villes). La comparaison donne une idée de l'effet des mesures sanitaires. « Nous avons noté une amélioration [attribuable au confinement] du côté du dioxyde d'azote [NO_2] et des particules fines [$PM_{2,5}$] dans les quatre villes, mais le niveau d'amélioration varie entre les villes et au sein d'une même ville », expose Rabab Mashayekhi.

Pour le NO_2, la réduction était de 31 à 34 % plus forte d'après le modèle avec confinement par rapport au modèle « normal », selon les scénarios du groupe. L'effet était plus modeste pour les $PM_{2,5}$: on parle d'une réduction supplémentaire de 6 à 17 %.

Assurément, « le confinement est un évènement extrême qui peut aider les spécialistes de la qualité de l'air et les équipes qui planifient le futur », dit la scientifique.

Mais qui donc décède en raison de la pollution ? Personne ne le sait vraiment. Santé Canada établit ses estimations à partir des risques décrits par des études épidémiologiques. Au Royaume-Uni, toutefois, le phénomène porte désormais un nom : celui d'Ella Adoo-Kissi-Debrah.

Cette fillette qui habitait Londres est morte à l'âge de sept ans, en 2013, d'une insuffisance respiratoire aigüe causée par une grave crise d'asthme. Avant ce jour terrible, ses problèmes respiratoires l'avaient déjà conduite plusieurs fois à l'hôpital. Il aura fallu huit ans, et beaucoup de détermination de la part de sa mère, pour qu'un coroner reconnaisse que la pollution de l'air excessive autour de sa résidence a contribué à son triste sort. « Pendant la durée de sa maladie, entre 2010 et 2013, elle a été exposée à des niveaux de dioxyde d'azote et de particules fines au-delà des recommandations de l'Organisation mondiale de la santé, peut-on lire dans le rapport daté d'avril 2021. La principale source de son exposition était les émissions dues à la circulation routière. » Sa famille vivait à 25 m de la South Circular Road, une route fortement achalandée de la capitale, et ignorait tout du dépassement des normes.

Cette mention de la pollution atmosphérique dans un rapport de coroner est possiblement une première dans le monde, avance la BBC. Au Québec, le Bureau du coroner confirme n'avoir « aucun cas » de décès lié à cette cause.

Le cardiologue et professeur de médecine de l'Université de Montréal François Reeves résume le défi : « Quand on parle de causalité directe, c'est plus difficile à déterminer. On n'a pas de marqueur défini de la pollution pour l'athérosclérose par exemple. Et si on prend un morceau de cancer du poumon, on ne peut pas en trouver la cause ! » Dans les faits, la plupart des maladies sont multifactorielles : les facteurs de risque s'additionnent (pollution, génétique, habitudes de vie)…

Le Dr Reeves, auteur de *Planète Cœur : santé cardiaque et environnement*, réfléchit. « C'est drôle que le cas de la fillette se soit passé à Londres, car tout a commencé dans cette ville. »

En 1952, Londres a vécu un épisode historique de smog. Pendant cinq jours, un brouillard dense a enveloppé la ville. Les coupables : des conditions météorologiques particulières combinées avec l'air lourdement pollué par la combustion au charbon et les nouveaux bus au diésel. Plus de 12 000 personnes sont mortes et des dizaines de milliers d'autres sont tombées malades. « Les gens se demandaient si c'était une épidémie. Mais quand le smog est parti, la mortalité est redevenue normale. L'épisode a été le signal d'alarme sur le lien entre la pollution et la santé : il a mené à la première loi du monde sur la qualité de l'air », rappelle le Dr Reeves.

Depuis, les pays les plus riches, comme le Royaume-Uni, ont vu leurs niveaux de pollution atmosphérique diminuer. Il semble d'ailleurs y avoir une sorte de courbe en U inversé : en général, les pays pauvres comptent peu de décès liés à la pollution extérieure (Éthiopie, Nicaragua) ; les économies émergentes en ont beaucoup (Inde, Égypte) ; et les États riches reviennent à des niveaux plus bas (Israël, Nouvelle-Zélande), interprète le site Our World in Data. Faut-il pour autant accepter les niveaux actuels chez nous ? « Si l'on veut continuer à mettre 120 milliards de dollars par année sur un problème artificiel – parce que oui, on l'a créé –, c'est une question de jugement, lance le Dr Reeves. Y a-t-il autre chose de mieux à faire avec ces 120 milliards ? »

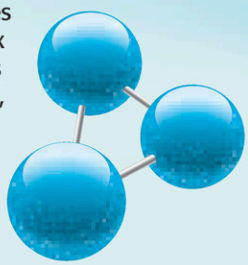
TENDANCES POUR LES PRINCIPAUX POLLUANTS AU QUÉBEC

OZONE (O_3)

Dans la stratosphère, ce gaz nous protège des rayons du soleil : c'est la fameuse couche d'ozone. Mais au niveau du sol, l'ozone contribue à déclencher l'asthme ou à augmenter la fréquence des crises, en plus d'aggraver les coronaropathies et d'accroître le risque de complications de grossesse. Il se forme à partir de l'interaction entre les rayons du soleil et d'autres polluants dits « précurseurs » qui résultent de l'utilisation de combustibles fossiles. L'ozone voyage dans l'atmosphère et peut donc se trouver à des lieues de la source d'émission de ses précurseurs. Enfin, ce gaz contribue fortement au smog.

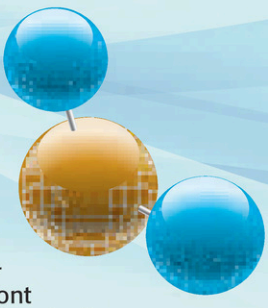
Entre 2000 et 2019, les concentrations d'O_3 dans l'air extérieur ont augmenté de 18 % au Québec, selon les données transmises par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC).

Puisque la production d'ozone s'accélère quand les températures s'élèvent, un rapport récent de l'Institut canadien pour des choix climatiques évalue que, d'ici la fin du siècle, les concentrations se seront accrues de 22 à 47 % en ville, durant la saison estivale, au Canada.



DIOXYDE DE SOUFRE (SO_2)

Ce gaz est connu pour participer au phénomène des pluies acides. Il est également associé à de multiples maladies. Au Québec, de 1990 à 2008, l'industrie a été responsable de 85 % des émissions de dioxyde de soufre. D'ailleurs, « les localités situées à proximité des plus gros complexes industriels mesurent des concentrations de dioxyde de soufre moyennes jusqu'à 27 fois plus élevées que ce qui est mesuré dans les milieux urbains », indique le dernier bilan annuel du Québec, publié en 2019.



Entre 2000 et 2019, les concentrations moyennes de SO_2 ont diminué de 80 % dans la province, toujours selon le ministère.

• IMAGES : SHUTTERSTOCK.COM

Le Dr Stéphane Perron, médecin à la Clinique de médecine du travail et de l'environnement du Centre hospitalier de l'Université de Montréal et rattaché à l'Institut national de santé publique du Québec



L'ANGLE MORT

À la Clinique de médecine du travail et de l'environnement du Centre hospitalier de l'Université de Montréal, le Dr Stéphane Perron prend la pleine mesure du problème. C'est là que sont dirigés les patients qui ont des problèmes de santé pour lesquels on soupçonne une origine environnementale. « J'ai vu plusieurs cas où la seule cause d'exacerbation de l'asthme est la proximité avec des sources importantes de pollution de l'air extérieur. Une fois que ces personnes sortent de ce milieu, l'asthme s'en va. Même plus besoin de pompes… Personnellement, je trouve ça fâcheux que des gens décèdent de causes sur lesquelles ils n'ont aucun contrôle. J'entends parfois "Ils ont juste à déménager". Mais ce n'est pas si simple ; ils n'ont pas toujours le choix », raconte celui qui est aussi rattaché à l'Institut national de santé publique du Québec.

D'ailleurs, il ne s'explique pas comment il est possible que de nouvelles constructions soient autorisées près des autoroutes en 2021. Dans ce dossier, « l'angle mort, c'est l'urbanisme ».

La pollution liée à la circulation routière est par ailleurs de plus en plus suivie au pays. Depuis peu, de nouvelles stations du Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique sont placées à quelques mètres de grands axes et dotées d'équipements spécialisés dans le but d'offrir un meilleur tableau. Pour l'instant, il y en a une à Vancouver, deux à Toronto et une à Québec. Montréal devrait bientôt déplacer et transformer sa station de l'échangeur Décarie en ce sens, indique Fabrice Godefroy, le responsable du réseau montréalais. « On va ajouter des instruments de mesure supplémentaires, un analyseur de particules ultrafines [c'est-à-dire de taille nanométrique] ainsi qu'une caméra de circulation pour compter le nombre de véhicules et leur type – légers, lourds, camions à deux essieux, à quatre essieux – pour que la surveillance évolue. »

En juin dernier, son équipe a publié le bilan de la qualité de l'air pour toute l'année 2020, marquée par la pandémie. Le ralentissement de certaines activités économiques et le télétravail ont-ils eu une incidence ? « Il n'y a pas eu de grosse différence finalement. Mais on n'est pas revenu à la normalité non plus », dit M. Godefroy.

Veut-on vraiment y retourner ?

PARTICULES FINES ($PM_{2,5}$)

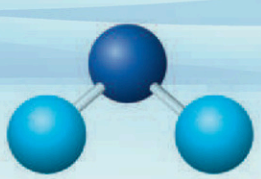
Une grande variété de particules solides ou liquides sont si petites (d'une taille inférieure à 2,5 microns) qu'elles peuvent pénétrer dans le corps humain lors de la respiration, affectant principalement les systèmes respiratoire et cardiovasculaire. Au Québec, les activités humaines responsables de l'émission de ces poussières et gouttelettes étaient le chauffage au bois (44 %), l'industrie (39 %) et le parc automobile (16 %), selon un rapport de 2008 du MELCC.

Les $PM_{2,5}$ peuvent également se former à partir d'autres polluants, comme le SO_2 et les NO_x (oxydes d'azote). Des sources naturelles, tels les incendies de forêt, complètent le tableau. Les $PM_{2,5}$ représentent le principal composant du smog.

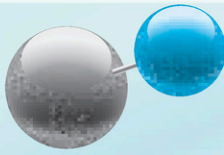
Dans la province, les concentrations moyennes de particules fines ont baissé de 17 % entre 2000 et 2019.

DIOXYDE D'AZOTE (NO_2)

Le terme NO_x regroupe le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2). Le premier découle de la combustion et le second se forme à partir du NO, qui s'oxyde dans l'air. Le secteur des transports et l'industrie en sont les principaux émetteurs. Le NO_2 peut nuire à la santé respiratoire et est l'un des principaux précurseurs de l'ozone. Entre 2000 et 2019, les concentrations de NO_2 ont baissé de 50 % au Québec.



MONOXYDE DE CARBONE (CO)



Ce gaz est principalement produit par le secteur du transport (71 %), l'industrie (19 %) et le chauffage au bois (9,7 %), suivant les données de 2008. Aux concentrations actuelles dans l'air, il n'est généralement pas dommageable pour la santé humaine. Il se transforme toutefois en dioxyde de carbone, ce fameux gaz à effet de serre dont les États cherchent à réduire les émissions pour limiter les changements climatiques.

Grâce aux systèmes antipollutions des véhicules et à leur plus faible consommation d'essence, le CO est en baisse depuis 40 ans. Ses concentrations ont diminué de 46 % entre 2000 et 2019.

• PHOTO : DONALD ROBITAILLE

PERGÉLISOL : LA LENTE FUITE

Le dégel du pergélisol est-il une bombe climatique à retardement ? Sur le terrain, un scénario en demi-teintes se dessine, ce qui n'inquiète pas moins les communautés locales.

PAR FANNY ROHRBACHER



Allen Gordon a commencé à voir des changements s'opérer dans le paysage du Nunavik dès le début des années 1990. Ce conseiller municipal du village nordique de Kuujjuaq et *fellow* de la Société géographique royale du Canada ne les compte plus. « Le pergélisol ne retient plus le sol : les pans de collines s'effondrent, les bords des rivières aussi, les routes sont accidentées, les maisons sont moins stables », liste l'Inuit reconnu pour son engagement à l'égard du territoire.

Sans compter les tassements de terrain, la fragilisation des infrastructures, le brunissement des eaux ainsi que les territoires de chasse et de pêche devenus inaccessibles. Comme si ce n'était pas assez, sans sol gelé, les arbustes poussent plus rapidement. « Cela empêche le caribou d'accéder aux lichens et assèche les rivières où les poissons se trouvent, explique-t-il. Nous sommes très inquiets, car c'est dramatique. Nous voulons que ça s'arrête. »

Le dégel accru du pergélisol, ce sol dont la température reste au-dessous de zéro en permanence et qui s'étend sur plus de la moitié des terres canadiennes, a des effets bien concrets sur les communautés du Nord. Même si un réchauffement saisonnier en surface est normal, depuis quelques décennies, le pergélisol dégèle de plus en plus profondément. À l'échelle mondiale, le problème prend une autre dimension : le pergélisol nordique contient environ deux fois plus de carbone qu'il y en a déjà dans l'atmosphère. Il a donc le potentiel de relâcher beaucoup de gaz à effet de serre, ce qui pourrait stimuler son dégel, engendrer plus d'émissions de ces gaz et ainsi de suite… Qu'en dit la recherche ?

Avant toute chose, il faut comprendre comment ces gaz se forment et s'échappent. Lorsqu'un sol gelé depuis des milliers d'années dégèle, la matière organique qu'il emprisonne subit le même sort. Il y aurait ainsi de 1 460 à 1 600 milliards de tonnes de carbone organique dans le pergélisol nordique, selon des estimations parues dans *Nature* en 2015. « Le pergélisol, c'est comme un immense congélateur rempli de nourriture : quand on le débranche, son contenu pourrit. C'est de la matière vivante composée de carbone, des plantes qui se sont retrouvées piégées avant d'avoir eu la chance de se décomposer », indique Pascale Roy-Léveillée, géomorphologue et professeure à l'Université Laval, qui a beaucoup travaillé au Yukon ces dernières années.

Ce carbone devient alors accessible aux microorganismes. « Les microbes consomment la matière organique et en font mille et une choses. Ils produisent du CO_2, du méthane et du protoxyde d'azote, tous des gaz à effet de serre », dit Isabelle Laurion, chercheuse en biogéochimie à l'Institut national de la recherche scientifique, qui fait ses collectes de données près du village de Kuujjuarapik, à l'embouchure de la Grande rivière de la Baleine, au sud-est de la baie d'Hudson.

En présence d'oxygène, les microorganismes produisent du CO_2 ; en son absence, ce seront plutôt du méthane et du protoxyde d'azote. « Même si ces derniers sont émis en moins grande quantité que le CO_2, ils ont de graves répercussions sur le climat : le méthane est un gaz à effet de serre 30 fois plus puissant que le CO_2 [sur 100 ans]. Le protoxyde d'azote, lui…, 300 fois ! » s'exclame Isabelle Laurion.

• IMAGES : ISABELLE LAURION

La chercheuse s'intéresse plus particulièrement aux gaz que le pergélisol relâche dans les mares et les lacs et qui finissent par se retrouver dans l'atmosphère. « Pendant l'hiver, le méthane se transforme en de grosses bulles qui s'accumulent sous et dans la glace. C'est un gaz peu soluble dans l'eau », décrit-elle. La chercheuse et son équipe prélèvent des carottes pour analyser ces gaz piégés dans la glace. Au printemps, alors que la glace fond, de grosses bulles de gaz qui s'échappent font « bouillonner » l'eau, comme dans une baignoire à remous. Pour recueillir ces gaz, bien souvent dominés par le méthane, la chercheuse dépose un entonnoir inversé coiffé d'une seringue sur la surface du lac. « L'émission de méthane est un phénomène très variable dans le temps et l'espace. On sait qu'il y a des *hotspots*, des zones et des moments dans l'année où il y a plus d'émissions », fait observer Isabelle Laurion. L'été, la colonne d'eau de nombreux lacs et de mares se stratifie, c'est-à-dire que la concentration en gaz varie en fonction de la profondeur. « L'eau froide du fond est alors isolée de l'atmosphère. Cette colonne d'eau stable est difficile à défaire par le vent : les eaux se mélangent peu, sont moins bien oxygénées », poursuit la chercheuse. Et en l'absence d'oxygène, les microorganismes qui s'y trouvent produisent du méthane. C'est seulement à l'automne, lorsque les eaux se mélangent, que les gaz accumulés au fond pendant l'été sont émis dans l'atmosphère.

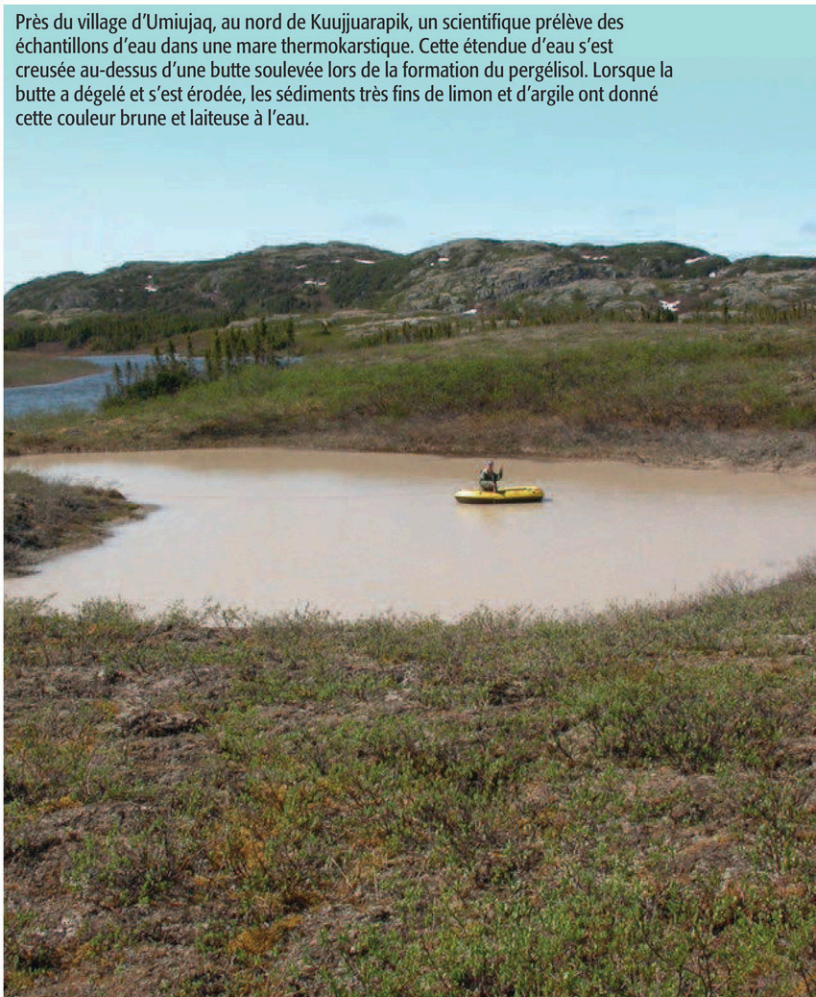
UN PETIT PET

À quel point le dégel du pergélisol amplifie-t-il le réchauffement climatique ? Pour Daniel Fortier, géomorphologue à l'Université de Montréal, c'est la grande question. Ce chercheur étudie le pergélisol autour de Kangirsuk, un petit village situé au 60e parallèle, tout au nord du Québec, qui vit au rythme des éléments. La lente disparition du pergélisol laisse derrière elle des dizaines, voire des centaines de lacs, ainsi que des polygones de toundra, ces reliefs périglaciaires aux bords de mousse et aux creux parfois remplis d'eau qui dessinent un réseau de motifs géométriques bien ordonnés sur la terre nordique. Ici aussi le tableau est sombre, mais Daniel Fortier signale que les chercheurs sont de plus en plus prudents quant au scénario catastrophe. « Il y a une dizaine d'années, on parlait d'une bombe climatique à retardement. Maintenant, on parle d'une fuite lente. On passe d'une grosse bombe… à un petit pet ! » blague-t-il.

Bien sûr que le dégel du pergélisol entraîne l'émission de gaz à effet de serre. Mais il faut aussi prendre en compte les nouveaux puits qui se créent. En effet, certains lacs grandissent tellement qu'ils rejoignent une rivière, s'y vident, puis le pergélisol et la végétation envahissent cet espace. Les tourbières, qui peuvent naître lorsqu'un lac se déverse ainsi ou émerger quand le pergélisol disparaît, sont d'importants puits de carbone. En se réchauffant, le climat devient aussi plus favorable aux arbustes, aux plantes ainsi qu'au phytoplancton, qui prolifère.



Sous l'effet du dégel du pergélisol, la terre se gorge d'eau, laissant se creuser des trous béants qui se remplissent souvent d'eau. Ce sont les fameux lacs thermokarstiques.



Près du village d'Umiujaq, au nord de Kuujjuarapik, un scientifique prélève des échantillons d'eau dans une mare thermokarstique. Cette étendue d'eau s'est creusée au-dessus d'une butte soulevée lors de la formation du pergélisol. Lorsque la butte a dégelé et s'est érodée, les sédiments très fins de limon et d'argile ont donné cette couleur brune et laiteuse à l'eau.



BILAN DE SANTÉ DU PERGÉLISOL QUÉBÉCOIS

Jusqu'à présent, le pergélisol du Québec a été moins touché qu'en d'autres endroits. Grâce à la circulation atmosphérique, l'est de l'Amérique du Nord est plus froid. « Jusque dans le milieu des années 1990, le pergélisol était stable au Québec, alors qu'il se réchauffait à l'ouest du Canada, en Russie, en Sibérie et sur le plateau tibétain », rappelle Daniel Fortier. Même si le chercheur note une augmentation des températures, la tendance ne semble pas linéaire. Deux années froides peuvent effacer facilement les effets d'un été très chaud. « On retourne en arrière et c'est très encourageant. » Néanmoins, si les données apparaissent optimistes par moments, la réalité est tout autre. « Un seul été extrêmement chaud a des conséquences immédiates sur le paysage, comme des éboulements et des glissements de terrain », dit-il.
Selon la latitude, les répercussions sont tout aussi différentes. Plus on monte vers le nord, plus il fait froid et moins le réchauffement est significatif à court terme pour l'environnement. « C'est comme le congélateur : qu'il soit à -10 °C ou à -8 °C, cela ne change pas grand-chose à l'intérieur », compare le scientifique.

« Comme ces organismes photosynthétiques se nourrissent du CO_2, ils séquestrent le carbone. À ce moment-là, le milieu devient un puits », explique le professeur Fortier.

Pour tenter de mieux comprendre les conséquences du dégel du pergélisol sur le réchauffement climatique et obtenir une réponse plus claire, les chercheurs modélisent ses effets sur ordinateur pour ouvrir une fenêtre sur le futur. Mais le procédé demande du raffinement, car « une multitude de processus physiques et biogéochimiques qui s'influencent les uns les autres ne sont pas actuellement pris en compte », regrette Daniel Fortier.

La technologie actuelle ne permet tout simplement pas encore d'intégrer toutes les relations entre la surface du sol et l'atmosphère. « L'émission des gaz est extrêmement variable dans le temps et dans l'espace, souligne Isabelle Laurion. Si l'on prend juste quelques mesures à gauche et à droite à quelques endroits dans l'Arctique et qu'on essaie d'extrapoler, on peut se tromper. Il faut aussi que l'on comprenne pourquoi le phénomène varie spatialement et comment ça répond aux modifications des conditions environnementales. »

Pour les chercheurs interviewés par *Québec Science*, il n'y a donc pas assez de données pour statuer clairement. « Dans la littérature scientifique, il y a vraiment une dichotomie : certains pensent que c'est déprimant, d'autres pas », précise Isabelle Laurion.

URGENCE D'AGIR

Partout dans le monde, des chercheurs et des entrepreneurs se pressent de trouver des solutions afin de ralentir le réchauffement climatique, qui altère tant le pergélisol. Capturer le CO_2 dans l'air, envoyer des miroirs dans l'atmosphère pour réfléchir les rayons du soleil, poser des bombes dans les volcans pour répartir les cendres dans l'atmosphère et ainsi réduire l'incidence des rayonnements solaires, étendre de grandes bâches sur les glaciers pour empêcher leur fonte…

« Ce sont des vendeurs d'autos, la technologie n'existe pas encore ! » s'exaspère Daniel Fortier. Selon lui, la solution la plus simple est de réduire à la source nos émissions de gaz à effet de serre et, pour ce faire, tout le monde doit mettre la main à la pâte. Pascale Roy-Léveillée et lui font partie d'ailleurs de PermafrostNet, un réseau stratégique canadien qui veille à mieux préparer le Canada au dégel du pergélisol.

Les idées ne manquent pas. « Favoriser la végétation dans les zones de pergélisol et protéger les milieux humides qui séquestrent du carbone comme les tourbières et les marais côtiers, ce serait notre effort pour aider à la captation du carbone de façon naturelle », énumère Daniel Fortier.

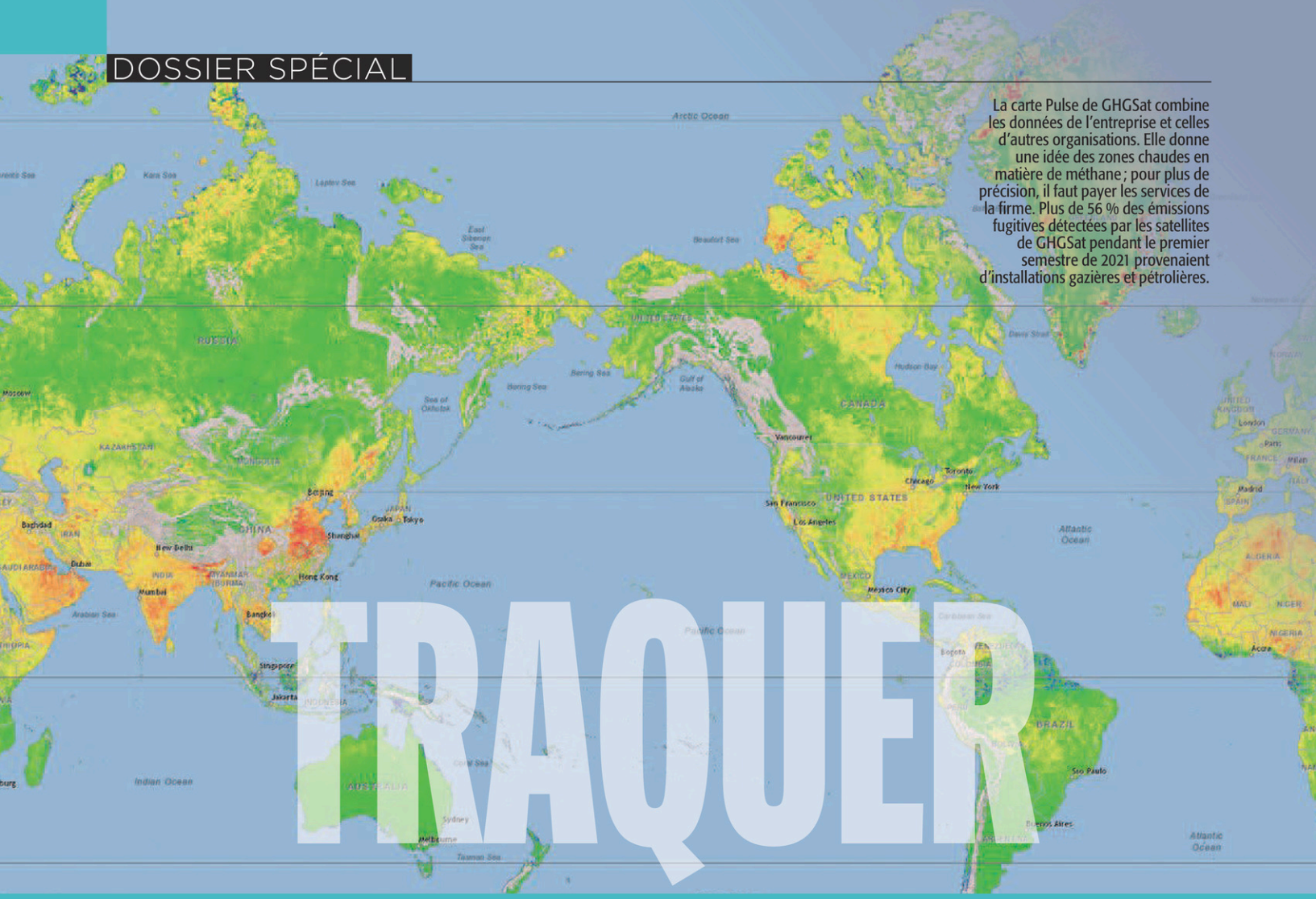
Tout cela ne peut s'effectuer sans la collaboration des communautés. « Je n'ai pas de problèmes avec les études scientifiques, dit Allen Gordon. Mais il faut que les chercheurs travaillent avec les communautés locales. Ils ne doivent pas venir ici sans nous informer de leurs objets d'étude et de leurs rapports. Nous voulons être consultés et impliqués parce que, parfois, des personnes sont de soi-disant spécialistes dans leur domaine, mais n'ont aucune expertise en matière de paysages nordiques et de savoir-faire », regrette le conseiller municipal.

Natan Obed, président de l'Inuit Tapiriit Kanatami, une organisation qui représente les 65 000 Inuits du Canada, approuve : « La collaboration entre les chercheurs du Sud et les communautés inuites du Nunangat [la patrie des Inuits du Canada] devrait partir d'un lieu d'autodétermination, de partenariat, de respect et de transparence pour les Inuits. La recherche dans le Nunangat devrait donner le pouvoir aux Inuits de répondre aux besoins et aux priorités de leurs familles et communautés. » L'organisme a d'ailleurs élaboré une stratégie nationale inuite sur la recherche qui détaille cette vision.

L'importance mondiale des rejets de gaz par le pergélisol ne peut justifier l'empressement ou le détachement. « Parfois, des chercheurs mènent leurs travaux et, quand ils ont fini, ils disent simplement qu'il y a beaucoup de carbone dans la cour. Mais pendant ce temps-là, la route à côté est en train de s'effondrer et la maison va tomber dans un trou. Et personne ne peut rien faire », avoue Pascale Roy-Léveillée, qui se fait un devoir de tisser des liens durables avec ces communautés, « qui ont beaucoup à nous apprendre ».

C'est ainsi que le Canada pourra s'en sortir : chercheurs et communautés inuites main dans la main. ●

• IMAGE : ISABELLE LAURION



La carte Pulse de GHGSat combine les données de l'entreprise et celles d'autres organisations. Elle donne une idée des zones chaudes en matière de méthane ; pour plus de précision, il faut payer les services de la firme. Plus de 56 % des émissions fugitives détectées par les satellites de GHGSat pendant le premier semestre de 2021 provenaient d'installations gazières et pétrolières.

TRAQUER

LE MÉTHANE À PARTIR DE L'ESPACE

L'entreprise québécoise GHGSat repère les fuites de méthane industrielles partout sur la planète grâce à sa constellation de satellites. Visite guidée.

PAR MÉLISSA GUILLEMETTE

Stéphane Germain connaît maintenant la planète comme le fond de sa poche. Ou du moins, c'est l'impression qu'il donne alors que son curseur vogue d'un continent à l'autre, attirant notre attention sur les coins mêmes les plus reculés. « Je n'aurais jamais pensé connaître la géographie du Turkménistan ! »

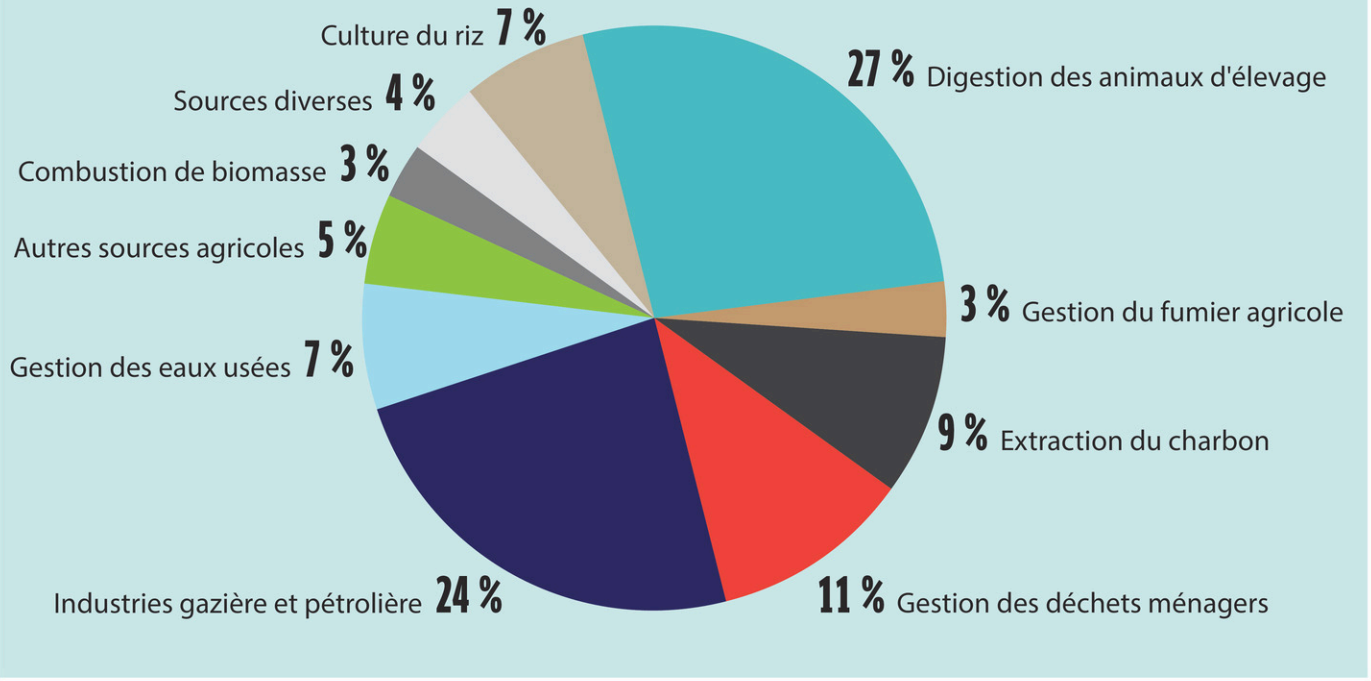
C'est dans ce pays que son entreprise, GHGSat, a repéré la plus grosse fuite industrielle de méthane, s'échappant d'une station de compression de gaz naturel, en 2019. Le méthane, incolore et inodore, contribue fortement à l'effet de serre ; il emprisonne 84 fois plus de chaleur sur une période de 20 ans qu'une quantité équivalente de gaz carbonique (CO_2). En plus des industries pétrolière et gazière, l'élevage, les dépotoirs, les mines de charbon, la gestion des eaux usées et la culture du riz en sont les principaux émetteurs.

Comme il est très difficile de détecter ces panaches de méthane au sol, GHGSat les traque plutôt grâce à trois petits satellites lancés ces dernières années et équipés de spectromètres ultraspécialisés conçus par l'équipe (huit autres suivront d'ici la fin de 2023). Ils permettent de déceler des fuites aussi « petites » que 100 kg par heure.

Au Turkménistan, la fuite inquiétante libérait de 10 000 à 43 000 kg de méthane par heure, une quantité qui variait d'un jour à l'autre. Une seule heure d'écoulement avait les mêmes répercussions sur le climat que les émissions annuelles de 54 à 234 voitures ! L'équipe a rapidement avisé la compagnie responsable… qui n'a pas agi. « On avait du mal à communiquer avec elle, raconte Stéphane Germain, ingénieur en aérospatiale de formation. On a donc essayé d'autres voies : d'abord les services de délégués commerciaux du Canada, qui nous ont présentés à l'ambassadeur canadien qui, lui, est allé parler à l'ambassadeur américain… » Un représentant européen s'est ensuite joint au groupe qui

• IMAGE : PULSE.GHGSAT.COM

Estimation des principales sources anthropiques d'émissions de méthane en 2020



a convaincu le gouvernement d'intervenir auprès de l'entreprise en cause. La fuite a finalement été colmatée. Hourra !

La PME québécoise est une précurseure dans une industrie prometteuse : celle qui vise à détecter les émissions de méthane de l'espace. Pour les entreprises et les gouvernements, réparer ces fuites représente l'une des façons les plus efficaces de réduire les émissions de gaz à effet de serre, selon un rapport récent de la Coalition pour le climat et la qualité de l'air et du Programme des Nations unies pour l'environnement. Ils peuvent recourir aux services payants de GHGSat pour obtenir un diagnostic précis.

L'entreprise a déjà des clients partout dans le monde, dont la multinationale Shell. « Nos clients veulent être au courant des fuites et les arrêter parce que leur réputation en dépend. » Aucune compagnie ne veut apprendre par le journal qu'elle a des problèmes, comme lors d'une enquête mémorable du *New York Times* réalisée au Texas avec des caméras infrarouges en 2019. D'immenses panaches émergeant de complexes gaziers et pétroliers avaient été mis au jour.

DE LA CALIFORNIE À DHAKA

Pour se faire connaître, GHGSat a créé la carte du monde Pulse, qui permet d'avoir une idée des régions où les concentrations de méthane dans l'atmosphère sont anormales. À l'écran, Stéphane Germain « file » vers les États-Unis. « Ici, en Californie, il y a une vallée du nom de San Joaquin, bien connue pour sa production agricole. La digestion des animaux entraîne de fortes émissions de méthane. Il y a aussi quelques sites d'enfouissement de déchets dans le coin, en plus de la production pétrolière. Il y a donc presque toujours des concentrations élevées. »

Autre zone inquiétante : le centre de la Chine, où de nombreuses mines de charbon sont en activité. « Ce sont les émissions de mines de charbon les plus importantes du monde, c'est impressionnant. On espère percer le marché chinois, mais on a du chemin à faire ; malheureusement, les relations Canada-Chine ne sont pas faciles en ce moment. »

Il y a ensuite un gros panache (4 000 kg par heure) à Dhaka, capitale du Bangladesh. Une partie serait attribuable à un site d'enfouissement, mais pour le reste le mystère plane. Le ministère de l'Environnement du pays enquête après avoir été avisé de la situation par GHGSat.

Et qu'en est-il chez nous ? On se doute que les installations gazières et pétrolières en émettent des quantités notables : le Canada s'est engagé à diminuer de 40 à 45 % les fuites de méthane issues de ces industries d'ici 2025 (par rapport au niveau de 2012). « Dans le coin de Sarnia [en Ontario], on peut voir des concentrations plus élevées autour des raffineries, mentionne Stéphane Germain. En Alberta, on en trouve dans le sud-est de la province, dans deux zones de gaz de schiste. Il devrait aussi y en avoir dans les mines de charbon à proximité de Calgary, mais les systèmes satellites n'arrivent pas à détecter les sources en montagne. Sinon, au pays, on voit du

• GRAPHIQUE ADAPTÉ DE « ENRICHMENT EXPERIMENT OF VENTILATION AIR METHANE (0.5%) BY THE MECHANICAL TOWER », *SCIENTIFIC REPORTS*, 2020

méthane surtout autour des grandes villes à cause d'activités humaines de toutes sortes. Au Québec, à part Montréal, il n'y a pas beaucoup de lieux à concentration élevée. » Hydro-Québec est d'ailleurs un client de la première heure, et ses réservoirs et barrages ne semblent pas poser problème.

MESURES INTERNATIONALES

GHGSat participera à un nouvel effort mondial pour mieux quantifier le problème : l'Observatoire international des émissions de méthane, annoncé par le Programme des Nations unies pour l'environnement et la Commission européenne en mars dernier. « L'idée est de rattacher toutes les sources de données sur les émissions de méthane, dont les nôtres, à un modèle global afin que les gouvernements et les négociateurs pour le climat puissent comprendre quelles sont les émissions réelles des différents pays et industries. »

Car les scientifiques réalisent aujourd'hui que les émissions fugitives de méthane sont largement sous-estimées. Un exemple local ? Une étude publiée au tournant de 2021 par la professeure Mary Kang, du Département de génie civil de l'Université McGill, montre que les émissions de méthane issues des quelque 370 000 puits de pétrole et de gaz abandonnés au Canada seraient sous-évaluées de 150 %.

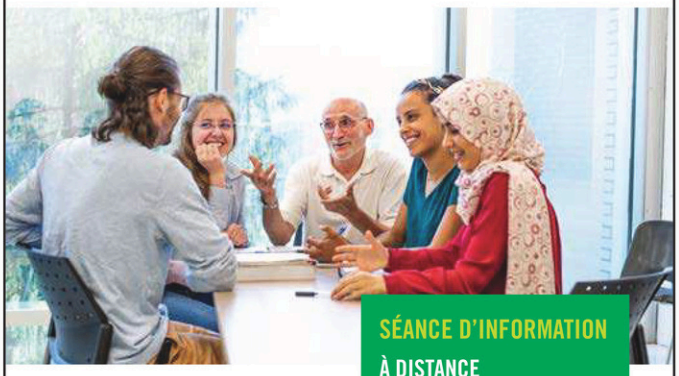
C'est qu'il est beaucoup plus difficile d'estimer les quantités de méthane qui s'échappent que celles de CO_2, qui résultent d'un processus de combustion, une réaction chimique facile à décortiquer. D'où l'intérêt nouveau pour les techniques de mesure par satellite et même par avion, explique Annie Levasseur, professeure à l'École de technologie supérieure de Montréal et titulaire de la Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques. « On les appelle méthodes *top-down* : on part de mesures de concentrations atmosphériques pour trouver l'élément au sol qui cause ces variations. Traditionnellement, on fait plutôt du *bottom-up* : on part de données d'activités sur le terrain pour calculer les émissions. Par exemple, [les compagnies gazières et pétrolières] font des campagnes de mesures autour de certains puits et extrapolent ces données à tout leur réseau. » Elle ajoute que des chercheurs tentent de combiner les deux types d'approches pour encore plus de précision.

Annie Levasseur travaille pour sa part sur une carte des émissions des différents gaz à effet de serre dans l'arrondissement de Saint-Laurent, à Montréal. En collaboration avec Mary Kang, elle compte aussi brosser le tableau des émissions de méthane de la métropole. « Pour l'instant, dans les inventaires, les estimations sont très grossières. »

Partout sur la planète, les gouvernements se fixent des objectifs ambitieux ; plusieurs veulent atteindre la carboneutralité en 2050. Mais pour y arriver, « il va falloir de meilleurs outils pour mieux comprendre le lien entre chacune des activités et des émissions, ce qui permettra de prioriser nos actions, dit la chercheuse. Si l'on se fie à des intuitions pour lutter contre les changements climatiques, on peut mettre nos efforts aux mauvais endroits ». ●

UDES

MAÎTRISE EN
ENVIRONNEMENT



SÉANCE D'INFORMATION
À DISTANCE
Mardi 26 octobre ► 18 h

Pour ceux qui étudient, notamment en chimie, écologie, géomatique, politique, administration, génie, biologie, géographie, droit, éducation, communication.

USherbrooke.ca/environnement

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE



ILLUSTRATION : FRANÇOIS BERGER

REVISITER UN AIR D'AUTREFOIS

Quand le vent d'ouest se lève à Cape Grim, au nord de la Tasmanie, des scientifiques australiens mettent cet air en bouteilles. Car il est difficile d'en trouver du plus pur sur Terre : celui-ci vient de survoler l'océan Austral et n'a croisé aucune ville ou usine sur des milliers de kilomètres. « S'il y a un changement dans cet air, cela veut dire qu'il y a quelque chose qui se passe à l'échelle de la planète », explique Élise-Andrée Guérette.

Cette Québécoise travaille au Global Atmospheric Sampling Laboratory pour le CSIRO, l'agence gouvernementale de recherche scientifique australienne. Les échantillons prélevés à Cape Grim sont examinés dans son laboratoire d'Aspendale, en banlieue de Melbourne.

La plupart sont analysés sur-le-champ ou envoyés par la poste à des centres de recherche à travers le monde. Mais de quatre à six fois par année, une bonbonne en acier inoxydable se voit réserver un autre destin : rester sur une tablette ! Cette mise à l'écart, répétée depuis 1978, a permis de constituer une banque de 170 échantillons d'air ambiant entreposés à Aspendale. Chacun d'eux contient l'équivalent de 2 000 à 4 000 l d'air comprimé dans une bouteille d'une grosseur analogue à celle qu'on trouve sur un barbecue au gaz.

Pour connaître quelle était la concentration de certains gaz dans le passé, les scientifiques se tournent souvent vers l'air emprisonné dans des couches de neige en Antarctique ou au Groenland. Mais pour avoir une image précise des dernières décennies, la banque d'air de Cape Grim n'a pas son pareil. Surtout quand vient le temps de dater l'apparition, l'augmentation ou le déclin d'halocarbures, des gaz produits par les activités industrielles et nocifs pour la couche d'ozone ou le climat.

Ainsi, la collection a permis de situer dans la deuxième moitié des années 1990 l'apparition de trois hydrochlorofluoro-

Des archives d'échantillons d'air permettent de retracer l'histoire de gaz nocifs pour la couche d'ozone ou le climat.

PAR ETIENNE PLAMONDON EMOND

carbones (HCFC), des gaz industriels contenant du fluor et du chlore. Les résultats ont été publiés cette année dans les *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

BÂTIR UNE COLLECTION SUR DU VENT

La première mise en bouteilles « est arrivée un peu par accident », reconnaît Paul Fraser. Au milieu des années 1970, ce chimiste du CSIRO remplit d'air d'anciennes bonbonnes à oxygène ayant servi dans les avions durant la Seconde Guerre mondiale. Il se dote ainsi d'une référence afin d'étalonner ses instruments de mesure pour étudier l'atmosphère.

La plupart des polluants se désintègrent vite dans ses cylindres. En revanche, il remarque que des gaz y demeurent stables, et pas les moindres : les chlorofluorocarbures (CFC). À la même époque, il devient évident que les propriétés de ces gaz inertes leur permettent d'atteindre la stratosphère, où ils se décomposent sous l'effet des rayons ultraviolets et libèrent du chlore, dévastateur pour la couche d'ozone. L'ennui, c'est qu'ils sont alors largement utilisés dans la réfrigération et la climatisation, et dans la fabrication de mousses isolantes et de solvants. Leur concentration augmente à une vitesse vertigineuse dans l'atmosphère !

Documenter la croissance des CFC avec les fonds de bouteille inutilisés paraît dès lors pertinent. « On s'est aussi dit qu'il y avait probablement à l'intérieur de ces bonbonnes des gaz qu'on ne mesurait pas et qui se comportaient de la même manière », raconte le chercheur aujourd'hui à la retraite. Il commence alors à recueillir des échantillons et à les entreposer de façon systématique. Son espoir ? Que des technologies du futur permettent d'analyser leur contenu sous un nouveau jour. « C'est exactement ce qui s'est passé. »

Dans les années 1990, il retire de l'air de chacune des 65 bonbonnes amassées jusque-là et le met dans de plus petites bouteilles. Il les transporte au Royaume-Uni, à l'Université d'East Anglia. Là-bas, en compagnie du doctorant David Oram, il passe le contenu de ses archives dans un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse dernier cri. « Jusqu'à ce moment-là, on n'avait mesuré que six ou sept composés dans les archives et, soudainement, on en voyait une quarantaine. Et chacun d'eux avait une histoire unique que personne ne connaissait », se remémore Paul Fraser.

Les chercheurs découvrent ainsi la présence de plusieurs halons, des halocarbures contenant du brome nocif pour la couche d'ozone. De plus, le duo rapporte pour la première fois en 1998 des traces de trifluorométhane (aussi appelé HFC-23). Moins dommageable pour la couche d'ozone, cet hydrofluorocarbure (HFC) n'en demeure pas moins un gaz à effet de serre environ 12 000 fois plus puissant que le dioxyde de carbone à volume équivalent.

« Grâce à la bibliothèque d'air, on était en mesure de revenir en arrière et de comprendre son évolution dans l'atmosphère », souligne David Oram. La tendance inquiète : à la fin du millénaire, la concentration de HFC-23 augmente de cinq pour cent par année. Il s'agit d'un sous-produit de la fabrication de chlorodifluorométhane (HCFC-22). Or, l'industrie du refroidissement s'est rabattue sur ce dernier gaz pour remplacer les CFC, dont elle doit se départir, tel que l'exige le protocole de Montréal, signé en 1987.

L'amendement de Kigali au protocole de Montréal, adopté en 2016, encadre désormais la réduction progressive des HFC. En vigueur depuis 2019 dans les pays développés, il s'appliquera aux pays en développement, dont la Chine, à partir de 2024. Les émissions de HFC-23 auraient dû baisser de manière draconienne à partir de 2015, si l'on en croit les diminutions déclarées par les États. Néanmoins, un article cosigné par Paul Fraser dans *Nature Communications* en 2020 montre qu'elles ont plutôt atteint un sommet historique en 2018. Du même coup, la collection australienne a permis de détecter un déclin temporaire de ces émissions entre 2006 et 2009, malgré une hausse de la production de HCFC-22 dans les pays en développement au même moment. Cette baisse correspond à une période pendant laquelle l'Organisation des Nations unies encourageait l'incinération du HFC-23 à l'aide de crédits carbone. Les émissions ont augmenté à nouveau lorsque l'incitation a disparu, puis ont monté en flèche à partir de 2015, principalement en Inde et en Chine. La banque d'air s'avère donc un outil précieux pour surveiller l'efficacité ou le respect des mesures prises pour atteindre les objectifs des ententes internationales.

PAREIL, PAS PAREIL

David Oram a gardé tous les échantillons que lui avait apportés Paul Fraser ainsi que tous les autres que le CSIRO lui a envoyés par la suite. Il a ainsi constitué à l'Université d'East Anglia une version miniature de la collection australienne. Et il ne se lasse pas de l'explorer. En 2016, il a revisité ces bouteilles afin de comparer l'évolution de deux gaz toujours considérés comme un seul dans tous les rapports : le CFC-114 et le CFC-114a. Leurs molécules possèdent les mêmes éléments dans les mêmes proportions, mais agencés de manière différente. En distinguant leurs concentrations respectives dans la banque, il a découvert que les deux gaz ont des sources indépendantes. Une information importante qui aidera à remonter la piste du CFC-114a toujours détecté dans l'atmosphère par une station de Taïwan.

Quant à la plus récente bonbonne remisée sur une étagère à Aspendale, peut-être révélera-t-elle qu'un autre gaz polluant inconnu plane déjà au-dessus de notre tête. ●

LES PRIX DU QUÉBEC
culture • science

QUÉBEC MET EN LUMIÈRE CELLES ET CEUX QUI VOIENT GRAND EN ENVIRONNEMENT



Anne de Vernal

Prix Marie-Victorin 2020

Anne de Vernal étudie les sédiments marins pour reconstituer des épisodes du climat passé. En observant les microorganismes qui y sont préservés, elle retrace les paramètres du climat, comme la température de l'eau et le couvert de glace de mer.



Valérie Langlois

Prix Relève scientifique 2020

Valérie Langlois traque les contaminants qui s'infiltrent dans les lacs et les rivières. Grâce à ses travaux, les autorités élaborent de meilleures normes pour protéger la nature et la santé publique.

Prix du Québec

Créés en 1977, les Prix du Québec représentent la plus haute distinction décernée par le gouvernement du Québec dans les domaines de la culture et de la science.

#PrixduQuébec | prixduquebec.gouv.qc.ca

Votre gouvernement

Québec



C'EST QUOI, ÊTRE UN HOMME ?

PAR MARTINE LETARTE

Des chercheurs et des organismes souhaitent implanter une culture de la masculinité positive en Afrique subsaharienne. Pour cela, il faut lutter contre le poids de l'histoire, des religions et de la pauvreté.

ILLUSTRATIONS : NITI MARCELLE MUETH • DIRECTION ARTISTIQUE : NATACHA VINCENT

Elles sont blanches, rouges, jaunes, panachées : les roses constituent le pain et le beurre de la ville de Naivasha, au Kenya. Dans les fermes où sont cultivées les fleurs qui seront coupées puis exportées en Europe, des ouvrières travaillent d'arrache-pied. Les conditions sont mauvaises et les salaires faibles. Et la route qui les y mène n'est pas pavée de roses.

Naivasha et ses environs sont tristement célèbres pour leur haut taux de viols commis sur les femmes et les enfants. L'organisation non gouvernementale African Woman and Child Feature Service précise que les viols sont fréquents sur la route, où les femmes se font souvent donner de l'argent en échange de leur silence, mais aussi au travail, où elles évitent de dénoncer leur agresseur de peur de perdre leur emploi.

Les choses pourraient changer progressivement, car de nombreux acteurs cherchent des leviers d'intervention. Leur cible principale ne sont pas les femmes, mais bien les hommes. Par exemple, l'Africa Alliance of YMCAs a créé un *power space*, un lieu où les jeunes hommes peuvent s'exprimer et acquérir des connaissances sur toutes sortes de sujets difficiles : la violence faite aux femmes, la contraception et les mutilations génitales féminines. « Nous invitons les jeunes à venir jouer une partie de basketball ou de soccer, puis nous servons des rafraîchissements et nous les amenons à parler librement de différentes questions entre pairs ou encore nous convions un mentor à se joindre à eux pour la discussion », explique Lloyd Muriuki Wamai, gestionnaire de projet à l'Africa Alliance of YMCAs.

Cette initiative fait partie d'un projet plus vaste, appelé #SexManenoz, qui vise à cultiver une masculinité positive au Kenya et en Zambie. Le Canada soutient d'ailleurs financièrement ce projet par l'entremise du Centre de recherches pour le développement international (CRDI). L'objectif : que les jeunes hommes adoptent des comportements qui favorisent l'égalité des sexes et la protection des droits des femmes et leur bien-être, y compris sur les plans sexuel et reproductif.

Ces différentes interventions s'inscrivent dans un mouvement plus large qui lutte contre l'envers de la masculinité positive : la masculinité toxique. Employé depuis une trentaine d'années en Occident, ce terme fait référence aux stéréotypes de virilité qui poussent les hommes à agir comme des durs à cuire. Les clichés se perpétuent dans l'éducation des garçons : on leur apprend à se montrer forts, à ne pas pleurer, à ne pas exprimer leurs émotions, à ne pas avoir peur, à se battre s'il le faut, etc. Cela entraîne des comportements sexistes, voire misogynes, et homophobes qui ont des conséquences négatives sur l'ensemble de la société, de la violence conjugale au harcèlement sexuel en passant par la maternité précoce, le suicide et les infections transmissibles sexuellement. Dans la foulée, plusieurs programmes sont nés, aux États-Unis et en Australie notamment, pour favoriser l'émergence d'une masculinité positive.

Certains de ces programmes ont été implantés ces dernières années en Afrique, entre autres au Nigeria, au Rwanda et en République démocratique du Congo (RDC). Mais fonctionnent-ils ? « Leurs résultats n'ont jamais vraiment été mesurés sur le



terrain », constate Chimaraoke Izugbara, directeur de la santé globale, de la jeunesse et du développement à l'International Center for Research on Women, basé à Washington. Les équipes présentes dans ces trois pays recueillent en ce moment des données pour évaluer les effets des programmes, un autre projet soutenu par le CRDI.

LE FOND DE L'HISTOIRE

Pour intervenir efficacement, il faut d'abord comprendre comment ces dynamiques hommes-femmes se sont installées au fil de l'histoire, estime Marie Fall, professeure à l'Université du Québec à Chicoutimi et responsable du Laboratoire d'études et de recherches appliquées sur l'Afrique. Le continent « a vécu la traite arabe, qui a apporté l'islam sur le territoire, puis il y a eu la traite occidentale avec le christianisme dans son sillon, rappelle-t-elle. La plupart des sociétés africaines étaient matriarcales avant l'arrivée de ces religions qui ont beaucoup déstabilisé le continent en instaurant le patriarcat ».

Les enjeux économiques et politiques font aussi partie du problème. « Dans un contexte où il y a beaucoup de conflits et où les hommes se trouvent souvent sans emploi, et donc incapables d'agir comme pourvoyeurs, ils peuvent devenir très agressifs parce qu'ils sentent qu'ils n'arrivent pas à jouer le rôle qu'on attend d'eux », indique la professeure Fall.

Chimaraoke Izugbara abonde dans ce sens. « C'est important de montrer aux hommes des façons plus positives d'exprimer leur masculinité, mais pour avoir un réel effet, il faut en même temps leur offrir un milieu de vie pacifique et s'attaquer à leur situation économique pour qu'ils puissent travailler et, ainsi, répondre aux besoins de leur famille », dit celui qui est aussi professeur adjoint aux écoles de santé publique de l'Université du Witwatersrand en Afrique du Sud et de l'Université de Göteborg en Suède.

Il prend en exemple la RDC, un pays qui a une histoire marquée par les atrocités de l'esclavage, de la dictature et d'une succession de guerres et de conflits sanglants. Le tout avec une constante : une population qui vit dans la misère. Pour bien des hommes, se battre fait partie du quotidien et le viol est une arme de guerre. Les emplois intéressants y sont rares et les hommes sont en compétition pour les obtenir. Alors que le modèle de l'homme pourvoyeur est omniprésent, bien des pères ne parviennent tout simplement pas à nourrir leur famille. Très frustrés, ils ont souvent recours à la violence, le seul moyen pour montrer qu'ils sont des hommes. « Ils vivent tellement de choses difficiles qu'on ne peut pas commencer par leur parler seulement de violence », insiste Chimaraoke Izugbara.

Qu'il s'agisse de la RDC, du Nigeria, du Rwanda, du Kenya ou de la Zambie, la situation se répète inlassablement. Tous ces pays figurent au bas de l'indice de développement humain (IDH). En RDC, les habitants passent en moyenne à peine plus de six années sur les bancs d'école et le revenu national brut par habitant est de 1 063 DI (ou dollars internationaux, une monnaie fictive qui possède le même pouvoir d'achat dans un pays donné que le dollar américain aux États-Unis à un

• ILLUSTRATION : NITI MARCELLE MUETH



« En ce moment, les religions prescrivent la légitimité — à un degré variable selon la confession, l'ethnie, la culture, l'âge, la classe sociale — de la violence envers les femmes. »

— Marie Fall, professeure à l'Université du Québec à Chicoutimi et responsable du Laboratoire d'études et de recherches appliquées sur l'Afrique

moment précis). En guise de comparaison, le Canada est au 16e rang de l'IDH, avec plus de 13 années de scolarité en moyenne et un revenu national brut par habitant de près de 48 527 DI. Toujours au Canada, 2 % des femmes qui ont déjà été en couple ont mentionné avoir été victimes de violence physique ou sexuelle de la part de leur partenaire, d'après la base de données Gender, Institutions and Development 2019 de l'Organisation de coopération et de développement économiques. Au Rwanda, cette proportion est de 16 %, au Kenya de 39 %, en Zambie de 43 % et en RDC de plus de 50 %.

Ces statistiques sont le reflet d'un cocktail explosif où se mélangent la pauvreté galopante, l'alcoolisme, la criminalité et le manque de modèles masculins positifs. Voilà pourquoi il est nécessaire de concevoir sur mesure les programmes de masculinité positive afin de prendre en compte les conditions de vie brutales, mais aussi les normes culturelles et les valeurs. Par exemple, en RDC et au Rwanda, l'homosexualité est stigmatisée ; elle est même interdite au Nigeria. « Dans ces contrées, la masculinité ne peut pas aller de pair avec l'homosexualité, observe Chimaraoke Izugbara. On veut bien sûr leur parler de discrimination et de santé sexuelle, mais il faut faire attention et y aller stratégiquement. Parce que si l'on y va de façon frontale, les hommes se braquent : ils vont dire qu'on veut leur imposer les valeurs des Blancs et ils ne seront plus ouverts à entendre quoi que ce soit. »

D'autres questions doivent aussi être abordées avec précaution, comme les mariages forcés des jeunes filles et l'avortement – permis seulement dans des cas particuliers, comme lorsque la vie de la femme est en danger. « Toutes des questions pour lesquelles les hommes imposent souvent leurs décisions et qui sont liées directement aux droits des femmes », illustre Marie-Gloriose Ingabire, agente au CRDI, qui travaille étroitement avec Chimaraoke Izugbara.

LE TEMPS DES BILANS

Les équipes qui mesurent les retombées des différents ateliers de masculinité positive sont à l'œuvre depuis 2019, principalement dans des bidonvilles, où les problèmes associés à la masculinité toxique sont exacerbés. Elles recommuniquent avec les hommes qui ont participé à ces programmes. La collecte de données a dû s'arrêter à un certain moment en raison de la COVID-19, mais pendant ce temps, les chercheurs ont pu amorcer leur analyse et produire des résultats préliminaires.

Ces derniers sont porteurs d'espoir. Après avoir été sensibilisés, des hommes « trouvent par exemple qu'il est important d'avoir une bonne attitude et qu'il est possible que le rôle de pourvoyeur de la famille ne revienne pas uniquement à l'homme, signale Marie-Gloriose Ingabire. Mais il nous reste à évaluer les changements concrets dans les comportements ». Pour y arriver, les chercheurs s'entretiennent aussi avec les femmes, question de voir si elles en ressentent les effets dans leur quotidien. Au final, ils espèrent en tirer des leçons pour bâtir de nouveaux programmes de masculinité positive, plus adaptés aux réalités de chaque pays.

Lloyd Muriuki Wamai, de l'Africa Alliance of YMCAs, recueille également des données sur les *power spaces*, entre autres celui de Kitwe, en Zambie. Rapidement, il est apparu que les hommes avaient très peu de notions en matière de planification familiale. C'est qu'un certain cercle vicieux s'est installé. Plusieurs femmes tombent enceintes et sont abandonnées par leur partenaire. Ces mères célibataires refusent que leurs filles subissent le même sort et se font un devoir de les accompagner à la clinique pour qu'elles aient accès à une méthode contraceptive. La planification familiale est ainsi devenue une « affaire de femmes ». « Les hommes pensent que tout est décidé d'avance et ils n'ont pas l'habitude d'en discuter, précise-t-il. De plus, la religion, très présente au Rwanda et en Zambie, ne les encourage pas à se renseigner sur ces questions. »

« Nous avons donc eu l'idée de créer un petit jeu vidéo éducatif où les jeunes adultes pourront apprendre des notions de base sur le sujet, poursuit Lloyd Muriuki Wamai. Nous pensons que cette stratégie pourrait être particulièrement efficace pour les amener à prendre leurs responsabilités – et nous comptons en mesurer les retombées. »

• IMAGE : DENIS BLACKBURN / UQAC



Car la masculinité toxique ne sert pas les hommes non plus. « Dans le patriarcat, on attribue uniquement aux hommes des rôles et des qualités qui sont valorisés et estimés dans la société. Même s'ils représentent apparemment une position avantagée pour les hommes, ces privilèges ont privé les hommes de mieux connaître ce que les femmes autour d'eux pensent et proposent ; ils ont été obligés à ne pas manifester leurs sentiments et compétences ; à nier les possibilités de chercher de l'aide et à se montrer toujours forts et capables même s'ils ne se sentent pas ainsi à l'intérieur », peut-on lire dans un livre de formation créé pour le Mali par le Centre d'étude et de coopération internationale, une organisation basée à Montréal.

Créée en 2018, cette formation prône d'ailleurs une approche d'égalité, gagnante pour toutes et tous, où les hommes peuvent prendre soin de leur famille, exprimer leurs sentiments, demander de l'aide et reconnaître leurs faiblesses tout en étant des hommes, mais des hommes meilleurs.

Pour le mieux-être de chacun et chacune, l'homme doit trouver une nouvelle place dans la société et, pour y arriver, il faudra nécessairement agir sur la religion, d'après Marie Fall. « L'Afrique a vécu énormément de drames et la religion, vue comme un refuge, prend davantage de place lorsque les sociétés sont en crise, explique-t-elle. Il y a une très grande ferveur religieuse en Afrique et elle influence énormément les comportements des gens. »

Chimaraoke Izugbara fait le même constat : « Les institutions religieuses jouent un grand rôle dans la société et elles renforcent le rôle traditionnel de l'homme comme chef de famille et pourvoyeur, alors que la femme est perçue comme une subordonnée. Lorsqu'on ajoute ce facteur à la pauvreté et au chômage, on réalise que les possibilités de changer les comportements des hommes sont limitées si l'on n'agit pas ailleurs aussi. »

Marie Fall est d'avis qu'il faut proposer une interprétation des textes religieux moins violente et plus constructive pour revoir les normes sociales. « En ce moment, les religions prescrivent la légitimité – à un degré variable selon la confession, l'ethnie, la culture, l'âge, la classe sociale – de la violence envers les femmes », déplore-t-elle.

La chercheuse souligne aussi l'importance de ne pas tomber dans l'autre extrême : donner tous les pouvoirs aux femmes. « C'est vraiment dans l'égalité entre les hommes et les femmes qu'une société est réellement gagnante. Et bien sûr, pour pouvoir s'y atteler, il faut résoudre les grands conflits qui minent les sociétés africaines, ce qui permettra enfin aux gens de vivre en paix et de gagner leur vie afin d'être en mesure de satisfaire leurs besoins de base et ceux de leur famille. On ne peut pas accomplir de réels progrès si les gens sont toujours en situation de survie. » ●

Les projets de recherche décrits dans cet article et la production de ce reportage ont été rendus possibles grâce au soutien du Centre de recherches pour le développement international (CRDI) du Canada.

• ILLUSTRATION : NITI MARCELLE MUETH



Des immeubles de la ville de Yalova se sont effondrés en 1999, lors d'un séisme de magnitude 7,4, dont l'épicentre se trouvait à Izmit, à 65 km de là. Il n'a duré que 37 secondes, mais a tué 17 000 personnes.

AVANT QUE LA TERRE TREMBLE

Sous les secousses, l'appartement a tangué comme un paquebot dans la tempête. « J'avais sept ans et j'étais dans la chambre avec mon père et ma mère, au troisième étage de notre immeuble, raconte Esra Moran Ünlü. Notre logement ballottait tellement que la porte du balcon s'ouvrait et se refermait sans cesse. » La jeune femme se souvient de tous ces débris d'édifices écroulés sur la route, des nuits passées dans la voiture et des conteneurs transformés en écoles de fortune. Son immeuble ne s'est pas affaissé, mais d'autres n'ont pas eu cette chance. Le séisme de magnitude 7,4 qui a frappé la ville d'Izmit en 1999 a fait plus de 17 000 morts dans la région.

« J'ai encore très peur des tremblements de terre », confie Esra Moran Ünlü, qui vit maintenant à Istanbul, à une centaine de kilomètres de sa ville natale. Elle a eu l'impression de revivre ce cauchemar lorsqu'un séisme a secoué la mégapole en septembre 2019. Elle s'est ruée à l'extérieur de son bureau en panique, restant loin du bâtiment pendant des heures par crainte de répliques sismiques.

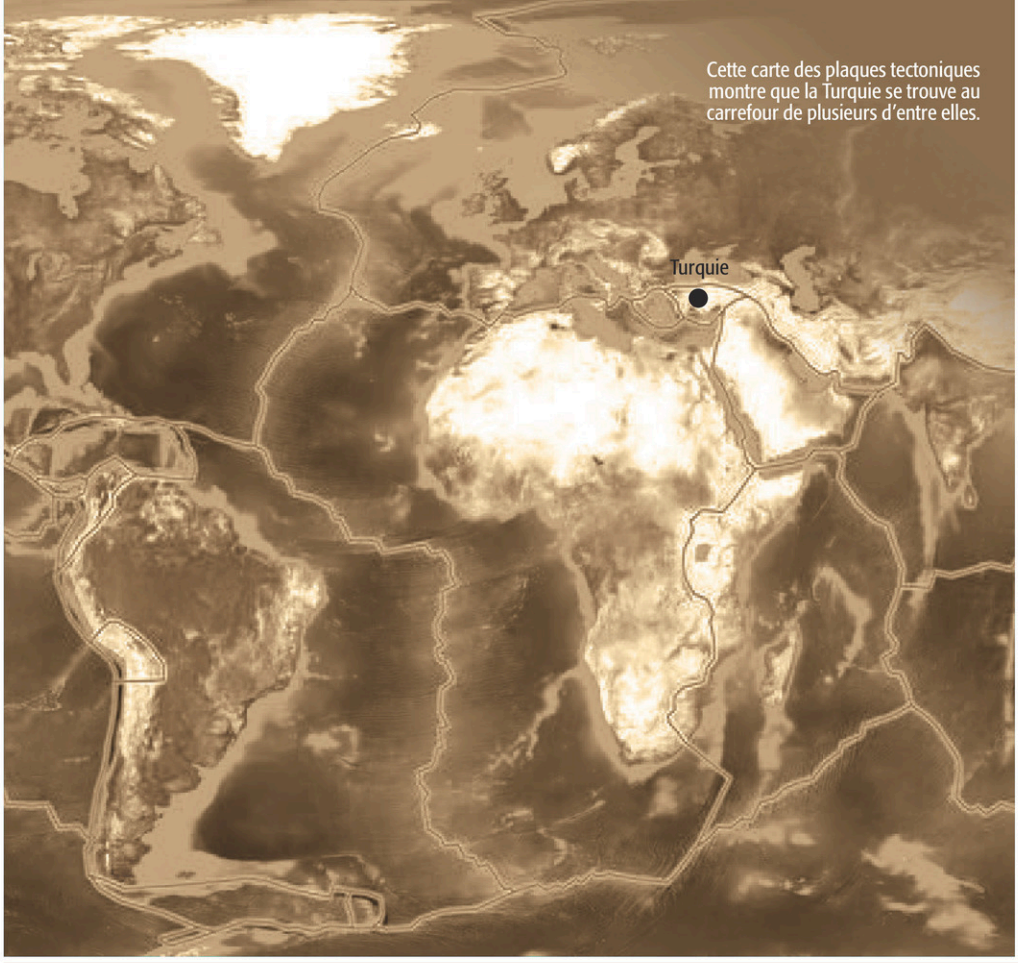
Ce jour-là, Istanbul a subi peu de dommages. Mais susceptible de se produire à n'importe quel moment, un mégaséisme – un « Big One » – menace sa population de plus de 15 millions d'habitants. Une catastrophe appréhendée qui pourrait se révéler bien pire que le tremblement de terre d'Izmit. Car la ville est mal située, et surtout mal préparée, malgré le choc de 1999.

SUR LA CORDE RAIDE

La Turquie est située au carrefour de plusieurs plaques tectoniques, qui « frottent » les unes contre les autres – un coulissement qui donne lieu à des à-coups parfois violents. Sur plus de 1 000 km, la faille nord-anatolienne longe le nord du pays – elle est analogue, en longueur, à la faille de San Andreas, en Californie. Cette zone de contact accumule de la tension sous le déplacement de la plaque anatolienne, principalement poussée vers l'ouest par la plaque arabique, mais coincée dans son mouvement par la massive plaque eurasienne. Ce jeu de compressions fait de la Turquie l'une des régions sismiques les plus actives du globe. Au cours du dernier siècle, le pays a subi 29 séismes d'une magnitude de plus de 6 sur l'échelle de Richter.

Selon les prévisions des sismologues, le prochain tremblement de terre devrait se produire dans la mer de Marmara, à 20 km au sud d'Istanbul. Un immense séisme a été documenté à cet endroit en 1766. Depuis, la plaque anatolienne, qui se déplace de quelques centimètres par année, aurait dû glisser sur plus de quatre mètres. Or, elle semble être arrêtée dans son déplacement. Après avoir établi la déformation de la plaque à l'aide de mesures acoustiques du fond marin et constaté la relative immobilité

• IMAGES : SHUTTERSTOCK.COM



Cette carte des plaques tectoniques montre que la Turquie se trouve au carrefour de plusieurs d'entre elles.



Des hommes fouillent les décombres du tremblement de terre de 1999.

Des milliers de morts et de blessés, une économie à l'arrêt, une ville en ruine : c'est un scénario auquel doivent se préparer des mégapoles vulnérables aux séismes, comme Los Angeles et Tokyo. À Istanbul aussi, une course contre la montre est entamée. Mais s'y prend-on de la bonne façon ?

PAR MIRIANE DEMERS-LEMAY

de la zone, des chercheurs avancent que la faille est « bloquée », ce qui signifie que les roches environnantes accumulent une grande tension pouvant être libérée à tout moment. De quoi affecter potentiellement des millions de personnes et paralyser l'économie du pays, concentrée autour de la mer de Marmara.

« Cette région est bien connue d'un point de vue scientifique. Tous les 200 ou 250 ans, elle est touchée par un tremblement de terre de magnitude supérieure à 7, indique la sismologue Eser Çaktı, à la tête du Département de génie sismique de l'Université du Bosphore. La probabilité que survienne un mégaséisme est très forte, mais quand aura-t-il lieu : demain ? dans cinq ans ? On l'ignore. »

DES SQUELETTES FRAGILES

Entre les arbres, des Stambouliotes font leur jogging matinal ou boivent du café assis sur les bancs. Le parc Maçka est l'un des derniers espaces verts du centre-ville. Si l'Organisation mondiale de la santé recommande plus de 10 m^2 d'espace vert par habitant, la ville d'Istanbul n'en offre que 6,4. Le parc Maçka est ainsi l'un des rares endroits où les gens peuvent se réfugier en cas de tremblement de terre. En effet, le principal danger des séismes ne vient pas des secousses, mais de l'écroulement des immeubles fragiles, explique l'architecte Aslı Sener tout en balayant le parc du regard. À Istanbul, la plupart de ces derniers ont été érigés lors d'une vague de construction dans les années 1980. « Les édifices conçus il y a 100 ans sont souvent plus solides que ceux construits il y a 50 ans », dit-elle en critiquant le manque de règlementation pendant cette période.

Selon un rapport publié par la municipalité d'Istanbul en 2020, plus de 48 000 bâtiments pourraient s'effondrer ou être gravement endommagés en cas de tremblement de terre majeur, tandis que 200 000 autres pourraient subir des dommages considérables. Dans des quartiers vulnérables comme Avcılar, plus de 60 % des immeubles pourraient écoper si rien n'est fait pour renverser la situation. Aslı Sener a déjà participé à un projet de rénovation de l'un de ces bâtiments. « On a extrait des carottes de ciment qu'on a analysées en laboratoire pour évaluer l'état de la structure », explique-t-elle. Son équipe a constaté que le ciment était composé de sable provenant de la mer, un matériau économique, mais vulnérable à la corrosion en raison de sa teneur en sel. Des barres d'acier lisses avaient été utilisées pour renforcer la structure. Or, de la même façon qu'une vis est plus solidement fixée qu'un clou dans un mur, ces barres auraient dû être nervurées pour rester liées au ciment en cas de stress. « On a ensuite placé les éléments de la structure dans un logiciel de modélisation pour désigner les points faibles du bâtiment », détaille-t-elle.

Puis, l'équipe a renforcé le tout. « Il y a une méthode qui consiste à envelopper les colonnes avec des corsets métalliques, mais dans notre cas, on a employé de la fibre de carbone », précise Aslı Sener. Aux jonctions



Un monument érigé à Gölcük après le séisme de 1999. On peut y lire l'inscription « Nous n'oublierons jamais ».

des poutres et des colonnes, l'équipe a posé des « prothèses » fabriquées avec un polymère très résistant constitué de résine époxy et de fibre de carbone. Ces prothèses sont formées d'une enveloppe externe renforcée par des tiges de polymère dans les colonnes.

Cet immeuble a été rénové avec succès. Cependant, il faudrait procéder pareillement avec près de 250 000 bâtiments, et ce, de façon urgente, selon le rapport de la municipalité d'Istanbul. Un défi inimaginable pour les propriétaires, qui auraient besoin de financement public pour y parvenir. Or, cet argent est plutôt investi dans la construction de l'ambitieux et controversé canal Istanbul, qui divisera la ville en deux. Au coût estimé de 15 milliards de dollars américains, cette nouvelle route de 45 km sera creusée parallèlement au détroit du Bosphore afin de faciliter le transport maritime entre la mer Noire et la mer de Marmara. Alors que le président turc, Recep Tayyip Erdoğan, y voit une juteuse occasion d'affaires, plusieurs experts estiment que cette stratégie néolibérale d'urbanisation de la ville est au cœur de la fragilité sismique d'Istanbul.

URBANISATION GALOPANTE

Dans la foulée du séisme de 1999, on a tenté de préparer Istanbul au « Big One ». Des centaines d'écoles et d'établissements de santé ont été reconstruits selon les normes antisismiques. Les fragiles bidonvilles de plusieurs quartiers ont été détruits. Mais ces efforts ne se sont révélés ni suffisants ni même adéquats pour compenser l'urbanisation galopante de la ville. Ainsi, sa vulnérabilité sismique n'a pas diminué en 20 ans, constate Tayfun Kahraman, directeur du service de la gestion des risques sismiques d'Istanbul. « Le processus pour gérer les catastrophes nécessite une interaction interdisciplinaire et la coopération des parties prenantes des secteurs public et privé, des universités et des organisations non gouvernementales », déclare ce dernier. Or, le pouvoir de décision de l'urbanisation de la ville a plutôt été concentré entre les mains du gouvernement de Recep Tayyip Erdoğan, en poste depuis 2002, qui a favorisé la privatisation des terres et la spéculation immobilière au détriment de la sécurité civile.

« Le gouvernement et le secteur immobilier utilisent "le discours du risque de catastrophe" comme un outil idéologique pour légitimer la ruée vers le développement urbain en Turquie », ont critiqué l'urbaniste Miray Özkan Eren et l'architecte Özlem Özçevik dans la revue *A|Z ITU* de la Faculté d'architecture de l'Université technique d'Istanbul en 2015. « Cette approche a pour effet d'accroître les inégalités sociales, de causer des dommages écologiques irréparables et de négliger les droits démocratiques. » À titre d'exemple, le gouvernement turc a obtenu des sommes d'argent substantielles d'organismes comme la Banque mondiale pour mener des projets de construction présentés dans le cadre de sa stratégie de résilience sismique, mise en place en 2012. Ces projets, qui comprennent un troisième aéroport, un troisième pont au-dessus du Bosphore et le canal Istanbul, contribuent au contraire à l'étalement urbain, s'alarment plusieurs experts comme l'urbaniste Pelin Pınar Giritlioğlu. « Istanbul est une ville sous la pression de projets qui consomment ses derniers lieux ouverts tout en menaçant les aires rurales en périphérie qui, pourtant, sont importantes pour fournir la nourriture et l'eau aux habitants en cas d'urgence », observe-t-elle en notant que le projet du canal Istanbul vise à attirer au moins deux millions de personnes supplémentaires dans la mégapole.

En octobre 2020, un tremblement de terre à Izmir, en bordure de la mer Égée, a de nouveau fait prendre conscience de la menace. Le maire d'Istanbul, Ekrem İmamoğlu, a rappelé que la résilience sismique faisait partie de ses priorités. Une équipe multidisciplinaire a récemment été mise sur pied pour mettre à jour avec plus de précision les risques associés à l'important secteur industriel situé autour de la mer de Marmara. Le groupe a aussi pour mandat de concevoir des outils destinés à limiter les risques et à améliorer la collaboration entre différents acteurs. Deux centres pour sensibiliser la population aux catastrophes seront créés au cours des prochaines années et des systèmes d'alerte des tsunamis seront mis en place.

Mais est-ce trop peu, trop tard ? Est-il encore temps de freiner l'urbanisation pour sauver Istanbul quand la terre tremblera ? Un ballet de grues mécaniques s'activent sur les chantiers des nouveaux quartiers. À toute vitesse, la mégapole continue de grandir au-dessus d'une catastrophe annoncée. ●

• IMAGE : SHUTTERSTOCK.COM

<MTL> CONNECTE

Un événement PRINTEMPS NUMÉRIQUE

L'événement majeur sur la transformation numérique



12 000	500	300	80	6
PARTICIPANTS	EXPOSANTS	CONFÉRENCIERS	PAYS	JOURS

Du 12 au 17 octobre 2021

La Semaine numérique de Montréal – Édition hybride

RÉSERVEZ VOTRE PLACE >

MTLCONNECTE.CA

TOURISME / MONTRÉAL · Le Monde · CONSEIL DES ARTS DE MONTRÉAL · Montréal · Québec

SUS AUX CONTAMINANTS !

VALÉRIE LANGLOIS ÉTUDIE LES RÉPERCUSSIONS DES CONTAMINANTS SUR LES VERTÉBRÉS ET SOUHAITE SENSIBILISER LE PUBLIC À L'IMPORTANCE DE MIEUX RÉGLEMENTER CES SUBSTANCES.



Le Disperse Yellow 7 (DY7) et le dinonylnaphthalène sulfonate de calcium (CaDNS) ne sont pas les contaminants les plus connus. Ils n'avaient d'ailleurs jamais été vraiment étudiés. Ces substances chimiques, qui entrent dans la fabrication des vêtements et de lubrifiants sous la forme de colorants, sont pourtant nuisibles à la santé de certains vertébrés, comme les amphibiens. C'est ce qu'ont révélé deux études cosignées par Valérie Langlois, chercheuse et professeure à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS). Lorsqu'ils aboutissent dans les cellules des grenouilles qui peuplent nos lacs et rivières, ces polluants modifient le fonctionnement normal de leur organisme, causent des malformations et augmentent la mortalité.

Depuis la publication des articles scientifiques sur le DY7 et le CaDNS, le gouvernement du Canada a pris acte des résultats et revu ses modèles de réduction du risque. L'équivalent d'un coup de circuit pour la lauréate du Prix du Québec – Relève scientifique 2020, attribué par le gouvernement du Québec à une personne de 40 ans ou moins se distinguant par l'excellence de ses travaux de recherche et son leadership. « En écotoxicologie, toutes les preuves disponibles et pertinentes sont prises en compte pour bien définir le risque. Dans les cas du DY7 et du CaDNS, nous étions les premiers à les étudier, de là l'importance relative de ces travaux », explique celle qui a publié quelque 60 articles dans des revues de premier plan au cours de la dernière décennie.

FRANC-PARLER

Même si elles n'ont pas toujours une telle portée réglementaire, les recherches de Valérie Langlois sur les nombreux autres contaminants engendrés par les activités humaines n'en sont pas moins d'intérêt. Son approche, qui allie biologie moléculaire, biochimie, chimie et toxicologie environnementale, a permis entre autres de renforcer l'édifice des connaissances sur la toxicité du bitume dilué issu des sables bitumineux albertains, qui transite par oléoducs. La chercheuse a démontré que le produit peut causer des difformités chez les larves de certains poissons et chez les embryons de grenouille, ce qui pourrait survenir dans le cas d'un déversement par exemple. « J'ai beaucoup contribué à remplir la bible des autorités réglementaires à ce sujet », commente-t-elle.

L'atrazine et le Bti, deux pesticides utilisés massivement au pays, et les molécules employées en chimiothérapie font aussi partie des substances qui retiennent l'attention de la titulaire de la Chaire de recherche du Canada en écotoxicogénomique et perturbations endocriniennes. Leur point commun : toutes se fraient un chemin jusque dans l'environnement, altérant au passage la production d'hormones essentielles au bon développement des

PHOTO : LOUISE BILODEAU

espèces animales qui y vivent. « La question n'est pas de savoir si une substance chimique aura un effet, mais bien comment en limiter les répercussions potentiellement néfastes, affirme Valérie Langlois. Ne pourrait-on pas la transformer afin qu'elle se dégrade rapidement ? Ou qu'elle puisse faire office de nutriment ? » Manifestement, la scientifique a le franc-parler de ceux et celles qui souhaitent provoquer des changements.

Ses efforts en ce sens l'ont notamment menée à mettre sur pied le Centre intersectoriel d'analyse des perturbateurs endocriniens (CIAPE) en 2020. Financée par l'INRS, cette unité regroupe plus d'une centaine d'experts de tous les horizons autour de la thématique des perturbateurs endocriniens, qu'on trouve entre autres dans les produits pharmaceutiques et domestiques. « Une de nos missions est d'informer la population sur ces substances nocives pour la santé. Il faut que ce sujet soit davantage sur la place publique », déclare cette leader naturelle. Chose notable : son équipe compte 70 % de femmes, ce qui en fait l'un des rares laboratoires à compter une majorité de chercheuses au Québec, au Canada et dans le monde.

ÇA JOUE DUR

Dans sa croisade contre les contaminants qui polluent les écosystèmes, Valérie Langlois ne se fait pas que des amis. Très tôt dans sa carrière, la chercheuse a été victime d'intimidation de la part de représentants de compagnies dont elle égratignait les produits. Elle se souvient d'un épisode houleux à un congrès où elle présentait des résultats. « Un participant m'a prise à partie et a menacé de salir ma réputation », se souvient-elle. L'incident, qu'elle qualifie de « traumatisant », l'a découragée pendant un temps de poursuivre ses travaux sur le contaminant en question, un biopesticide – ce n'est que tout récemment qu'elle a repris le filon. « Si je ne travaille pas là-dessus, qui le fera ? Je ne pouvais pas laisser gagner mon intimidateur », dit-elle.

La chercheuse n'est malheureusement pas la seule à recevoir une volée de bois vert pour ses travaux. « La pratique est répandue ; j'en ai moi-même fait les frais, raconte Vance Trudeau, professeur au Département de biologie de l'Université d'Ottawa et directeur de thèse de Valérie Langlois. Insultes, mises en garde et tentatives de sabotage sont les tactiques de lobbyistes embauchés précisément à cette fin par un petit nombre de compagnies très agressives. » Paradoxalement, ajoute-t-il, l'excellente capacité de communiquer de sa désormais proche collaboratrice a pour effet de la protéger de ces influences indues. « Elle est une as de la communication du risque sur les contaminants. Le CIAPE est en ce sens une idée géniale, puisqu'il attire l'attention sur un sujet qu'on ne peut plus ignorer collectivement. » Difficile en effet de museler une communauté de chercheurs tricotée serrée. ●

Par Maxime Bilodeau



PHOTO : CHRISTINNE MUSCHI

Les questions de Rémi Quirion

SCIENTIFIQUE EN CHEF DU QUÉBEC*

RQ : Que représente pour vous le Prix du Québec – Relève scientifique que vous avez gagné en 2020 ?

VL : Il vient reconnaître la portée de mes recherches sur les conséquences des contaminants sur notre faune et nos écosystèmes, qui sont extrêmement importantes dans la société québécoise. Également, ce prix fait rayonner les efforts de tous les membres de mon groupe de recherche, anciens et futurs, puisqu'il confirme la qualité de la formation que je donne. Finalement, il me permet de poursuivre mes travaux pour un environnement sain pour tous les habitants de la planète.

RQ : Voyez-vous d'un bon œil la participation citoyenne en recherche ?

VL : Absolument ! Par contre, il est essentiel qu'elle soit sollicitée ou supervisée par des scientifiques. On s'assure ainsi de la qualité des observations ou des échantillons ainsi que de la validité des résultats. La science participative permet à la population d'en savoir davantage sur divers sujets scientifiques d'intérêt, mais aussi de s'y immerger. On apprend mieux lorsqu'on est directement concerné, et non spectatrice ou spectateur. En guise d'exemple, je valide l'efficacité d'un filet conçu par un organisme à but non lucratif québécois pour retirer les microplastiques des rivières et des lacs. Dans une phase ultérieure, des participants seront invités à en faire l'essai. Une fois validé, ce filet pourra aider à « laver l'eau » du Québec, comme le dirait si bien Robert Charlebois.

RQ : Intimidation, tentatives de sabotage, désinformation : comment mieux soutenir les chercheurs et les chercheuses qui, tout comme vous, sautent dans l'arène publique pour partager leurs travaux ?

VL : Il faut savoir garder la tête haute et s'entourer de personnes bienveillantes afin de préserver son intégrité et sa confiance en soi. L'intimidation par les industries, qui fabriquent les différents produits chimiques et biologiques contaminant nos écosystèmes et notre corps, est réelle et parfois intense. Les établissements de recherche doivent servir de bouclier pour protéger leurs chercheuses et chercheurs et leur offrir toute l'aide juridique et psychologique nécessaire en cas de litige. Je connais malheureusement plusieurs scientifiques qui ont cessé d'étudier les conséquences des pesticides pour cause d'intimidation.

En outre, il faut guider le public vers une information de qualité. Les scientifiques n'étant pas formés en vulgarisation, les organisations doivent leur proposer des services de communication personnalisés pour les soutenir. Des plateformes permettent également aux femmes et aux hommes de science de développer leurs habiletés en vulgarisation et d'alimenter directement la scène médiatique.

** Le scientifique en chef du Québec conseille le gouvernement en matière de science et de recherche, et dirige les Fonds de recherche.*

Québec

Fonds de recherche – Nature et technologies
Fonds de recherche – Santé
Fonds de recherche – Société et culture

scientifique-en-chef.gouv.qc.ca
facebook.com/SciChefQC
@scichefqc

CULTURE

ÉMILIE FOLIE-BOIVIN @efolieb





LIRE

La vie en boîte

Omniprésents en ce 21e siècle, les bio-objets ont la cote : cellules souches, embryons congelés, tissus cellulaires fabriqués en laboratoire. Il ne semble pas y avoir de limites à ce qu'on peut créer dans une boîte de Pétri. N'a-t-on pas lu ou entendu qu'il est aujourd'hui possible de concevoir un humain à partir de trois génomes?

La sociologue Céline Lafontaine est fascinée par cette vie qui prolifère in vitro. Dans *Bio-objets : les nouvelles frontières du vivant,* elle braque les projecteurs sur l'usage, la complexité et l'existence même des produits biologiques. Ils demeurent méconnus bien qu'ils fassent les manchettes.

Son livre soulève plusieurs questions éthiques, par exemple celles liées aux embryons et ovules inutilisés qui dorment dans les banques des cliniques de fertilité. Ils pourraient servir à la recherche scientifique ou à d'autres familles. Mais « ils ne sont jamais présentés dans leur dimension matérielle économique ni en tant que ressource biomédicale », mentionne la chercheuse. N'oublions pas qu'il y a « toute une dimension affective » dans le fait de donner des embryons. « Les gens ne veulent pas les détruire », explique en entrevue la professeure de sociologie de l'Université de Montréal.

Céline Lafontaine constate ainsi que le public entretient « l'illusion d'une maîtrise du vivant plus grande qu'en réalité ». « Avec [la COVID-19] on devrait avoir compris ça. On a affaire à un virus dont on n'arrive pas à trouver l'origine ni à freiner la propagation. Ça devrait nous donner une idée de la complexité de la maîtrise du vivant, expose la sociologue. Quand on est incapable de comprendre les limites du vivant de l'humain, c'est difficile de penser les limites de la planète. »

L'universitaire souligne d'ailleurs une grande contradiction : d'un côté, la biodiversité s'éteint à petit feu et, de l'autre, le « vivant » de laboratoire connaît une croissance fulgurante. Nous méditerons encore longtemps sur ce qu'elle nomme la « face cachée de l'Anthropocène ».

Bio-objets : les nouvelles frontières du vivant, *par Céline Lafontaine, Éditions du Seuil, 337 p.*

VOIR

La fête à l'hosto

Des percées technologiques et scientifiques, deux pandémies (grippe espagnole et COVID-19), deux guerres : l'Hôpital général de Montréal en a vu de toutes les couleurs au cours de ses 200 années d'existence. Dire qu'à ses modestes débuts il ne comptait que… quatre lits! À l'occasion de cette année anniversaire, l'établissement hospitalier — qui a établi la première faculté de médecine au Canada, celle de l'Université McGill — offre au public une généreuse exposition virtuelle revenant sur ses moments et innovations charnières. Appuyée par de captivants documents d'archives, l'exposition en quatre chapitres ne lésine pas sur les détails. Elle explore autant la médecine de guerre et les limites des traitements médicaux pré-Louis Pasteur que ses liens avec le Canadien de Montréal ou le combat des femmes pour faire reconnaître la profession d'infirmière. Le tout en effleurant une parcelle de l'histoire de la métropole, puisque pendant ce temps l'hôpital a été au chevet d'une ville en pleine urbanisation.

Exposition du 200e anniversaire de l'Hôpital général de Montréal, *hgm200.com*



• IMAGE : HGM200.COM

ÉCOUTER



Le chœur de l'océan

Il n'y avait pas de meilleur moment pour plonger les microphones sous l'eau et écouter la vie dans l'océan que pendant la première moitié de 2020, alors que la COVID-19 clouait le trafic maritime au port, réduisant la pollution acoustique sous-marine. Cette période, que des chercheurs ont baptisée « Anthropause », était une occasion unique dont a profité l'équipe derrière *The Sound Aquatic*. Dans ce balado, des scientifiques partagent leurs enregistrements et s'en servent pour alimenter les discussions sur la façon dont les animaux marins s'orientent et se séduisent. Une plongée sonore instructive, agrémentée du doux cliquetis des crevettes, du chant des rorquals et du babil des larves.

The Sound Aquatic : The Ocean and the Anthropause, *cinq épisodes d'une vingtaine de minutes chacun, à télécharger sur votre plateforme de balados préférée.*

REGARDER

Bouillon de culture

James Cameron est bien connu pour son amour des profondeurs et des projets colossaux (*Titanic, Avatar*). Il n'est donc pas étonnant de le retrouver à la réalisation du documentaire *Le secret des baleines*. Chacun des quatre épisodes de cette minisérie de National Geographic s'orchestre autour de géants des mers — l'épaulard, la baleine à bosse, le béluga et le cachalot — et lève le voile sur leur culture, chose qu'on croyait jusqu'alors réservée aux humains. C'est exactement là que la série se distingue, dans sa capture de moments forts de transmission intergénérationnelle. On découvre ainsi des traditions de chasse, des dialectes et des routines migratoires. Un spectacle grandiose.

Le secret des baleines, *sur Disney+, quatre épisodes de 45 minutes.*

LIRE

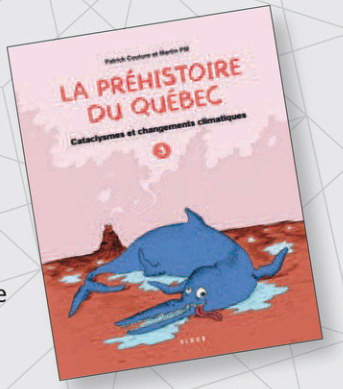
Libérez le trésor

Pendant des milliers d'années, cette puissance érotique qu'est l'éjaculation féminine a été célébrée et auréolée dans les textes anciens. Mais au cours des années 1930, elle a disparu de la littérature médicale. Ce « flux de joie » est soudainement devenu tabou, embarrassant, honteux. Dans son passionnant essai *Fontaines : histoire de l'éjaculation féminine de la Chine ancienne à nos jours,* l'Allemande Stephanie Haerdle propose aux femmes (et aux hommes) de le redécouvrir en remontant le fil de son histoire en montagnes russes. Ce nectar a été à la fois source de fierté au Rwanda, ignoré par les féministes occidentales (sous prétexte qu'il est un « fantasme misogyne déguisé »), embrassé par les militantes de la pornographie des années 2000, puis censuré en Grande-Bretagne (car les autorités y voyaient une forme d'urolagnie). Si de nombreux chercheurs et spécialistes s'interrogent sur la composition du fluide en vedette, l'ouvrage se fait surtout un devoir de l'honorer et se veut une vibrante invitation à la réappropriation du corps féminin et de sa sexualité.

Fontaines : histoire de l'éjaculation féminine de la Chine ancienne à nos jours, *par Stephanie Haerdle, Lux éditeur, 311 p.*

LIRE

Territoire fantastique



Les promenades en ville et les escapades en voiture prennent une tout autre dimension pour les enfants avec *La préhistoire du Québec* en main. Au fil d'explications truculentes, le vulgarisateur et passionné des temps préhistoriques Patrick Couture initie les jeunes aux premières lueurs de vie sur notre vaste territoire. Chacun des trois premiers tomes (*Dinosaures et animaux disparus* ; *Météorites, roches et fossiles* ; *Cataclysmes et changements climatiques*) révèle à quel point l'endroit où l'on habite s'est métamorphosé au fil des âges. On y apprend une foule de choses : des pieuvres de la taille d'un autobus scolaire ont vécu dans le sud du Québec (!) ; les Laurentides auraient déjà été plus hautes que l'Himalaya (!!) ; et l'absence de fossiles de dinosaures dans notre sous-sol ne veut pas dire qu'ils n'ont pas un jour vagabondé dans les parages. Des faits à décrocher la mâchoire que Martin PM illustre avec punch. Les trois tomes suivants de cette délicieuse collection paraîtront au cours de 2022.

La préhistoire du Québec, *3 tomes, par Patrick Couture et Martin PM, Éditions Fides, 48 p.*

La vraie nature

Véritable mine d'or d'informations et de conseils, *Le jardin vivrier : autosuffisance et non-travail du sol* documente le potager nordique de Marie-Thérèse Thévard avec une telle générosité que cela en fait un incontournable pour les maraîchers. Sa fille Marie révèle aux apprentis comme aux initiés les secrets maternels pour cultiver fruits, légumes et légumineuses selon les principes de la permaculture et en faisant confiance au « génie du sol ». Dans ce guide pratique rythmé par les mois de l'année, le lecteur apprend autant à commencer un jardin que le b.a.-ba des semis, la lutte contre les ravageurs et la préservation des récoltes. En plus d'être abondamment illustré, il lègue recettes et calendriers et glisse même quelques trucs sur l'installation d'un poulailler. Le tout transpire tellement l'amour de la terre et de la nature qu'il réussira assurément à faire germer bien des projets.



Le jardin vivrier : autosuffisance et non-travail du sol, *par Marie Thévard, Écosociété, 384 p.*

•IMAGE : FIDES/MARTIN PM

RÉTROVISEUR

L'HISTOIRE DES SCIENCES VUE PAR SATURNOME





Mais surtout, une 2e dose de vaccin.

Québec.ca/vaccinCOVID

Votre gouvernement

Québec



À la recherche de nouveaux balados instructifs ?

Découvrez les émissions créées par la communauté uqamienne sur une multitude de sujets.

balados.uqam.ca

UQÀM