

# La zone critique, un labo planétaire

C'est une fine pellicule à la surface de la Terre, la « peau » de notre planète. Là où s'épanouit la vie. Des scientifiques de toutes disciplines l'auscultent pour éclairer les interactions qui s'y jouent. Entre le sol, le ciel et l'eau.

ien ne distingue le minuscule ruisseau du Strengbach de ses voisins vosgiens. Son bassin versant ne fait que 80 hectares, peuplés à 80 % d'épicéas et 20 % de hêtres accrochés aux fortes pentes du massif granitique. Entre 880 et 1 150 mètres d'altitude, la petite vallée située sur la commune d'Aubure, à 60 kilomètres au sud-ouest de Strasbourg, n'a pourtant rien d'ordinaire : c'est un laboratoire de pointe dont l'importance ne cesse de grandir. Le Strengbach est un nom de plus en plus célèbre dans le monde des hydrogéologues, géochimistes, agronomes, pédologues, écologues et de nombreux autres chercheurs ayant à faire avec une fine pellicule à la surface de la Terre, qui débute dans les couches basses de l'atmosphère et se termine sur le socle de la croûte terrestre. Quelques centaines de mètres d'air, de dix à cent mètres de roches : voilà la « zone critique » dont le Strengbach est l'une des portes d'entrée scientifiques.

Zone critique ? L'expression, aux relents militaires ou radioactifs, nous vient des États-Unis pour définir cette zone étroite où s'épanouit la vie partout à la surface du globe, essentielle pour le fonctionnement géologique de la planète, mais aussi parce que c'est l'habitat des humains. Elle est le théâtre d'une conversation à trois entre les couches rocheuses, le rayonnement solaire et le travail chimique de l'eau et des micro-organismes, qui transforment les premières en sol fertile favorable au vivant. Ces phénomènes d'altération de la roche ont été décrits pour la première fois en 1845 par le chimiste français Jacques-Joseph Ebelmen, dont les travaux sur la décomposition des silicates ont ouvert la voie aux recherches sur la façon dont les plantes, le Soleil, la géochimie ont permis de rendre la planète habitable. « *Ebelmen décrit en précurseur le cycle du carbone*, admire aujourd'hui Jérôme Gaillardet, géochimiste à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP). *Il montre que le*

**+** Jérôme Gaillardet, *La Terre habitable ou l'épopée de la zone critique*, La Découverte, à paraître le 5 octobre 2023

Bruno Latour, Peter Weibel (dir.), *Critical Zones: The Science and Politics of Landing on Earth*, MIT Press, 2020

Bruno Latour, *Face à Gaïa. Huit conférences sur le nouveau régime climatique*, La Découverte, 2015

*CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau de pluie altère la roche pour former des argiles et libérer des sels minéraux qui seront ensuite captés par les plantes.* » Les travaux fondamentaux de ce chercheur mort jeune sont ensuite tombés dans l'oubli pendant 150 ans !

## Comment la roche stérile devient un sol fertile

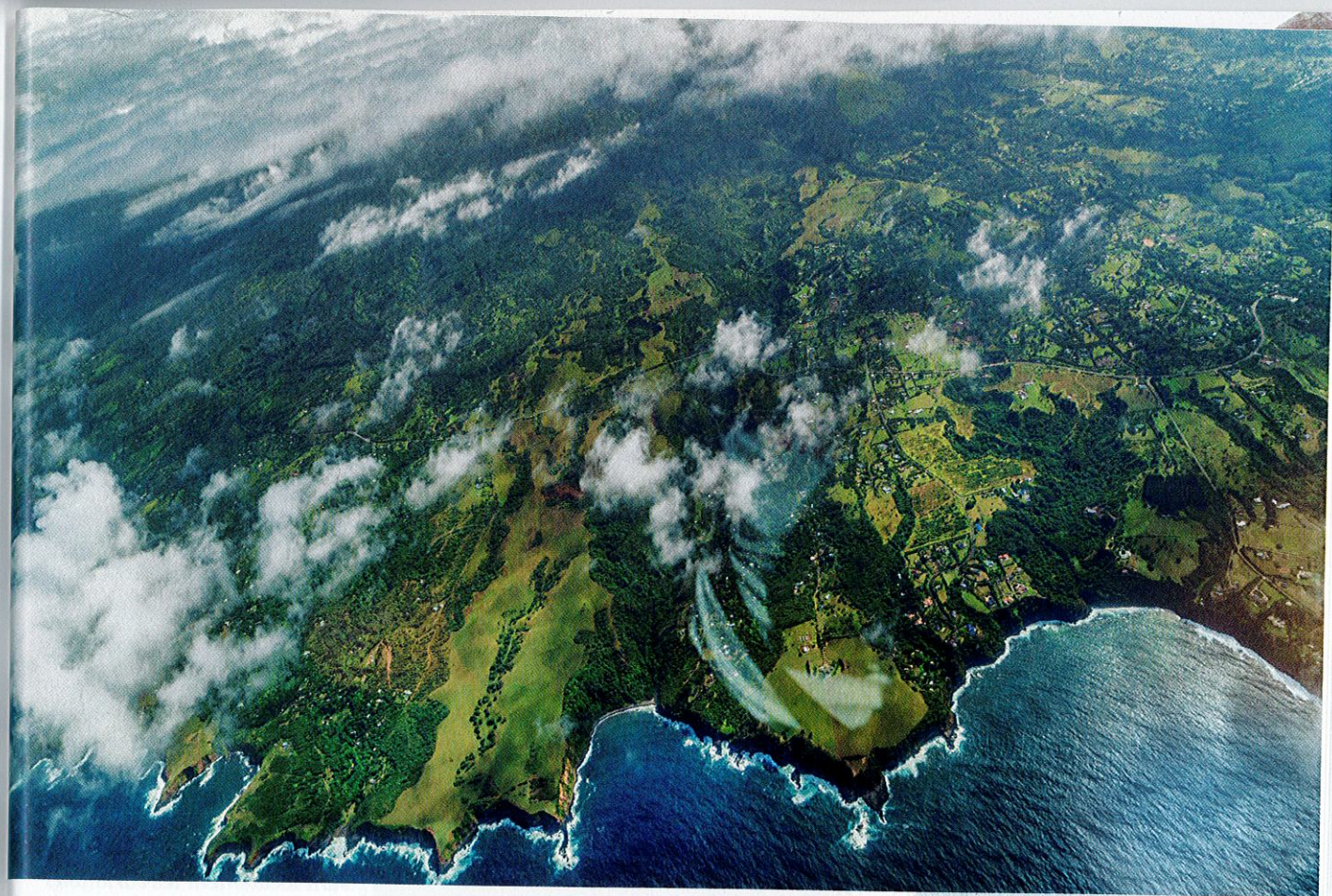
Ce n'est en effet que dans les années 1990 que les géochimistes qui tentent de reconstituer en laboratoire le processus d'érosion des roches observent que les vitesses de transformation obtenues sur les paillassees sont mille fois supérieures aux mesures effectuées sur le terrain. Ces chercheurs, principalement américains et européens, qui veulent comprendre comment, il y a 500 millions d'années, les plantes ont pu transformer un substrat rocheux stérile en un sol fertile, trouvent vite le hiatus. « *Au laboratoire, pour étudier la réaction qui transforme un minéral en milieu naturel sous l'action de l'eau de pluie, on réduit les facteurs qui jouent un rôle sur le terrain : la circulation de l'eau, les êtres vivants comme les microbes formant à la surface des roches une pellicule appelée biofilm, la complexité des micro-environnements, etc.* », détaille Jérôme Gaillardet. Les géochimistes ne pouvaient donc résoudre le problème seuls.



J. GAILLARDET

« En 1845, le chimiste Jacques-Joseph Ebelmen a décrit en précurseur le cycle du carbone. Mais ses travaux sont tombés dans l'oubli pendant 150 ans ! »

Jérôme Gaillardet, géochimiste à l'Institut de physique du globe de Paris



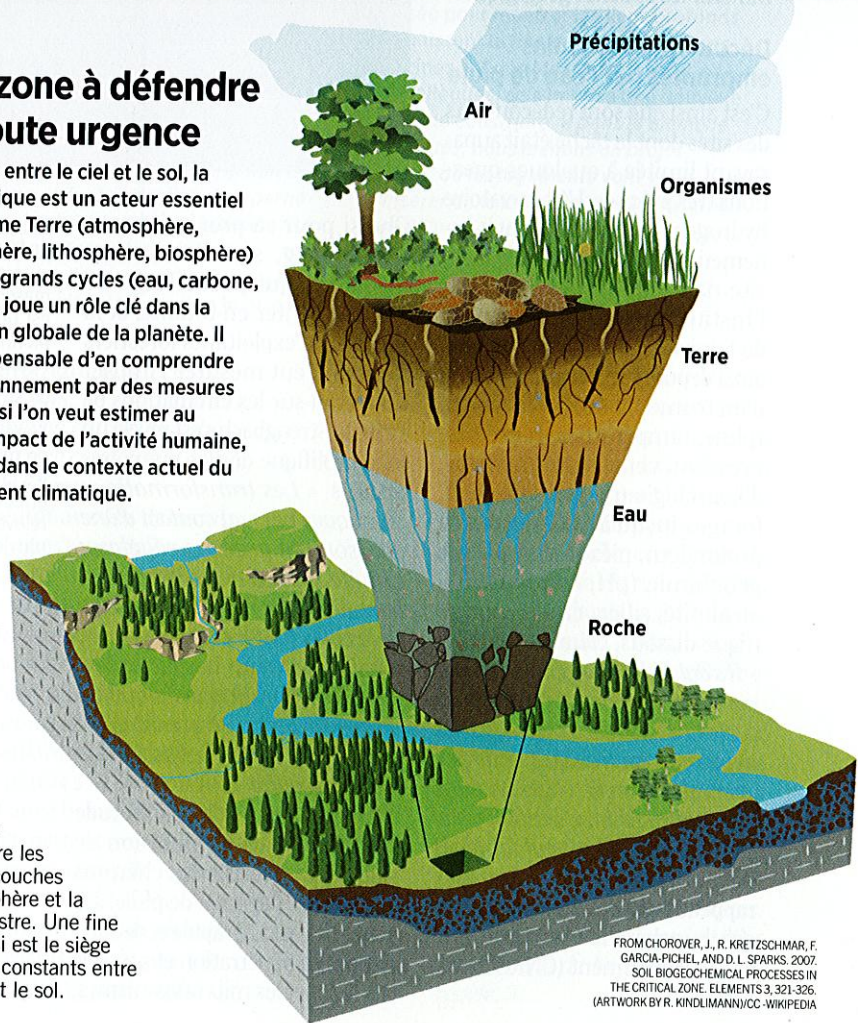
MATT ANDERSON/GETTY IMAGES

Il leur fallait l'aide des agronomes, des écologues, des hydrologues. C'est ainsi que dans les années 2000, la National Science Foundation américaine a décidé de financer l'équipement en instruments de mesure de dix sites naturels répartis sur le territoire américain, pour un travail au long cours. Ce nouveau domaine scientifique doit répondre aussi à une question de plus en plus cruciale: le changement climatique impacte en effet en priorité la zone critique et bouleverse les habitudes de vie de ses habitants, des micro-organismes des sols aux humains ou aux plantes. Jérôme Gaillardet, à l'époque aux États-Unis, assiste à la création de ces lieux de recherche. Séduit, le chercheur décide d'importer la notion en France puis en Europe, en sachant que le réseau de scientifiques travaillant sur ces questions est dense mais pas vraiment conscient de travailler sur la « peau » de la Terre. Chacun s'occupe de quelques interactions très ciblées dans des programmes à l'objet précis comme le stockage de carbone ♦♦♦

## Une zone à défendre de toute urgence

Interface entre le ciel et le sol, la zone critique est un acteur essentiel du système Terre (atmosphère, hydrosphère, lithosphère, biosphère) et de ses grands cycles (eau, carbone, etc.). Elle joue un rôle clé dans la régulation globale de la planète. Il est indispensable d'en comprendre le fonctionnement par des mesures précises, si l'on veut estimer au mieux l'impact de l'activité humaine, *a fortiori* dans le contexte actuel du changement climatique.

**Tranches de vie.** Le vivant s'est installé entre les premières couches de l'atmosphère et la croûte terrestre. Une fine pellicule qui est le siège d'échanges constants entre l'eau, l'air et le sol.



FROM CHOROVER, J., R. KRETZSCHMAR, F. GARCIA-PICHEL, AND D. L. SPARKS, 2007. SOIL BIOGEOCHEMICAL PROCESSES IN THE CRITICAL ZONE. ELEMENTS 3, 321-326. (ARTWORK BY R. KINDLIMANN)/CC-WIKIPEDIA



◆◆◆ dans le sol ou les transferts de polluants. « Il a fallu que je rencontre les responsables d'institutions comme le CNRS, l'Inrae, le BRGM, l'IRD, les universités, pour convaincre qu'il fallait désormais travailler en interdisciplinarité », explique le géochimiste. Pas simple. Chacun défend son pré carré. Ainsi, l'étude des nappes souterraines est l'apanage du Bureau de recherche géologique et minière (BRGM), mais la mesure et le suivi des eaux superficielles sont le domaine de l'Institut national de recherche sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). Les échanges sont très parcellaires alors qu'il s'agit de la même molécule, l'eau, et de sa faculté à traverser les sols et franchir les couches géologiques.

### Découvrir les chemins empruntés par l'eau de pluie

C'est ainsi que sont redécouverts des sites dont la tâche était auparavant limitée à quelques questions très précises. L'Observatoire hydrogéochimique de l'environnement (OHGE) du Strengbach, site national d'observation de l'Institut national des sciences de l'univers (Insu-Cnrs), déploie ainsi depuis 1985 toute une série d'instruments de météorologie (pluie, température, humidité, pression, vent, rayonnement), d'hydrologie (mesures de débit, forages jusqu'à 120 mètres de profondeur, piézomètres) et de géochimie (pH, conductivité, alcalinité, silice, carbone organique dissous, éléments traces). « Il s'agissait à l'origine de mesurer l'effet, sur les végétaux et le cycle de l'eau, des retombées des oxydes de soufre ( $SO_2$ ) émis par la combustion de charbon dans la vallée du Rhin. C'était l'époque des "pluies acides", qui faisaient dépérir les résineux vosgiens », rappelle Nolwenn Lesparre, chargée de recherche à l'institut Terre et Environnement (CNRS Strasbourg).



HUBERT RAGLIET/INRAE/IPS/CHOCHE/CNRS IMAGES



PASCAL VARRAMOND/INRAE/IPS/CHOCHE/CNRS IMAGES

Choisi pour sa proximité avec Strasbourg, ses dimensions modestes qui permettent de l'instrumenter en totalité, et la présence d'exploitants forestiers dont on peut mesurer l'impact du travail sur les circulations de l'eau, le Strengbach s'est révélé un labo prolifique dès les premières années. « Les transformations chimiques liées au contact d'une eau soufrée avec les végétaux ont été suivies dans le ruissellement au sol puis dans le ruisseau collectant les eaux de pente, détaille Nolwenn Lesparre. Une nette amélioration de la qualité du ruisseau a pu être constatée à mesure que cessait l'utilisation de charbon soufré. »

Au fil des ans, le champ d'étude s'est élargi, avec l'ambition de mieux caractériser les chemins empruntés par l'eau de pluie, ses zones de passage rapide et de stagnation, sa pénétration et son rôle sur le sol et les microorganismes,

**Le bassin versant du Strengbach,** au cœur du massif vosgien, est un site pionnier dans l'étude de la zone critique. En haut : sur l'une des stations de mesure, les chercheurs effectuent des relevés météo et pluviométriques.

les échanges entre le sol, l'eau et l'atmosphère, la fertilité du substrat, et jusqu'aux conséquences des coupes d'arbres. « En mesurant localement les variations des débits de l'eau en différents endroits du bassin versant, nous avons montré que le circuit de l'eau était très dynamique et hétérogène, et donc d'un fonctionnement très complexe », poursuit Nolwenn Lesparre. La richesse des données disponibles et ces travaux méticuleux sont extrêmement rares, si bien que le Strengbach a immédiatement été choisi pour intégrer l'infrastructure de recherche Observatoire de la zone critique – application et recherche (Ozcar), créé en 2016 par le CNRS sur le modèle américain. Au début de la décennie 2010, en effet, un premier recensement montre que 23 infrastructures financées par l'État en France métropolitaine, en outremer et à l'étranger, et 60 sites scientifiques travaillent déjà sur la zone critique... sans le savoir. Cela comprend les observatoires des glaciers, de la neige et du permafrost, les réseaux de surveillance des eaux souterraines, l'encadrement scientifique des tourbières, les observatoires des bassins versants et le réseau de surveillance autour du projet du site d'enfouissement des déchets nucléaires de Bure

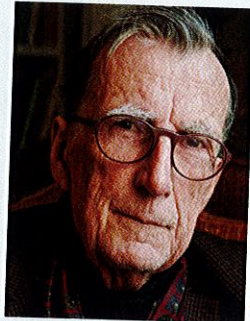
(Haute-Marne). Y sont également associées les « zones ateliers » du CNRS, qui travaillent sur des territoires entiers permettant de mieux comprendre les impacts de l'activité humaine sur l'environnement. Ainsi, la zone-atelier de Chizé (Deux-Sèvres) initie des programmes de recherche sur une plaine de 400 kilomètres carrés, avec la collaboration des agriculteurs qui l'exploitent.

### Des instruments de pointe dans un petit camion

En parallèle, les appareils de mesure sont appelés à évoluer. « On ne pouvait plus se contenter de prélèvements effectués lors de visites espacées de plusieurs semaines, il fallait des mesures en continu », expose Damien Jougnot, directeur de recherche à Sorbonne Université (Metis/CNRS). Dès 2012, dans le cadre du programme Critex qu'il a dirigé, de nouveaux instruments ont été inventés et des appareils capables de traquer des phénomènes souterrains invisibles ont été détournés de leur usage d'origine. Le développement des gravimètres supraconducteurs a ainsi permis de mesurer précisément la transpiration des végétaux au-dessus d'un massif karstique, de quantifier la perte journalière en eau de ces réservoirs calcaires et de mieux comprendre ainsi les interactions entre la roche, le vivant et l'eau sur ces milieux qui couvrent une grande partie des continents et des océans. « Des techniques d'imagerie 4D (la quatrième dimension est le temps, ndlr) nous ont révélé les flux d'eau souterraine qui contrôlent les transports des éléments minéraux dissous », se réjouit Damien Jougnot. Le *nec plus ultra*, c'est d'avoir réussi à faire entrer dans un petit camion ce type d'appareil d'imagerie pour pouvoir suivre les évolutions dans le temps. Le Strengbach a ainsi son « riverlab ». « Il réalise des prélève-

## Habiter la Terre autrement

En France, la zone critique avait un fervent militant. Décédé en octobre 2022, le philosophe Bruno Latour a mené une longue réflexion sur la place de l'homme sur Terre, aboutissant en 2015 à son ouvrage majeur, *Face à Gaïa*. « Bruno ne se contentait pas d'explorer le monde des idées, c'était aussi un homme qui voulait entendre ce que tous les acteurs avaient à dire », raconte Jérôme Gaillardet. Pour Bruno Latour, l'homme ne connaît pas sa « maison », ce qui explique qu'il ait abîmé un milieu de vie essentiel pour lui. Avoir conquis tous les continents et modifié les trois quarts de la surface terrestre n'autorise pas à affirmer avoir une connaissance de l'intimité même des agents biologiques qui en font l'habitabilité. « Au bout du compte, écrit-il en introduction de l'ouvrage collectif *Zones critiques [Critical Zones]*, en ce début du *xx<sup>e</sup>* siècle, la Terre apparaît de nouveau – à la stupéfaction de la partie la plus éclairée de l'espèce humaine – comme une Terra incognita. » Cette nouvelle façon « d'habiter » la Terre (ou « d'atterrir » selon le titre d'un



Le philosophe Bruno Latour considérait notre planète comme un être vivant.

JEAN-FRANÇOIS ROBERT/MODIS

de ses derniers ouvrages) résonne particulièrement auprès de ceux dont la fonction est justement de construire des logements. « Bruno Latour nous a incités à considérer la planète, non plus comme un globe où la zone habitable apparaît en périphérie, mais avec une zone critique au centre de notre figuration du monde », reconnaît Alexandra Arènes, architecte-paysagiste à la Société

d'objets cartographiques (SOC). Ce programme d'expérimentation en arts plastiques dirigé par le philosophe a proposé une vision du monde où l'écorce de la planète est au centre et le noyau à l'extérieur. C'est la méthode utilisée pour montrer les liens profonds qui unissent la fine couche de vie à ses « racines ». Pour Alexandra Arènes et ses collègues, cela impose une nouvelle façon de construire. « Dans la banlieue de Nantes, nous menons un projet de ZAC où les logements vont venir s'insérer dans le tissu d'arbres existant préalablement sur le terrain », raconte l'architecte. Une façon d'occuper le monde en laissant la place aux autres habitants.

ments automatiques d'eau de pluie et de sols, ce qui permet par exemple de suivre en temps réel l'effet d'une crue », se félicite Nolwen Lesparre.

Forts de vingt années de recul, les scientifiques américains commencent à tirer un premier bilan de ces programmes. « Et ils en concluent, comme souvent en science, que les résultats engrangés amènent plus de questions que de réponses ! », s'amuse Jérôme Gaillardet. Les rapports entre les plantes et les roches intriguent ainsi beaucoup. Quels signaux permettent aux plantes de s'enfoncer dans le substrat rocheux, et grâce à quelles modifications physiologiques les microorganismes peuvent-ils pénétrer toujours plus profond

dans la roche ? Ces questions sont essentielles, car ces communautés microbiennes sont des acteurs majeurs des cycles du carbone et de l'azote, mais aussi du fer, de la silice ou de l'aluminium. Voilà donc Ebelmen ressuscité 170 ans après sa mort. Le pionnier retrouverait dans Oskar l'essence de ses travaux. « Mieux comprendre comment tout cela fonctionne a des implications sociétales évidentes, conclut Jérôme Gaillardet. Nous ne pouvons plus agir sur notre environnement sans une discussion globale entre tous les acteurs humains – agriculteurs, industriels, ONG, environnementalistes, scientifiques, etc. – sur les impacts prévisibles que l'étude de la zone critique révèle. »

LOÏC CHAUVEAU

10 € - RD

