

# Véronique Gouverneur, la chimiste qui révolutionne l'industrie du fluor

**PORTRAIT** - La chercheuse belge, arrivée en 1998 à l'université britannique d'Oxford, est lauréate du Grand Prix scientifique 2026 de la Fondation Simone et Cino Del Duca

Remiser un Nobel aux oubliettes ne faisait pas partie des objectifs de Véronique Gouverneur. Mais le procédé que la professeure de chimie à Oxford a découvert pour produire du fluor est susceptible de remettre en cause cent cinquante ans de pratique de l'industrie. Cette chercheuse belge, dont le tableau de chasse est déjà orné de plusieurs trophées, va recevoir le Grand Prix scientifique 2026 de la Fondation Simone et Cino Del Duca, doté de 275 000 euros, devait annoncer le 2 juin l'organisme. « Elle a marqué la chimie du fluor par des travaux très novateurs sur le plan scientifique et dont les applications sont concrètes », salue Frédéric Taran, chef du service de chimie bio-organique et de marquage au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, qui ne cache pas son admiration pour son ancienne collègue.

C'est en 1886 qu'Henri Moissan isole le fluor en réalisant l'électrolyse d'un mélange de fluorure de potassium (KF) et d'acide fluorhydrique (HF), ce qui lui vaudra le Nobel de chimie vingt ans plus tard. Or, cet acide est particulièrement toxique, mortel, explosif et polluant. Mais on ne sait pas faire autrement pour extraire à partir du spath fluor (le minerai) ce gaz dont les propriétés, nous y reviendrons, ne se limitent pas à ce qu'en disent les publicités pour le dentifrice. C'est dire si les travaux de Véronique Gouverneur et de son équipe, publiés dans *Science* en 2023, ont été remarquables. Leur recette mécanochemique permet de se passer du diabolique acide fluorhydrique : mélanger plusieurs heures dans un broyeur à billes du minerai avec du phosphate de potassium provoque une réaction chimique ; on obtient du « Fluoromix », un nouveau réactif qui permettra aux chimistes de concocter tous les dérivés du fluor qu'ils veulent en pharmacie, en agrochimie, en électrochimie, etc.

Traditionnellement, pour apporter l'énergie nécessaire à une réaction chimique, on chauffe des réactifs, auxquels on peut ajouter des catalyseurs, pour obtenir un produit. L'énergie lumineuse est également utilisée. « La mécanochemie est un mode d'activation assez nouveau, il y a beaucoup de choses à découvrir dans ce domaine », se réjouit Vincent Corcé, chercheur au Collège de France.

## Une vie consacrée au travail

Cette découverte n'est pas la première à mettre au crédit de Véronique Gouverneur et, surtout, ne doit rien au hasard. Remontons le temps. D'une famille flamande, l'étudiante a choisi la chimie sans hésiter. « C'est une discipline intellectuellement stimulante, avec de très nombreuses applications, qui ont un impact bénéfique et direct pour la société », confie-t-elle. Après un postdoctorat aux États-Unis en 1992, elle passe quatre années à l'université Louis-Pasteur de Strasbourg (aujourd'hui Strasbourg-I) en tant que maîtresse de conférences. « Elle travaillait sur les anticorps catalytiques et j'étais thésard dans le même labo, se souvient Frédéric Taran. Mais c'est quand elle s'est mise à la chimie du fluor qu'elle a vraiment percé. »

Ne pas se reposer sur une voie toute tracée et changer de sujet est l'une des obsessions de Véronique Gouverneur. « Tout au long de ma carrière, j'ai veillé à rafraîchir régulièrement mon programme de recherche ; il a donc évolué constamment », explique-t-elle, en s'excusant de ne plus parler français après vingt-huit années à Oxford. Arrivée en 1998 comme chercheuse à l'université anglaise, elle en devient professeure en 2008 et, depuis 2022, titulaire de la chaire statutaire Waynflete de chimie.

Pourquoi s'être lancée sur le fluor sans expérience dans ce domaine ? « Je trouvais fascinant que la nature produise très peu de molécules fluorées, alors que l'activité humaine a développé une chimie du fluor très diversifiée pour des applications dans de multiples secteurs. De plus, personne ne travaillait sur le fluor à Oxford. » C'est l'élément le plus réactif et le plus électro-négatif existant, c'est-à-dire qu'un atome de fluor est plus attractif que tous les autres pour un électron. Ses recherches sur les procédés pour accrocher cet élément à différentes molécules sont aujourd'hui utilisées par l'industrie pharmaceutique, des engrais ou des polymères. L'anticholestérol Lipitor comporte ainsi du fluor, comme un quart des médicaments, pour ralentir sa dégradation dans l'organisme.

Mais dix ans ont passé, et Véronique Gouverneur a jeté son dévolu sur le fluor 18. La techni-



Véronique Gouverneur, au Chemistry Research Laboratory, à Oxford (Royaume-Uni), le 29 mai. RAPHAËL NEAL POUR « LE MONDE »

que, découverte à Oxford, pour marquer des molécules avec cet isotope radioactif à la durée de vie très courte a été une révolution dans la tomographie par émission de positons (TEP scan) pour le diagnostic ou le suivi de certains cancers ou de la maladie d'Alzheimer. C'est au titre de ces découvertes qu'elle recevra en 2024 la médaille Davy de la Royal Society, l'un des plus prestigieux prix internationaux de chimie. Henri Moissan la décrocha en 1896...

Portée par ses succès, cette femme ayant consacré sa vie au travail plaça en 2020 la barre un cran au-dessus et mit son équipe au défi de trouver une façon de produire du fluor sans passer par l'acide HF. « Quand on est entouré de doctorants et de postdoctorants très talentueux, il est de notre devoir de leur offrir un projet de recherche de pointe qui leur permet de se dépasser », relève-t-elle, aujourd'hui à la tête d'un groupe de plus de 25 chercheurs. On comprend sa réputation d'être particulièrement exigeante avec ses équipes. Une autre forme d'extraction de potentiel... sans acide.

Mais la plus belle découverte au laboratoire ne vaut que si elle peut être transposée dans la vie réelle, à l'échelle industrielle, et s'avère viable économiquement. Véronique Gouverneur a alors franchi le Rubicon et cofondé en 2022 une start-up avec Gabriele Pupo, l'un de ses postdoctorants et cosignataire du fameux papier dans *Science*. Pour commencer, Fluorok se consacre à une seule application : la production de LiPF<sub>6</sub>, un électrolyte très utilisé dans les batteries lithium-ion. « C'est une technologie unique au monde. Je vous laisse imaginer l'impact... », note-t-elle, prenant à 61 ans le ton modeste des jeunes start-uppeurs. Avec plus de 15 brevets à son actif, Véronique Gouverneur a compris depuis longtemps les lois du marché. Il arrive aussi que le récit s'emballer quand la chance rejoint la rigueur. L'imprévu s'est invité lors des expériences de mécanochemie : à l'issue du broyage du minerai, les chercheurs ont récupéré plus de fluor qu'attendu. Et cela, si les joints de la jarre de 15 millilitres étaient en Teflon, mais pas en caoutchouc... Le Teflon, un PFAS, ces polluants éternels dont la lettre F est celle du fluor, était donc dégradé par le procédé.

Cette découverte, publiée dans *Nature* en mars 2025, n'est pas la première à casser la liaison carbone-fluor, clé de l'éternité des

PFAS. Mais ici, le procédé ne nécessite aucun réactif polluant et, surtout, permet de récupérer le fluor et d'autres produits valorisables. Bref, une solution « propre », susceptible d'être compétitive face à l'incinération. Faut-il être surpris que le colloque « Innover par la chimie pour relever le défi des PFAS », organisé le 9 avril à la Maison de la chimie, à Paris, dont Véronique Gouverneur assurait la conférence de clôture, ait dû refuser du monde ?

## Ne pas s'imposer de barrières

Tout le monde n'est pourtant pas sensible à ces prouesses. « Je ne pense pas que ce type d'approche soit vraiment nécessaire, tranche Martin Scheringer, chimiste de l'environnement à l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse). La récupération du fluor pourrait aggraver les choses, et non les améliorer. En effet, l'une des principales utilisations du fluor n'est autre que la production de PFAS. Une critique rejetée par Véronique Gouverneur. Même si les auteurs de l'article de *Nature* soulignent, en conclusion, que leur solution « contribue à la circularité de l'industrie des produits chimiques fluorés », après avoir noté que le minerai dont est extrait le fluor est « classé comme critique par l'Union européenne ».

Aussi plaide-t-elle pour « un bannissement des PFAS toxiques et non essentiels, ceux qui ne sont pas nécessaires pour préserver la santé humaine ou permettre la transition énergétique ». Estimant « indispensable d'entretenir des liens avec l'industrie si l'on veut se confronter à la réalité du terrain », elle affirme que « personne ne cherche à produire un produit chimique qui serait inutile et toxique ». Ne pas toujours voir le monde qui l'entoure serait-il une force ? Quant au sexisme, elle dit ne pas y avoir été confrontée au cours de sa carrière... ou ne pas y avoir prêté attention. Ne pas s'imposer de barrières, comme pour le prochain défi qu'elle compte lancer : se passer du difluor, un autre gaz toxique, dans les procédés industriels. « C'est un objectif ambitieux, et mon temps est limité. Je pose une question que d'autres résoudreont peut-être. » Elle espère que des jeunes s'intéresseront aux sciences et à la chimie et « connaîtront le frisson incomparable de faire une découverte ». « La société actuelle en a besoin », observe-t-elle. ■

JEAN-BAPTISTE JACQUIN

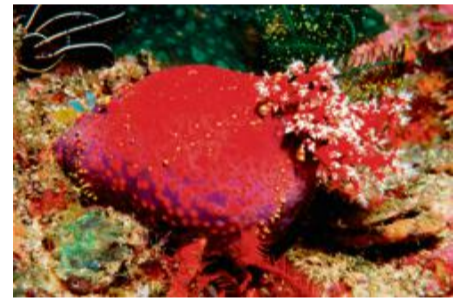


## ZOOLOGIE

### Immortel concombre de mer

La pénicilline, les rayons X, le four à micro-ondes... Au rayon des découvertes accidentelles, faudra-t-il ajouter la vie éternelle, et accorder au concombre de mer un rôle central dans cette prouesse ? Difficile de ne pas se poser la question après la lecture de l'article publié mercredi 27 mai par une équipe américano-canadienne dans la revue *Science Advances*. Les chercheurs y décrivent comment des fragments détachés du pied ou d'un tentacule de l'animal peuvent survivre et se développer pendant plusieurs années dans l'eau de mer. Si certaines étoiles de mer parviennent à se reconstituer à partir d'un de leurs bras, c'est la première fois que de si petites portions d'un animal restent vivantes, et même croissent.

C'est lors d'une inspection d'un aquarium dans lequel étaient conservés des spécimens de l'espèce *Psolus fabricii* que les chercheurs ont fait les premières observations. « Après plusieurs semaines, les tissus ne s'étaient pas décomposés », raconte Sara Jobson, étudiante en thèse à l'université Memorial de Terre-Neuve (Canada), première signataire de l'article. « Nous avons eu du mal à y croire. Nous avons donc répété l'opération pour être sûrs que c'était vrai. Et nous avons conservé ces fragments de plus en plus longtemps. »



Une holothurie écarlate, dans le parc de Komodo, en Indonésie. ULLSTEIN BILD VIA GETTY IMAGES

Pour être précis, les fragments se conservent tout seuls. Aucune stérilisation ni aucun enrichissement du milieu ne semble nécessaire à leur survie. Une analyse détaillée a permis à l'équipe du laboratoire de la chercheuse en biologie marine Annie Mercier de constater que, après l'extraction d'un fragment, les cellules s'y diversifient, le système immunitaire développe son activité et le tissu se réorganise. Ainsi, les cellules dégradées sont éliminées et la plaie est nettoyée, non pas seulement sur l'animal, mais sur le fragment. Les cellules saines vont pouvoir se multiplier. Autant d'activités qui nécessitent une source d'énergie. Aucun problème pour notre holothurie, le nom scientifique de cette famille comptant plus de 1200 espèces : le fragment la trouve dans les nutriments présents dans l'océan, qu'il absorbe et métabolise.

## « Projet zombie »

Sara Jobson admet être allée de surprise en surprise. « Chaque fois que nous pensions avoir atteint le sommet du bizarre, nous découvrons une nouvelle prouesse. La forme qui change, la couleur... Au bout d'un an, ces fragments semblaient venir de l'espace ou d'un monde subnatuel. Nous avons baptisé cette étude le « projet zombie ». » Chez les holothuries, la repousse de morceaux est bien documentée. Le phénomène a été décrit chez de nombreuses autres espèces, à commencer par la fameuse queue du lézard. « Sauf que, là, c'est comme si le lézard repoussait à partir de la queue », précise l'étudiante. Une blague ? « Nous n'avons pas d'éléments pour le dire, mais la croissance lente et progressive du fragment, son changement d'apparence, l'évolution de la proportion des types cellulaires – épiderme, tissu conjonctif, muscle – peuvent laisser penser qu'il se restructure pour mieux survivre en tant que nouvelle entité complète. »

« On a envie de savoir si d'autres concombres de mer font pareil, comment cette faculté est apparue, à quoi ça leur sert », réagit Frédéric Ducarme, chercheur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Le monde médical devrait lui aussi saliver. Régénérescence et lutte contre le vieillissement y sont des voies de recherche privilégiées. Or, les concombres de mer apparaissent assez éloignés pour sortir du viseur des comités d'éthique et des associations animalistes. « Il n'y aurait même pas besoin de sacrifier des individus pour collecter des tissus », ajoute la chercheuse. Alors, si nous parvenons à comprendre comment et pourquoi leur immortalité est possible, qui sait où cela peut nous mener ? Les zombies ont de beaux jours devant eux. ■

NATHANIEL HERZBERG