



Intervention des équipes Enedis pour rétablir l'électricité dans les foyers à proximité de Quimper, après le passage de la tempête Zeus (mars 2017).

réseaux existants à condition qu'ils acceptent, quelques heures par an, de limiter leur production en cas de surcharge du réseau. Pour éviter le plus possible de se priver de ces énergies renouvelables, il faut affiner nos estimations et limiter les incertitudes. » Pour cela, on améliore la « granularité » du réseau, que l'on peut se représenter comme un ensemble de points de consommation en aval d'un poste source.

35 ANNÉES DE DONNÉES

Enedis dispose d'ores et déjà de trente-cinq années de données sur la consommation, ce qui permet de se faire une bonne idée des variations saisonnières. Mais si celle des gros producteurs (entreprises, industries...) est relativement facile à prévoir, celle des particuliers est plus erratique. On compte une cinquantaine d'applications de l'électricité dans un foyer (chauffage, TV, frigo, éclairage...), dont l'utilisation relève de la vie privée. Comment anticiper dans ces conditions ? Grâce aux corrélations. « Nous utilisons des modèles de type GAM (generalized additive model), explique Benoît Bouzigon. Cela

consiste à superposer les différents effets constitutifs du phénomène que nous cherchons à prévoir. Pour la consommation, il faut prendre en compte la météo (surtout la température), le jour de la semaine, les vacances ou un jour férié, et tout événement particulier, comme un match de football. Ensuite, vous établissez des corrélations entre ces différents paramètres et la consommation. »

ANTICIPER LES PERTES ÉLECTRIQUES

En plus de la production et de la consommation, un autre poste doit faire l'objet d'une estimation rigoureuse : les pertes électriques. « Une partie de l'électricité produite par les différentes sources disparaît via des pertes techniques dues aux phénomènes physiques que l'on ne peut pas éviter, notamment l'effet joule (échauffement qui se produit lors du passage du courant). Elles représentent 1 TWh par mois en moyenne, explique Audrey Lagache, prévisionniste à la division Bilan électrique et prévision d'Enedis. Il faut y ajouter les pertes non techniques, qui correspondent à du courant consommé mais non vendu à cause de fraudes, d'entreprises en faillite... »

Anticiper ces pertes est donc nécessaire pour que la consommation n'excède pas la production, ce qui mettrait le réseau en tension. « Pour éviter cela, nous achetons en permanence du courant auprès de divers producteurs, détaille Isabelle Jacob, qui dirige le département Bilan électrique et Marge brute d'acheminement d'Enedis. Mais ces achats se font heure par heure. Ce qui nous oblige à avoir des prévisions fiables à très court terme et à un pas de temps très fin. »

Les équipes chargées de compenser ces pertes sont donc amenées à développer leur propre outil de prévision. La prévision des pertes se fait à partir d'un polynôme de degré 2 (du type $ax^2 + bx + cy + d$), donnant les pertes en fonction de toute l'énergie injectée sur le réseau et de la production (variable x) et de la consommation des clients alimentés par de la moyenne tension sur le réseau (variable y). Le modèle

utilisé aujourd'hui par les prévisionnistes fournit un jeu de 4 coefficients (a, b, c, d), qui change selon la saison, les jours fériés. Cette présentation des pertes à l'aide d'un polynôme paraît simple... et c'est voulu. « La commission de régulation de l'énergie nous impose d'être transparents, rappelle Isabelle Jacob. Nous devons donc fournir une formule simple à comprendre à tous les acteurs de la production. Ce qui ne signifie pas qu'elle est simple à établir... »

En effet, pour prévoir les pertes, il faut donc prévoir les variables x et y du polynôme avec un excellent niveau de précision. Pour cela, on utilise une approche purement statistique, explique Audrey Lagache. « Nous cherchons à établir des corrélations entre divers facteurs (le plus important étant la météo) et les pertes mesurées, sans pour autant savoir comment ils sont reliés précisément. Pour cela, nous utilisons des algorithmes de machine learning et de l'intelligence artificielle qui vont permettre d'établir ces corrélations, qui peuvent être linéaires ou non linéaires et donc plus complexes. Ensuite, nous avons un gros travail de suivi quotidien des modèles pour guetter quand ils commencent à dériver et les corriger. » Autre aspect fondamental : la sélection des données en entrée des modèles de prévision. « Il y a potentiellement plusieurs centaines de variables disponibles. Il faut donc filtrer pour ne garder que ce qui est pertinent. Pour cela, nous utilisons nos connaissances métier, à savoir une connaissance approfondie des données récoltées sur la consommation et la production d'électricité en France pendant des décennies ainsi qu'une maîtrise poussée des méthodes statistiques de prévision. »

Le droit à l'erreur étant très mince, les prévisions de pertes sont régulièrement confrontées aux pertes effectivement constatées pour ajuster le modèle. Cette comparaison du « prévu » avec le « réalisé » constitue d'ailleurs une grande marge de progression. « Aujourd'hui, il faut attendre sept jours pour avoir un retour, souligne Audrey Lagache. C'est long pour corriger le modèle même si, en cas d'événement imprévu, comme une brutale vague de froid, nous pouvons modifier immédiatement le polynôme. À l'avenir, nous espérons avoir un retour à J+3 avec une optimisation des remontées d'informations du réseau. » Cet objectif nécessite de connaître en temps réel les données vitales du réseau jusque dans les endroits les plus reculés de tout le territoire, et de les centraliser. Un prochain défi ? ■

**Filtrer les données en entrée
les plus pertinentes
grâce aux connaissances métier**

L'ESSENTIEL

> Le gallium et certains de ses alliages sont des métaux qui restent à l'état liquide à température ambiante, comme le mercure.

> La surface du gallium liquide s'oxyde très vite et forme une couche de protection, propriété intéressante dans divers contextes.

> Les propriétés du gallium et de ses alliages, encore peu explorées et comprises, pourraient donner lieu à de nombreuses applications.

> Contrairement au mercure, le gallium est peu toxique.

L'AUTEUR



MICHAEL DICKEY
professeur au département de chimie et génie biomoléculaire de l'université d'État de la Caroline du Nord à Raleigh, aux États-Unis.

Le gallium un métal liquide d'avenir

Conducteur, étirable, autocicatrisant, façonnable à l'envi, sensible aux signaux tactiles... Le gallium se révèle très prometteur dans des domaines aussi variés que l'impression 3D, l'électronique moléculaire ou la production de capteurs ultrasensibles.

Quand on parle de «métal liquide», on pense tout de suite au mercure, celui des anciens thermomètres, interdits à la vente en Europe depuis plus de dix ans, et aux petites billes argentées et dangereuses qui s'en échappent quand ils se brisent, ou à celui des chapeliers fous, intoxiqués par cet élément aux XVIII^e et XIX^e siècles. On se rappelle aussi du méchant dans le film *Terminator 2*, personnage dont le rendu visuel était fondé sur ce même mercure. Autant dire que l'expression «métal liquide» a des connotations plutôt négatives... Mais tout espoir de bonne réputation n'est pas perdu pour les métaux liquides, grâce au gallium (Ga).

Cet élément métallique a en effet un point de fusion proche des températures ambiantes, sans être toxique comme le mercure. Dès 1871, le chimiste russe Dmitri Mendeleïev avait prédit son existence d'après l'emplacemement vide dans son tableau, et l'avait nommé eka-aluminium (car il est situé juste sous l'aluminium). Quatre ans plus tard, en 1875, le chimiste français Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran a confirmé l'hypothèse de Mendeleïev. Le mercure (Hg), pour sa

part, était déjà connu depuis plus d'un millénaire et on l'utilisait dans les thermomètres, les réactions électrochimiques et les plombages dentaires. Pourquoi ne pas avoir simplement remplacé le mercure toxique par du gallium?

En fait, ce dernier réagit vite avec l'oxygène: il se forme à sa surface une mince couche d'oxydation. La constitution d'oxydes en surface est un phénomène courant. Les métaux nobles tels que le platine et l'or sont de rares exemples de métaux qui ne s'oxydent pratiquement jamais. À l'inverse, le gallium, comme l'aluminium, s'oxyde presque instantanément (en quelques microsecondes dans l'air). Cette oxydation de surface est parfois un atout, car elle protège de l'oxydation le métal sous-jacent. Celle du gallium est cependant problématique pour les applications exigeant un métal qui s'écoule librement. Elle peut également entraver les réactions électrochimiques, et cela explique pourquoi les chimistes choisissent toujours le mercure plutôt que le gallium comme matériau d'électrode dans certaines expériences. Le gallium se corrode aussi dans l'eau, une des raisons pour lesquelles les dentistes ont longtemps continué à reboucher les caries avec des amalgames au mercure.

Malgré sa toxicité, le mercure n'est ainsi pas facile à remplacer. Depuis une dizaine d'années, cependant, le gallium et ses alliages liquides connaissent un regain d'intérêt, en raison d'un large éventail de propriétés que les chercheurs sont en train d'explorer.

IL FOND DANS LA MAIN

L'aspect le plus marquant du gallium est que ses propriétés électriques et thermiques sont celles d'un métal, et pourtant sa température de fusion est de seulement 30°C. Cette dernière est assez basse pour qu'il fonde au creux de la main. Une température susceptible d'être encore abaissée en y ajoutant d'autres métaux, tels que l'iridium ou l'étain. Les deux options les plus fréquentes sont l'alliage eutectique de gallium et d'indium, noté EGaIn («eutectique» qualifie un mélange de corps purs qui fond et se solidifie à température constante et de façon uniforme), et l'alliage eutectique de gallium, d'indium et d'étain, le Galinstan.

En théorie, les points de fusion et de solidification d'un matériau donné devraient être identiques. On pourrait donc s'attendre à ce que le gallium et ses alliages se solidifient quand la température passe sous le point de fusion. Toutefois, les liquides ont tendance à rester en surfusion, ce qui signifie qu'ils se

solidifient à des températures bien inférieures à leur point de fusion. L'expérience peut être menée avec une bouteille d'eau minérale au congélateur, où elle peut subsister à l'état liquide malgré la température bien en dessous de 0°C, mais la moindre perturbation déclenche le changement de phase de cet état métastable. De même, une fois fondus, le gallium et nombre de ses alliages restent liquides à température ambiante et au-dessous. Par exemple, pendant des mois, des chercheurs de mon laboratoire ont conservé du EGaIn liquide dans un congélateur à -15°C, soit 30°C de moins que le point de fusion du matériau. Il ne s'est pas encore solidifié.

Autre point commun avec l'eau, le gallium est l'un des rares matériaux qui se dilatent en se solidifiant. Il devient aussi meilleur conducteur électrique dans son état liquide, ce qui est également inhabituel pour un métal.

À température ambiante, le gallium a une pression partielle de vapeur (la pression due à la vapeur que le liquide dégage) nulle. Alors que l'eau, l'éthanol et d'autres liquides familiers s'évaporent dans les conditions ambiantes, ce n'est pas du tout le cas du gallium. Cela signifie que cet élément est manipulable sans masque, sans risque d'inhalation. En fait, il faut le chauffer au-dessus de 2400°C pour qu'il commence à bouillir. Et il

À température ambiante, le gallium est liquide. Une propriété rare pour un métal.

