

Le choix s'est alors porté sur l'étude de deux types de matériaux prometteurs : les zéolithes d'une part, une famille de cristaux microporeux constitués d'aluminosilicates, et les MOF (*Metal Organic Framework*) d'autre part, des composés hybrides, à la fois minéraux et organiques.

Pourquoi ? Les zéolithes, d'abord : « Ces matériaux sont déjà utilisés pour épurer des gaz au niveau industriel, résistent assez bien aux conditions d'oxydation et d'irradiation et sont peu sensibles à la température », explique Laurent Cantrel. De plus des travaux pionniers menés aux États-Unis dans les années 1970 avaient montré que si on les enrichit en argent, ils peuvent piéger l'iode gazeux. Cette capacité d'adsorption tient à leur structure cristallographique : les zéolithes ont un squelette d'atomes de silicium et d'aluminium, que l'on peut enrichir en cations métalliques*. En effet, si l'on substitue un atome de silicium par un atome d'aluminium, on crée une charge négative que l'on peut compenser en ajoutant un cation, qui vient se fixer à ce squelette. De cette façon, en jouant sur le rapport silicium/aluminium, on dope le matériau en cations. Ce sont ces cations qui réagissent sélectivement avec l'iode gazeux. Dans le cas de l'argent, le cation (Ag^+) réagit avec l'iode de (I_2) ou de (CH_3I) pour former de l'iodure d'argent (AgI), qui restera fixé dans les pores de la structure.

TEST DANS LES CONDITIONS D'UN RÉACTEUR ACCIDENTÉ

Comment définir à la fois le type de zéolithe le plus adapté et le cation le plus performant dans les conditions de l'enceinte du réacteur accidenté ? Au début du projet en 2013, c'est donc à un ensemble de questions qu'il fallait répondre : l'argent est-il bien le meilleur cation ? Si oui quelle est la teneur en argent optimale pour un filtre efficace ? Le piégeage est-il pérenne ? Quelle est l'influence des autres gaz présents sur la capacité d'adsorption de ce matériau ?

Sous la direction de Laurent Cantrel et de Bruno Azambre de l'université de Lorraine, Mouheb Chebbi, aujourd'hui chercheur à

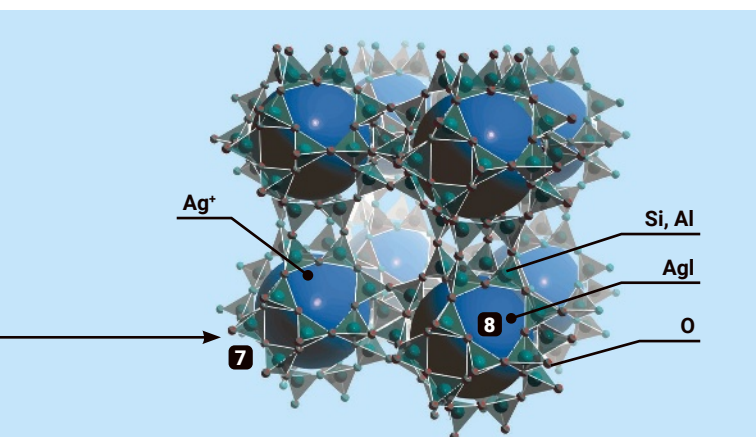
l'IRSN, démarrait alors sa thèse : « Nous avons commencé par explorer les performances de différents cations, comme le cuivre, l'argent, le plomb, etc. pour une structure de zéolithe donnée, en combinant des calculs de chimie théorique qui modélisent les interactions électroniques entre atomes et des analyses expérimentales. Les deux approches ont révélé parallèlement que l'argent (Ag^+) était bien le plus apte à capturer durablement l'iode des gaz I_2 et CH_3I , dans les conditions de température, d'humidité et d'irradiation d'un accident grave », explique-t-il.

Toujours dans le cadre du projet MIRE, les chercheurs ont ensuite testé expérimentalement et de manière systématique, pour une quinzaine de zéolithes différentes dopées à l'argent, les effets de structure, de texture et de la teneur en argent sur la capacité d'adsorption de l'iode ainsi que sur la stabilité des composés piégés. Résultat, la faujasite, une zéolithe à larges pores (voir infographie) s'est révélée le matériau le plus prometteur. Enrichie à hauteur de 20 % en argent, elle atteint les meilleures performances de rétention et de stabilité du stockage de l'ordre de plusieurs centaines de milligrammes d'iode capté par gramme d'adsorbant, dont 80 % sous forme de précipité AgI , très stable.

Puis, les équipes de Laurent Cantrel et de Céline Monsanglant-Louvet, de l'IRSN, ont confirmé les performances de ce matériau sur les bancs expérimentaux Safari et Persée de l'IRSN, dont les spécificités complémentaires permettent de couvrir les conditions particulières d'un accident (température, débit gazeux, humidité, nature du gaz, iode stable ou radioactif). Cette zéolithe est donc clairement un très bon candidat.

Quant aux MOF, la deuxième famille de matériaux investiguée, les recherches menées par l'équipe de Thierry Loiseau et Christophe Volklinger, de l'université de Lille, sont en cours. Cette piste reste à creuser.

D'ici à 2022, durant les deux dernières années du projet MIRE, des travaux complémentaires seront réalisés pour s'assurer que les résultats obtenus à l'échelle du laboratoire sont toujours valides dans des conditions propres à une mise en œuvre possible dans les réacteurs français. ■



LA FAUJASITE, PIÈGE À IODE RADIOACTIF

La zéolithe de type faujasite est un minéral de synthèse. La structure cristallographique d'aluminosilicates – un arrangement régulier de tétraèdres de $[(\text{SiAl})\text{O}_4]^-$ – qui forme sa charpente crée de nombreux espaces vides. Ces cages, symbolisées ici par les sphères bleues, constituent un réseau très poreux, capable de fixer sur un site particulier des cations, comme l'ion Ag^+ . Ce sont ces cations d'argent qui réagissent avec l'iode gazeux pour former de l'iodure d'argent, AgI . Ce dernier s'accumule alors à l'intérieur des pores bleus 8 et y reste stocké de manière pérenne.

NOTES

> Les cations métalliques sont des ions à charge positive, formés à partir d'atomes d'éléments métalliques ayant perdu un ou plusieurs électrons.

RÉFÉRENCES

> <https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Organisation/Programmes/projet-Mire/Pages/projet-Mire.aspx>

> BOSLAND L., COLOMBANI J., Study of the radiolytic decomposition of CsI and CdI_2 aerosols deposited on stainless steel, quartz and Epoxy painted surfaces, *Annals of Nuclear Energy*, 141, 107241 (2020).

> CHEBBI M., AZAMBRE B., CANTREL L., KOCH A., A Combined DRIFTS and DR-UV-Vis Spectroscopic in Situ Study on the Trapping of CH_3I by Silver-Exchanged Faujasite Zeolite, *Journal of Physical Chemistry C*, 120(33), 18694-18706 (2016).

> CHEBBI M., AZAMBRE B., Evaluation of Silver Zeolites Sorbents Toward Their Ability to Promote Stable CH_3I Storage as AgI Precipitates, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(30), 25194-25203 (2017).

> AZAMBRE B., CHEBBI M., LEROY O., CANTREL L., Effects of Zeolitic Parameters and Irradiation on the Retention Properties of Silver Zeolites Exposed to Molecular Iodine, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57, 1468-1479 (2018).

Des mathématiciens dans la Grande Guerre

Dans les années 1930, le groupe de mathématiciens Bourbaki a promu une vision abstraite et universelle de sa discipline en rupture avec celle de ses prédécesseurs. Le sacrifice de nombreux jeunes mathématiciens durant la Première Guerre mondiale a sans doute fortement contribué à ce revirement.

Le 11 novembre 1918, à 11 heures, prend effet l'Armistice signé entre les puissances belligérantes. Des Vosges à la mer du Nord, les canons et les mitrailleuses se taisent, les chars d'assaut s'arrêtent, les avions ne décollent plus, les gaz toxiques produits à grande échelle restent dans leurs cylindres, non sans avoir auparavant laissé dans le deuil des millions de familles qui ont sacrifié ce qu'elles avaient de plus cher, leurs jeunes. Dans ce terrible bilan de la Première Guerre mondiale, personne n'a été épargné, pas même «cette élite de chercheurs, de savants, d'écrivains qui, si vite, se sont révélés des chefs sous la mitraille», comme l'évoquait le mathématicien et homme d'État Paul Painlevé en 1916 dans un article intitulé *L'École normale supérieure et la guerre*. Dans cette guerre vite qualifiée de «scientifique», comment a-t-on pu consentir à ce massacre? Et quelles en ont été les conséquences sur les sciences d'après-guerre?

Jusqu'à récemment, la plupart des recherches historiques à propos des sciences pendant la Première Guerre mondiale ont porté sur la mobilisation des savoirs au service d'objectifs militaires. Cependant, en 2014, avec d'autres historiens des sciences, nous avons souligné dans l'ouvrage *The War of Guns* >



© Shutterstock.com/Everett Collection

L'ESSENTIEL

> L'École normale supérieure a payé un tribut particulièrement lourd durant la Première Guerre mondiale. Rien qu'en mathématiques, 22 normaliens agrégés ont été tués.

> Les récits construits à propos de ces jeunes gens ont contribué à forger la mémoire de ce conflit chez les savants.

> Deux visions contradictoires ont émergé : celle d'une science qui s'est mobilisée comme jamais pendant la guerre et celle d'une

science qui est restée à l'arrêt pendant plus de quatre ans.

> Juste après la guerre, un nouveau discours les a réconciliées en promouvant une science neutre et désintéressée.

> Dans les années 1930, en adoptant ce discours, le groupe de mathématiciens Bourbaki a contribué à faire des mathématiques la discipline pure et neutre qu'elle est encore aujourd'hui.

L'AUTEUR



DAVID AUBIN
professeur
d'histoire
des sciences
mathématiques
à Sorbonne
Université, à Paris



Durant la Première Guerre mondiale, les normaliens ont combattu au front comme les autres appelés, participant à la guerre des tranchées et aux grandes batailles comme celles de la Somme ou de Verdun (ici des soldats français durant cette dernière en avril-juin 1916).

> *and Mathematics*, à partir de divers cas internationaux, combien les savants – les mathématiciens en l’occurrence – ont joué différents rôles dans cette guerre «totale».

Les plus jeunes, d’abord, ont souvent servi dans l’armée et, pour plusieurs, sont morts sur le front. Certains, un peu plus âgés, ont pu utiliser leurs compétences mathématiques comme enseignants ou experts techniques. D’autres encore, tel le mathématicien Émile Borel, ont organisé la recherche militaire à des niveaux nationaux ou internationaux. Enfin, les plus âgés, comme Émile Picard, se sont souvent sentis investis d’une mission culturelle et se sont lancés dans une véritable croisade intellectuelle qui, si elle a d’abord eu pour objectif d’affirmer la supériorité des nations alliées, a aussi concerné la manière dont il faut comprendre le rôle des sciences dans les sociétés modernes. Pour Painlevé, par exemple, la guerre a été un «duel à la vie, à la mort [...] entre deux conceptions de la civilisation: il s’agissait de savoir si la science serait pour l’homme un moyen de libération et d’ennoblissement ou l’instrument de son esclavage.»

BOURBAKI, MARQUÉ PAR LA GUERRE

C’est peut-être dans ce contexte qu’il convient de comprendre, en France, l’émergence dans les années de l’entre-deux-guerres d’un groupe de mathématiciens, le collectif Bourbaki. Avec succès, ce groupe a promu une vision des mathématiques en rupture avec celle de leurs aînés. Là où ces derniers prenaient pour acquis la continuité entre sciences naturelles et mathématiques, les bourbakis comme Jean Dieudonné ou André Weil ont insisté sur l’as-

pect abstrait et universel de leur discipline.

Trop jeunes pour avoir combattu, ils appartenaient à une autre génération encore. Fréquentant l’École normale supérieure (ENS) de la rue d’Ulm, à Paris, au début des années 1920, ils ont parfois attribué à la guerre l’origine de leur conception originale des mathématiques: «Nous autres, les jeunes, se rappellera ainsi Weil, [...] nous aurions normalement dû avoir comme guides toutes ces promotions de jeunes mathématiciens dont certains, nous sommes sûrs, auraient donné beaucoup plus que des promesses, qui avaient été brutalement décimés et dont l’influence était donc détruite.»

Comme tout le monde, les mathématiciens se racontent des histoires qui sont le reflet de leurs expériences. Les récits des membres de Bourbaki attirent notre attention sur le cas de leurs prédécesseurs. Entre 1914 et 1918, 22 normaliens agrégés de mathématiques ont été déclarés morts pour la France, soit environ une promotion et demie de l’agrégation. À l’époque, la Société mathématique de France comportait 178 enseignants. La perte de 22 jeunes gens, sans compter les élèves qui n’ont pas eu le temps de compléter leurs études, est donc significative. Mais ces nombres seuls ne racontent pas d’histoire. Bien que par la suite, on n’ait guère retenu que ces nombres, ce sont les récits construits à propos des jeunes gens tués à la guerre qui ont – plus que les chiffres – contribué à forger la mémoire du conflit chez les savants.

Des recherches récentes tendent à montrer que les récits qu’offrent les bourbakis de leurs années de formation s’appuient en creux sur ceux qu’on a fait du triste destin des

L’École normale supérieure, rue d’Ulm, à Paris, vers 1900.



mathématiciens dont Weil déplore l'absence. C'est qu'il a fallu conférer du sens à la vie de ces scientifiques morts au combat avant d'avoir pu laisser des traces importantes dans les sciences. Et si ces récits avaient joué un rôle dans l'émergence d'une nouvelle conception des mathématiques, plus abstraites, plus facilement détachables d'un point de vue moral des usages militaires qu'elles reçoivent ?

PROFESSEUR DE MATHÉMATIQUES AU LYCÉE DU MANS

Revenons au jour de l'Armistice. À l'hôpital du Mont-Frenet, à La Cheppe (Marne), grièvement blessé, un jeune homme de 32 ans, autrefois professeur de mathématiques au lycée du Mans, se réjouit de la paix qui arrive : « Toutes ces bonnes nouvelles ragaillardissent », écrit-il à son épouse. Reçu à la fois à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure en 1906, Paul Viple a choisi la seconde alors qu'ils sont peu à le faire. Dans la notice nécrologique qu'il lui consacre en 1920 – et dont ce récit est tiré –, son ancien camarade de classe Maurice Gevrey évoque comment il avait ébloui tant ses camarades que ses professeurs par ses aptitudes intellectuelles : « Nous [...] faisons de longues séances au tableau, à la recherche de quelque problème d'agrégation, long... et parfois ennuyeux. Il avait, dans les calculs compliqués et ingrats, une patience et une sûreté qui nous émerveillaient et il fut bien souvent le seul à poursuivre jusqu'au bout une question que nous abandonnions – leçon très simple de conscience et de volonté qu'il nous donnait à tous. » En 1909, Viple passe l'agrégation de mathématiques. Suivent deux années de service militaire avant qu'il ne commence à enseigner à Paris. Bien qu'il soit agrégé, on lui assigne des classes de niveau inférieur, mais cela semble lui plaire : « J'aime les petits », aurait-il confié à un ami.

Entre-temps, Viple commence à travailler à une thèse de doctorat qui traite des équations fonctionnelles. On sait peu de chose de ce travail qui n'a jamais été publié sous quelque forme que ce soit. Il s'inscrit dans la grande tradition française de l'analyse mathématique, qui a alors atteint son apogée grâce à des figures comme Borel lui-même, mais aussi d'Henri Lebesgue et Maurice Fréchet, lesquels ont précédé Viple de peu à l'ENS.

À l'instar de nombre d'autres normaliens morts à la guerre, Viple laisse une marque plus profonde en tant que professeur. À partir des témoignages qu'il rassemble auprès de nombreux collègues et élèves, Gevrey brosse le tableau vivant du jeune professeur de mathématiques au lycée du Mans, celui d'un homme modeste, patient et, par-dessus tout, d'une grande dévotion envers ses élèves. Ainsi ce



En 1919, peu après la réouverture de l'École normale supérieure, les élèves ont lancé une souscription pour la construction d'un monument aux morts. Celui-ci, érigé en 1923, évoque dans ses bas-reliefs les dures conditions de vie sur le front, comme ici des mitrailleurs en action dans les tranchées.

Entre 1914 et 1918, 22 normaliens agrégés de mathématiques sont morts pour la France

témoignage d'un ancien élève : « C'était toujours avec cette entière simplicité, qui donne confiance à l'élève et ne le rebute pas, qu'il nous initiait aux sciences mathématiques et, toujours avec la même patience, il reprenait les théories, pour lui si claires, que nos esprits rebelles n'avaient point encore assimilées. »

En juillet 1914, Viple épouse une de ses amies d'enfance. Une vie de bonheur semble s'ouvrir à eux, poursuit Gevrey. La nouvelle de la mobilisation générale survient alors que le couple est en voyage de noces en Suisse. Pour beaucoup de normaliens, l'expérience de la guerre est brutale. Dès janvier 1915, l'ENS se rend compte de l'ampleur de la tragédie. Lors de la rencontre annuelle des anciens élèves, on rapporte que sur les 195 élèves actuels mobilisés, seul un peu plus du quart (soit 55 d'entre eux) est indemne après à peine cinq mois de guerre : 35 ont été tués ; 15 ont disparu ; 74 sont blessés ; 21 sont prisonniers ; 9 sont malades. ➤