

> en faible quantité. Mais cette pratique, si elle se développe, devra toutefois prendre en compte les populations à risque que représentent notamment les consommateurs réguliers de cannabis, susceptibles d'être pris en charge pour le traitement de douleurs. En effet, du fait de la synergie entre les deux systèmes, opioïde et cannabinoïde, il est nécessaire de leur prescrire des doses plus élevées de morphine pour obtenir un effet antalgique, leurs récepteurs cannabinoïdes étant saturés, voire désensibilisés.

Autre avantage de ce couplage : les systèmes cannabinoïdes et opioïdes jouent également un rôle dans la régulation de l'humeur, les processus de récompense et le développement des addictions. En effet, les deux familles de récepteurs sont aussi exprimées dans tout le circuit cérébral de la récompense qui met notamment en jeu la dopamine, le neurotransmetteur souvent associé au plaisir et aux addictions. Mais l'on ne sait pas encore très bien comment les cannabinoïdes et opioïdes modulent ce circuit de la récompense. Une meilleure compréhension des interactions entre ces deux systèmes devrait permettre de développer de nouvelles stratégies pour le traitement des patients dépendants à diverses substances.

Qu'en est-il du récepteur CB₂ ? Il a été initialement décrit comme un récepteur périphérique, exprimé par les cellules du système immunitaire, notamment les macrophages et les mastocytes, dans lesquelles on trouve tout de même des récepteurs CB₁. Mais pour les défenses immunitaires, ce serait le CB₂ qui jouerait un rôle important : au cours de l'inflammation, des cannabinoïdes endogènes, différents des deux décrits précédemment, sont libérés dans les tissus « enflammés » et réduisent l'hyperalgésie inflammatoire en diminuant l'activation des mastocytes et la libération des médiateurs de l'inflammation (comme la sérotonine et l'histamine).

LE THC EST AUSSI UN ANTI-INFLAMMATOIRE

De même pour le THC. Diverses études scientifiques ont montré que le cannabis jouerait aussi un rôle anti-inflammatoire par son action sur le système immunitaire, *via* les récepteurs CB₂, ce qui représenterait un intérêt clinique important si ces résultats venaient à être confirmés. En particulier, les activités anti-inflammatoires potentielles des cannabinoïdes, associées au fait que ces molécules inhibent aussi la motilité et la sécrétion intestinales, suggèrent leur utilisation dans le traitement des maladies inflammatoires chroniques du tube digestif, comme la maladie de Crohn ou les colites ulcéraires.

Par ailleurs, dans les années 2000, plusieurs travaux ont mis en évidence une expression faible mais significative du récepteur CB₂

Les études sur le cannabis et ses dérivés plaident en faveur de leur utilisation thérapeutique

dans certaines structures cérébrales, comme le striatum, l'hippocampe, le thalamus et l'aire tegmentale ventrale. Peu de données sont disponibles concernant la possibilité d'une fonction centrale des récepteurs CB₂, mais certaines laissent envisager un rôle positif dans les addictions, en particulier dans les effets associés à la cocaïne, la nicotine et l'alcool (l'éthanol).

Enfin, une nouvelle voie de recherche s'est ouverte à la fin des années 2000 avec la découverte que les endocannabinoïdes, comme l'anandamide, se fixent sur d'autres types de récepteurs, nommés PPARs (*peroxisome proliferator activated receptors*), dont la principale fonction est de stimuler la différenciation cellulaire et le métabolisme lipidique. Par ce biais, l'anandamide intervient à nouveau dans l'inflammation, mais il participerait aussi à la neuroprotection (dans la maladie d'Alzheimer, la sclérose en plaques, l'épilepsie...) et améliorerait la mémorisation, par des mécanismes de plasticité cérébrale, dans lesquels de nouveaux neurones ou de nouvelles connexions neuronales apparaissent.

Les multiples études effectuées avec le cannabis et ses dérivés ne mettent pas toujours en évidence des effets puissants, quel que soit le symptôme étudié, en particulier la douleur, mais plaident fortement en faveur de leur utilisation, car ils améliorent réellement l'état général des patients, leur qualité de vie et leur bien-être, pour diverses pathologies : les douleurs chroniques en premier lieu et divers syndromes chroniques, comme les cancers, les épilepsies, le sida et la sclérose en plaques. Avec le lancement de l'expérimentation française, d'ici quelques mois, nous aurons des retours sur l'utilisation du cannabis thérapeutique dans ces différentes maladies, et nous le validerons, certainement, comme traitement, au moins antidouleur. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. E. O'Sullivan, **An update on PPAR activation by cannabinoids**, *Brit. J. Pharmacol.*, vol. 173, pp. 1899-1910, 2016.

B. Roques et al., **Inhibiting the breakdown of endogenous opioids and cannabinoids to alleviate pain**, *Nat. Rev. Drug. Discov.*, vol. 11, pp. 292-310, 2012.

D. Cichewicz, **Synergistic interactions between cannabinoid and opioid analgesics**, *Life Sci.*, vol. 74, pp. 1317-1324, 2004.

J. D. Richardson et al., **Cannabinoids reduce hyperalgesia and inflammation via interaction with peripheral CB1 receptors**, *Pain*, vol. 75, pp. 1111-1119, 1998.

I. D. Meng et al., **An analgesia circuit activated by cannabinoids**, *Nature*, vol. 395, pp. 381-383, 1998.

S. Munro et al., **Molecular characterization of a peripheral receptor for cannabinoids**, *Nature*, vol. 365, pp. 61-65, 1993.

R. Mechoulam, **Marihuana chemistry**, *Science*, vol. 168, pp. 1159-1166, 1970.

Optimiser la conduite du réseau électrique grâce à l'intelligence artificielle

Comment maintenir une bonne continuité de la distribution d'électricité tout en intégrant les nouvelles productions décentralisées d'énergies renouvelables ? En développant des outils d'intelligence artificielle afin de piloter le réseau de manière plus dynamique.

En France, Enedis distribue de l'électricité à 37 millions de clients, repartis sur 95 % du territoire, avec des priorités évidentes : continuité et qualité. Un enjeu pour l'entreprise qui doit faire face aux tempêtes, aux chutes de branches et jusqu'aux câbles souterrains sectionnés lors de travaux... Des incidents aux conséquences d'autant plus importantes s'ils se produisent sur les 650 000 kilomètres du réseau de moyenne tension (HTA), qui desservent davantage de clients que les lignes de basse tension (BT) en aval. En 2019, la durée moyenne d'une coupure non planifiée atteignait 50 minutes environ, sachant qu'un client en subit une tous les quatre ans. Soit un taux de continuité de 99,99 %. « C'est un bon résultat, d'autant que ces chiffres sont en progression d'année en année, constate Pierre Mallet, directeur R&D et Innovation chez Enedis. Il n'empêche que nous cherchons toujours à réduire la fréquence et la durée des coupures.

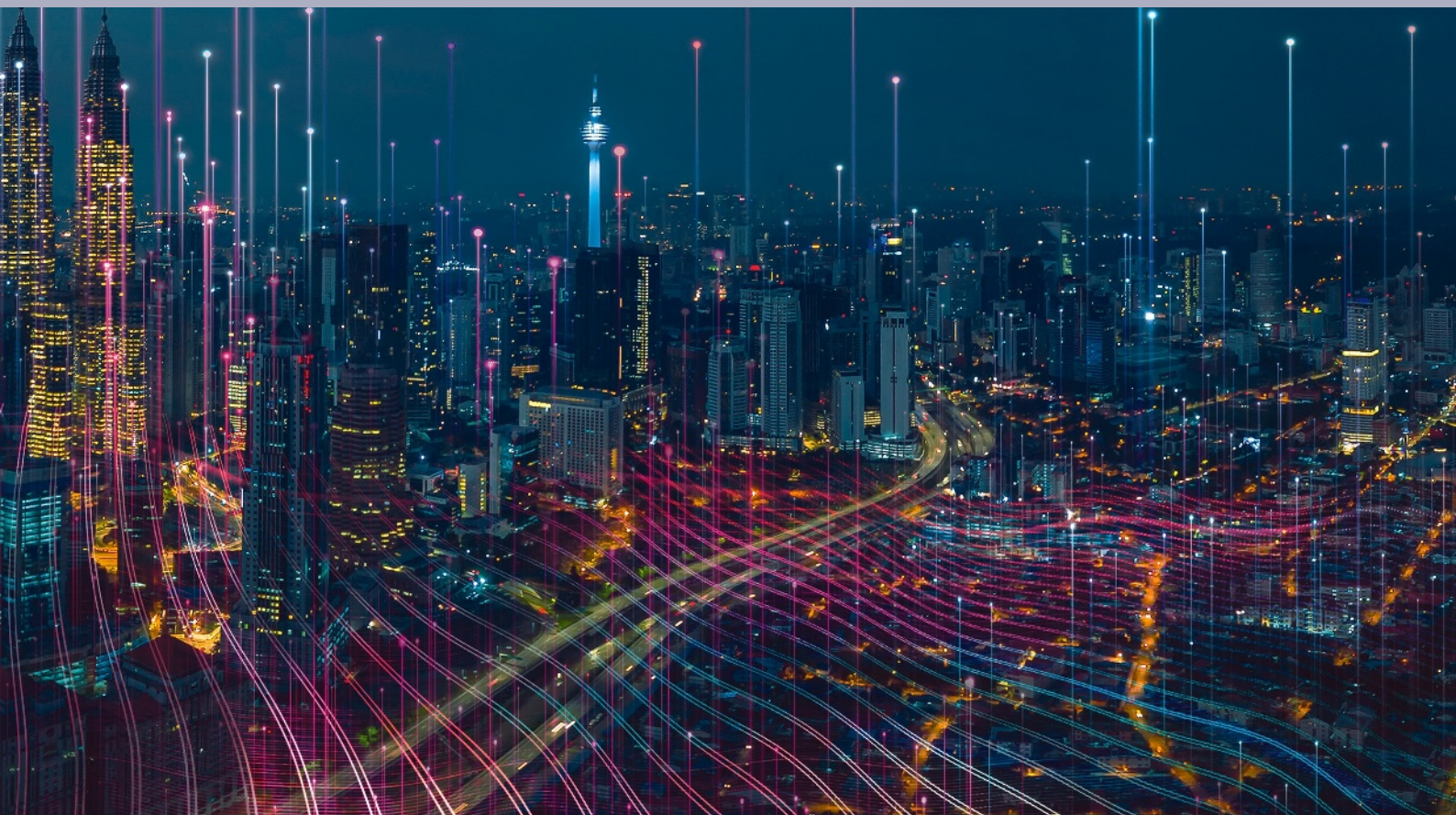
Lorsqu'une panne survient, il faut d'abord la localiser, puis la circonscrire afin de limiter le nombre de clients touchés. Tout cela le plus rapidement possible. L'intelligence artificielle offre des solutions allant de l'autocicatrisation du réseau jusqu'à l'utilisation des énergies d'origine renouvelable afin de limiter l'impact de ces coupures. »

RÉTABLIR LE COURANT, UNE PRIORITÉ

Pour comprendre comment ces solutions sont mises en œuvre, remontons à l'origine d'une coupure. Les lignes HTA se composent de trois câbles, portant chacun une phase (d'où le « courant triphasé »). « Si la chute d'une branche fait se toucher deux câbles, alors le potentiel des phases s'égalise et un fort courant dit de "défaut" apparaît dans les conducteurs, explique Benoît Bouzigon, chef de projets au département Conduite d'Enedis. Il est repéré par des protections du réseau, des

disjoncteurs, qui mettent automatiquement hors tension la zone où le défaut est apparu. Souvent, cela suffit à résoudre le problème. Une branche, par exemple, est retenue par l'arc électrique qu'elle a généré en faisant se toucher les fils. Sitôt que le courant est coupé, elle tombe et les libère. On réalimente alors le réseau. En revanche, si le défaut persiste, le processus d'autocicatrisation se déclenche. »

De quoi s'agit-il ? D'abord rétablir le courant chez le plus grand nombre de clients, tout en isolant le tronçon endommagé. « Cette tâche a été entièrement automatisée en trois étapes, décrit Benoît Bouzigon. D'abord, il faut estimer la nature du défaut. Vérifier par exemple qu'il ne vient pas d'un transformateur défectueux situé dans un poste source, où le courant haute tension est transformé en moyenne tension. » Si le défaut est bien situé sur une ligne, une deuxième étape de localisation se lance automatiquement grâce à des détecteurs installés dans les postes sources et en



divers points du réseau filaire. Ces détecteurs indiquent seulement si le défaut est en aval ou en amont. Cela suffit toutefois à localiser la panne. « Un algorithme télécommande alors les interrupteurs et disjoncteurs afin d'isoler ce tronçon, reprend Benoît Bouzigon. La troisième étape consiste à remettre le courant sur les tronçons sains. L'ensemble prend moins de trois minutes. »

C'est alors que le technicien reprend la main. Il analyse la portion en défaut. Actionnant des interrupteurs et disjoncteurs manuellement, il réduit encore la zone hors alimentation et rétablit le courant autour, avant de déclencher l'intervention des équipes pour la réparation sur le terrain.

L'OPTION DU MICROGRID

Pour diminuer encore l'étendue des zones privées de courant, Enedis développe une solution innovante: recourir aux énergies renouvelables (ENR), éoliennes et panneaux solaires. Ces productions sont nécessairement décentralisées. Elles permettent ainsi d'agir de façon « chirurgicale ». Par exemple en alimentant quelques pâtés de maisons en amont ou en aval de la coupure, sans toucher au tronçon endom-

magé. Mais cela nécessite un réglage précis, car la production doit être à chaque instant adaptée à la consommation, afin d'assurer la stabilité du réseau et sa capacité à fournir une énergie de bonne qualité aux clients finaux.

Pour y parvenir, de nombreux paramètres entrent en jeu: les prévisions de consommation de la zone concernée, les moyens de production, et de stockage. C'est ce que l'on appelle du « microgrid » (microréseau), version miniature et autonome du réseau électrique hexagonal, actuellement en développement au sein de la R&D d'EDF et du G2Elab à Grenoble, sollicités par Enedis. « Il s'agit de

mettre au point un automate local capable de se substituer temporairement au réseau, résume Dominique Croteau, ingénieur-chercheur au département MIRE (Mesures et Systèmes d'information des Réseaux Électriques). Pour ce faire, il est nécessaire de recourir à des algorithmes d'intelligence artificielle. La difficulté consiste à identifier lesquels et à les adapter à nos besoins. Mais la problématique se rapproche de celle des pilotes automatiques d'avion ou des voitures autonomes. Nous cherchons donc de ce côté-là... » Ces travaux, démarrés en 2019, ont permis la mise au point d'un démonstrateur en cours d'évaluation en Corrèze. ►

**Pour limiter l'impact des coupures,
l'IA offre des solutions allant
de l'autocicatrisation à l'utilisation
des énergies renouvelables**

PLANIFIER LES OPÉRATIONS DE MAINTENANCE

La multiplication des productions électriques d'origine renouvelable sollicite les installations et engendre ainsi flux et reflux de puissance sur le réseau. La prévisibilité des transits devient plus difficile, notamment au niveau des départs, ces portions de câbles qui vont du poste source vers les clients. Cela complique la tâche des chargés de conduite qui doivent planifier les opérations de maintenance, depuis l'une des trente agences de conduite réparties sur le territoire. L'intelligence artificielle (IA) pourrait les aider. « L'idée consiste à l'utiliser afin de prévoir les parties du réseau qui pourraient être en difficulté,

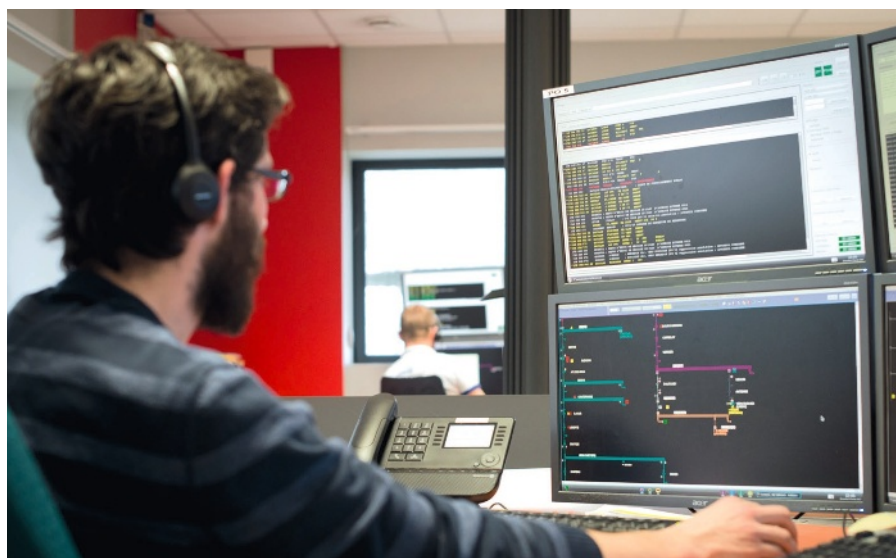
Automatiser les tâches répétitives pour se concentrer sur les situations qui sortent de l'épure

imagine Benoît Bouzigon. Pour cela, il faut commencer par identifier quelles sont les "constantes vitales" du réseau (tension, production, consommation, événements météo...). L'intelligence artificielle se chargera ensuite de suivre ces constantes et d'alerter le chargé de conduite si un incident se déclare en certains points du réseau... »

Dans cet esprit, mais à visée plus large, une thèse a débuté cette année à l'université

de Grenoble, financée par Enedis et co-encadrée par Vincent Debusschere, afin d'identifier les besoins des chargés de conduite et proposer des solutions pour les secondar, via l'IA. « Nous allons commencer par observer les tâches qu'ils effectuent et voir concrètement comment on peut les aider, explique le chercheur. Nous devons également faire l'inventaire des données du réseau accessibles : mesures de tension, caractéristiques des câbles, des transformateurs, le profil de charge... Il s'agit de faire feu de tout bois car

l'intelligence artificielle a besoin de beaucoup d'informations, diverses et sur un temps long, pour être entraînée. » L'objectif est ensuite de déterminer parmi les différentes techniques d'IA déjà existantes lesquelles sont adaptées à tel ou tel type de tâche. « Notre objectif est de soulager le plus possible le chargé de conduite, insiste Vincent Debusschere, par exemple en automatisant certaines tâches répétitives afin qu'il puisse se concentrer sur les événements les plus graves. Pour l'heure, nous n'en sommes qu'à l'identification des besoins. »



Une trentaine d'agences de conduite régionales couvrent le territoire (ici, l'ACR de Mérignac).

► L'apport de ces nouveaux producteurs d'énergies renouvelables dépasse bien entendu le simple cadre d'une alimentation de secours. Selon les intentions gouvernementales, synthétisées dans la programmation pluriannuelle de l'énergie, la part des ENR dans la production élec-trique française doit atteindre 40 % en 2030. Elle est aujourd'hui de 21,1 %. Ce qui représente 370 000 installations, produisant 20 gigawatts au total. « Bien sûr, il faut avant tout se réjouir de l'arrivée de cette énergie d'origine éolienne ou solaire, reprend Pierre Mallet. Mais par définition, leur production, dépendante de la météo, est intermittente. Nous devons donc intégrer ces nouveaux fournisseurs sans perturber le réseau. Un vrai défi ! D'autant plus qu'il nous faut surveiller le coût des solutions à mettre en œuvre, et donc limiter

le recours à un développement trop important du réseau. Le maître mot est plutôt l'optimisation du système. L'intelligence artificielle constitue un outil idéal pour y parvenir. »

GÉRER LES VARIATIONS DE TENSION

Enedis est engagé contractuellement à fournir une tension HTA de 20 000 volts, à 5 % près. Cette tension est obtenue dans les postes sources, via des transformateurs, à partir du courant haute tension dont RTE (Réseau de transport d'électricité) a la charge. Il alimente ensuite des départs HTA, qui eux-mêmes irriguent des postes HTA-BT, autrement dit la basse tension que l'on achemine chez les clients. Cependant, la tension dans le réseau varie : elle diminue avec la

distance au poste source. Mais elle peut aussi s'accroître si un producteur d'ENR est relié au réseau. Enfin, la consommation varie également tout au long de la journée en fonction de l'activité. Un quartier d'habitations connaîtra un pic de consommation le matin de 7 heures à 9 heures, tandis qu'une zone industrielle s'animerait plutôt à partir de 9 heures... Bref, en fonction des lieux qu'il dessert, chaque poste source va appliquer une tension de consigne légèrement différente des 20 000 volts, de telle sorte que la tension effective sur le réseau soit bien comprise dans la fourchette des $\pm 5\%$ de tolérance.

« Cette tension de consigne est fixée une bonne fois pour toutes pour chaque poste source, sauf gros travaux dans la zone, reprend Benoît Bouzigon. Elle permet de



L'apport d'électricité d'origine renouvelable est géré au sein des agences de conduite régionales (ici celle de Mérignac). Le recours à l'intelligence artificielle permettra d'utiliser au mieux cette production par nature variable.

rester dans les nuages, mais finalement sans finesse. Surtout, lorsqu'il y a trop de productions d'ENR, nous ne savons plus trouver une tension de consigne applicable toute l'année. D'où l'idée de passer d'une tension de consigne fixe à une tension dynamique, qui s'adapterait plusieurs fois par jour à l'état réel de la consommation et de la production. » Enedis a donc entrepris des actions R&D afin de mettre au point un algorithme capable de réaliser une telle tâche. Pour cela, un élément clé consiste à disposer en temps réel d'une image de la tension sur le réseau.

« Nous sommes partis d'un algorithme bien connu, un estimateur d'état, explique Dominique Croteau. Il a fallu l'adapter, car il est utilisé sur le réseau transport, qui est en boucle, et comporte de nombreux capteurs de tension et de puissance. Du fait de ces boucles, il y a de nombreuses redondances qui permettent à l'estimateur d'être très précis. Davantage même que les capteurs, dont il corrige les erreurs de mesure. » Il faut en effet bien distinguer le réseau de transport, à très haute tension, qui part des centrales vers les postes sources

où se trouvent les transformateurs HT-HTA, et le réseau distribution qui part de ces postes et va jusqu'au client. Cette configuration est en antenne en quelque sorte, avec un émetteur, le poste source et les récepteurs: les clients. « Dans ce cas, il n'y a pas de boucles, et donc moins de redondances, reprend Dominique Croteau. L'estimateur d'état n'a pas grand-chose à se mettre sous la dent. Notre but était donc de trouver des indicateurs de tension sur le réseau, sans multiplier les capteurs, ce qui coûterait trop cher. »

OPTIMISATION DE LA DISTRIBUTION

La solution est venue des fameux postes « HTA-BT ». On en compte près de 800 000 sur tout le territoire. De parfaits « indices », pourvu que l'on sache s'en servir... « En modélisant la courbe de charge d'un poste HTA-BT tout au long de l'année, nous nous sommes rendu compte que nous obtenions une très bonne estimation de la tension à ce nœud du réseau, raconte Dominique Croteau. Chaque poste constitue donc un point de mesure supplémentaire

pour nourrir l'estimateur d'état. Nous avons également ajouté des capteurs, en nombres limités. Au final, nous avons un profil de tension en chaque nœud du réseau à 1 % près de la réalité, remis à jour toutes les 10 minutes! »

Cette image est la clé d'une gestion dynamique du réseau. Sitôt qu'une anomalie en tension est détectée quelque part, par exemple un apport d'énergie dû à des panneaux photovoltaïques, un second algorithme se met en route pour recalculer instantanément la nouvelle tension de consigne à appliquer au poste source. « Grâce à cette optimisation de la distribution, reprend Benoît Bouzigon, nous gérons l'arrivée de nouveaux producteurs d'ENR en limitant le développement du réseau physique. Auparavant, nous pouvions être amenés à créer un départ depuis le poste source vers ce nouveau producteur, de façon à l'isoler du reste du réseau. Ce ne sera plus nécessairement le cas avec cette gestion dynamique ; l'intérêt économique est évident. »

Deux brevets ont déjà été déposés. La phase de test a commencé, dans deux postes sources situés dans les Pays de la Loire, un autre en Côte d'Azur et un quatrième en cours d'installation en région Bretagne. « Nous attendrons le retour d'expérience de ces quatre postes avant de décider un déploiement plus large, conclut Benoît Bouzigon. Par ailleurs, cette gestion dynamique n'a vocation à être utilisée que sur 10 à 30 % du territoire, là où les ENR sont très présentes. » Les leçons de ces expérimentations devraient être tirées à la fin de 2021. ●

La gestion dynamique du réseau permet de gérer l'arrivée des producteurs d'ENR en limitant le besoin d'infrastructures physiques

L'ESSENTIEL

> Les caldeiras sont de grandes dépressions qui se forment après l'effondrement du toit d'une grande chambre magmatique d'échelle kilométrique.

> Cet effondrement est contrôlé par la vidange de la chambre magmatique lors d'une grande éruption.

> Les effondrements de caldeira se produisent en plusieurs étapes.

> Ces étapes s'accompagnent de l'émission de trains d'ondes sismiques de très basses fréquences. Cela permet de prédire un effondrement avec plusieurs heures d'avance.

L'AUTEUR



FABRICE R. FONTAINE
volcanologue à l'observatoire
volcanologique et sismologique
de la Martinique, de l'IPGP,
à Saint-Pierre (auparavant en
poste au laboratoire GéoSciences
de l'université de La Réunion)

31 octobre 2006

Prédire l'effondrement des cratères volcaniques

Au cours des grandes éruptions, celles qui émettent des kilomètres cubes de matériaux, des ondes de très basses fréquences indiquent l'imminence de la formation d'une grande dépression – une caldeira – assez tôt pour prévenir les populations.