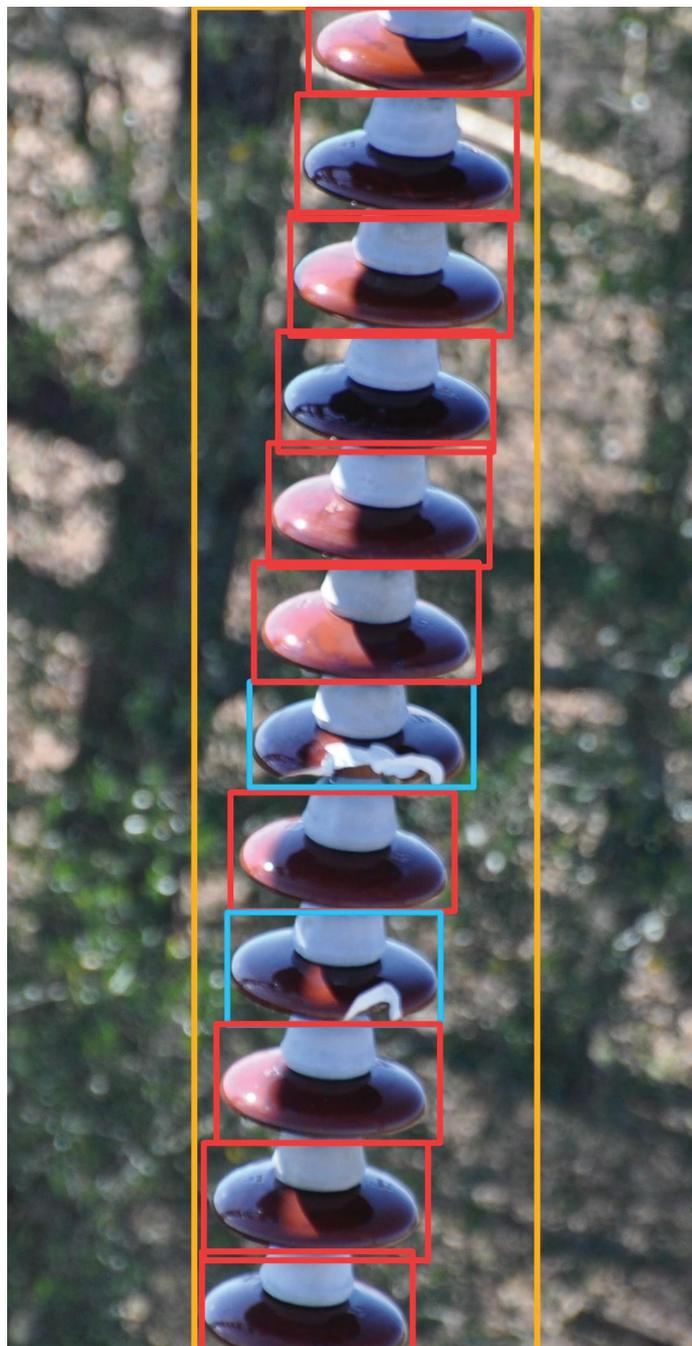


# MAINTENANCE PRÉDICTIVE DES COMPOSANTS

Les installations d'infrastructure, telles que le réseau électrique, sont régulièrement entretenues pour assurer un fonctionnement fiable. Pour cela, l'usure et les dommages doivent être détectés à temps. Une équipe de scientifiques de l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ) a étudié, en collaboration avec la société nationale d'exploitation du réseau Swissgrid, les possibilités de maintenance prédictive du réseau électrique. L'objectif est d'automatiser la détection et la classification des erreurs à l'aide de modèles d'apprentissage automatique.

Le réseau de transport d'électricité national constitue l'épine dorsale du réseau électrique suisse. Les lignes à haute tension transportent l'électricité depuis les grandes centrales électriques jusqu'aux réseaux de distribution à mailles fines dans les villes et les communes et garantissent l'échange d'électricité avec les pays voisins. 6700 km de lignes traversent le pays au bout de quelque 12 000 pylônes. Outre toutes les lignes, le réseau de transport d'électricité comprend également 147 appareillages de commutation.

Deux tiers du réseau de transport d'électricité suisse datent d'avant 1980. Swissgrid, l'exploitant du réseau à haute tension, entreprend chaque année 12 000 inspections afin de garantir une exploitation fiable du réseau. L'usure due au vieillissement n'est pas le seul facteur à mettre à mal les installations: la foudre, les tempêtes, la chaleur, les avalanches



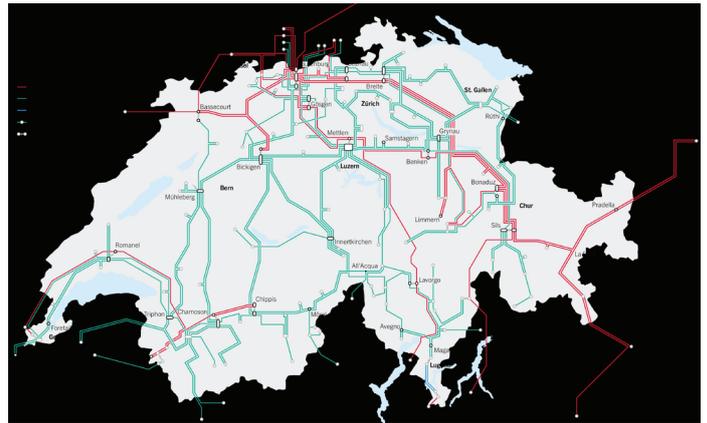
Les chercheurs de l'ETHZ ont notamment analysé des images de drones d'isolateurs prises par l'Electric Power Research Institute (EPRI) américain. Le programme de détection d'objets distingue l'isolateur entier (cadre jaune) des différents disques intacts (cadre orange) et des disques défectueux (cadre bleu). Photo: EPRI

et les coulées de boue sont autant de facteurs qui les fragilisent. L'entretien comprend notamment l'application d'une protection contre la corrosion, le remplacement d'isolateurs défectueux ou la rénovation de pylônes et de socles en béton défectueux, mais aussi l'élagage des arbres. « Les travaux à effectuer sont définis après des contrôles visuels qui ont lieu tous les ans », écrit Swissgrid sur son site Internet. En 2018, la société de réseau a reproduit l'ensemble des lignes et sous-stations dans un modèle numérique 3D sur la base de photos aériennes. Depuis, ce modèle aide à planifier les travaux de maintenance.

### Détection automatique des erreurs

Des chercheurs de l'ETHZ se sont demandés comment Swissgrid pourrait encore améliorer l'entretien du réseau de transport d'électricité dans le sens d'une maintenance prédictive. Dans ce contexte, « prédictive » signifie que les points problématiques du réseau sont détectés à temps et de manière automatisée. L'accent portait sur les lignes aériennes, les isolateurs et les transformateurs. « La maintenance prédictive a d'une part l'avantage de pouvoir détecter des problèmes inattendus, d'autre part les travaux de maintenance ne sont pas effectués sur réserve, ce qui permet d'économiser du personnel et de l'argent », explique Laya Das. Ce chercheur d'origine indienne, titulaire d'un doctorat, travaille au laboratoire « Reliability and Risk Engineering » de l'ETHZ, dirigé par le professeur Giovanni Sansavini. Le projet de recherche soutenu par l'OFEN s'est achevé fin 2023.

Une approche pour l'identification des défauts dans le réseau de transmission consistait à évaluer les images prises



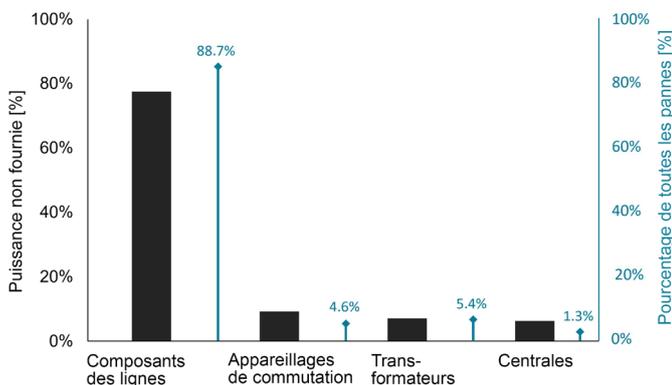
Le réseau de transport d'électricité suisse. Graphique: Swissgrid.

par des drones. Les images devaient permettre de détecter les isolateurs défectueux sur les pylônes à haute tension. La nouveauté: les traces de foudre ou les cassures sur les disques en céramique des isolateurs ne devaient pas être détectées par une analyse individuelle des photos, mais de manière automatisée par des programmes de reconnaissance d'objets préalablement entraînés à l'aide de modèles d'apprentissage automatique. Les chercheurs de l'ETHZ ont utilisé plus de 2000 images de drones de pylônes à haute tension de Suisse, des États-Unis et de Chine. Dans un premier temps, ils ont caractérisé les images. Ils ont ensuite entraîné un modèle d'apprentissage automatique à l'aide de YOLOv5 (You Only Look Once, Version 5). Le modèle de détection d'objet entraîné reconnaît l'isolateur sur n'importe quelle image et identifie le type de défaut (trace de foudre, rupture).

### Prêt à être utilisé sur le réseau

Dans le monde de la détection automatique d'objets, la précision d'un algorithme est exprimée par la « mean Average Precision » (mAP). Il s'agit d'un nombre qui peut prendre une valeur comprise entre 0 (non détecté) et 1 (détecté de manière fiable). Le programme « appris » par l'ETHZ détecte les disques isolants brisés avec une mAP de 0,77, les traces de foudre avec une mAP de 0,18. Les chercheurs attribuent la reconnaissance relativement mauvaise des traces de foudre au fait que l'on ne rencontre que peu de disques de ce type dans la réalité et qu'il y a donc trop peu d'images disponibles pour entraîner correctement l'algorithme de détection.

Afin d'améliorer la précision des prédictions, la détection d'objets a été complétée par une deuxième étape d'analyse qui aide à identifier les disques isolants défectueux. Pour ce faire, un processus de détection des anomalies, égale-



Les données du réseau de transport italien montrent que les lignes électriques et leurs composants sont à l'origine de la plupart des pannes d'électricité et sont responsables de la part la plus importante de la puissance non fournie aux consommateurs. En d'autres termes, ce sont leurs défaillances qui sont les plus fréquentes et qui ont le plus d'impact. Graphique : RRE Lab, ETHZ



La porcelaine brisée d'un isolateur à capot et tige, et sa caractérisation sont utilisées pour entraîner un modèle de détection d'anomalies. Photo: EPRI (à gauche) et RRE Lab, ETHZ (à droite)

ment basé sur l'apprentissage automatique, est mis en place. « Notre outil de détection d'objets pour trouver des isolateurs défectueux fonctionne bien et est prêt à être utilisé par les exploitants de réseaux à haute tension », explique Blazhe Gjorgiev, Macédonien d'origine, qui a participé au projet de l'ETHZ en tant que scientifique senior titulaire d'un doctorat.

### Essai avec une ligne aérienne tessinoise

Une bonne base de données est aussi la condition sine qua non d'une deuxième approche que les chercheurs de l'ETHZ ont étudiée pour détecter les erreurs dans les lignes de transmission. Dans ce cas, le point de départ n'est pas une photo prise par un drone, mais des valeurs de mesure à haute résolution. Cette étude était centrée sur une ligne aérienne de 220 kV d'un peu plus de 26 km, divisée en 26 segments, reliant Avegno (près de Locarno) à Gorduno (près de Bellinzone). Au début et à la fin, la ligne est équipée d'appareils de mesure modernes (Phasor Measurement Units/PMU) capables de mesurer la tension et le courant 8000 fois par seconde.

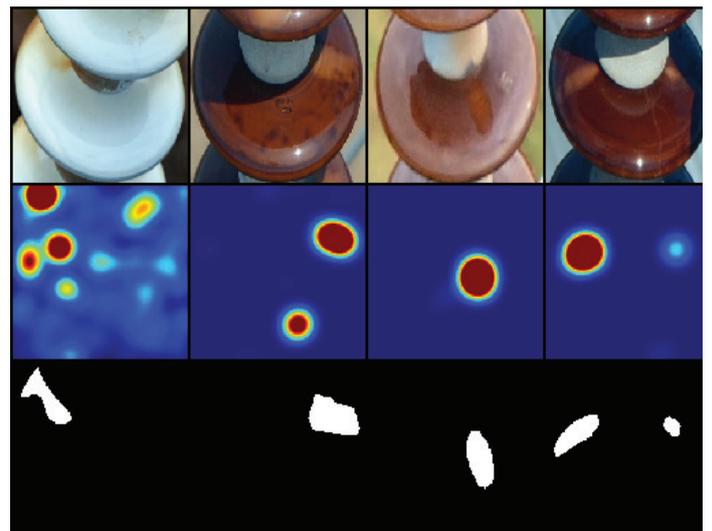
Les scientifiques ont alors voulu savoir s'il serait possible de déterminer, en comparant uniquement les valeurs de courant mesurées aux deux extrémités de la ligne, si des courants de fuite se produisaient et, le cas échéant, dans lequel des 26 segments de la ligne de 26 km de long. Cela indiquerait que les isolateurs sont défectueux.

### Manque de données sur le réseau défectueux

Pour parvenir à leurs fins, les chercheurs ont reproduit la ligne de transmission tessinoise à l'aide d'un modèle physique (jumeau numérique simplifié) en utilisant le logiciel MATLAB Simulink, lequel utilise, entre autres, la capacité, l'inductance et la résistance en tant que paramètres. Des données synthétiques (représentant des tronçons de ligne intacts et défectueux) ont été utilisées à cet effet. En cours de route, il a été possible de détecter et de localiser des isolateurs défectueux par le biais de courants de fuite, grâce à des simulations et à l'intégration de modèles d'apprentissage automatique. Ils y sont parvenus en utilisant trois modèles de machine lear-

ning (Feed forward neural network/FNN, Recursive neural network/RNN, Convolutional neural network/CNN) avec une qualité de prédiction de 98 pour cent et plus. Cela signifie qu'au moins 98 points défectueux sur 100 avec des courants de fuite sont détectés automatiquement.

Un résultat étonnant qui ne satisfait pas pour autant le chercheur de l'ETHZ Gjorgiev: « D'emblée, ce résultat semble formidable. Cependant, notre modèle ne convient pas encore pour une application pratique, car notre modèle physique se base sur les données d'un réseau électrique en fonctionnement ». Malheureusement, l'équipe du projet n'a pas pu inclure dans son étude des données de mesure provenant d'erreurs dans le réseau, explique Blazhe Gjorgiev. Par conséquent, l'équipe n'a pas eu la possibilité de valider si le modèle de localisation des erreurs était effectivement correct dans la pratique. La procédure fournit cependant la « preuve de concept » qu'une telle approche peut être utilisée pour le développement de modèles si les données sont suffisantes.



Le programme de détection d'anomalies FCDD détecte automatiquement les défauts des isolateurs à capot et tige: La rangée du milieu montre des images thermiques où les parties intactes sont représentées en bleu et les parties endommagées en rouge. La rangée inférieure montre la forme du dommage. Photo: EPRI (rangée du haut) et RRE Lab, ETHZ (rangées du milieu et du bas)

## Dépannage des transformateurs

L'équipe de projet de l'ETHZ a également étudié l'idée de la maintenance prédictive pour les transformateurs. Ces derniers sont techniquement plus complexes que les lignes aériennes et les isolateurs. Pour évaluer le bon fonctionnement des transformateurs, on utilise depuis de nombreuses années la méthode DGA (pour: Dissolved Gas Analysis ou Analyse des gaz dissous). Il s'agit d'une analyse chimique de l'huile qui joue le rôle d'isolant et de réfrigérant dans le transformateur. Les résidus de gaz déterminés permettent de tirer des conclusions sur les défauts thermiques et électriques du transformateur.

Ici aussi, les chercheurs de l'ETHZ visaient à automatiser la détection des erreurs en utilisant des modèles d'apprentissage automatique. Swissgrid et la Commission spécialisée pour les questions de haute tension (CSH) ont mis à disposition les données de plusieurs milliers d'échantillons DGA. Les scientifiques ont réussi à déterminer, grâce à une évaluation automatisée des échantillons sur la base de modèles statistiques (conventionnels) et de modèles d'apprentissage automatique, les échantillons DGA remarquables qui indiquent un défaut dans le transformateur, avec une précision estimée entre 70 et 90 %. Pour des raisons méthodologiques, les chercheurs doivent laisser ouverte la question de savoir si l'intégration de l'apprentissage automatique apporte effectivement un avantage dans ce domaine.

## Outil de planification pour les travaux de maintenance

Les chercheurs de l'ETHZ ont mis à la disposition de Swissgrid, partenaire du projet, trois outils comme résultat de leur projet: un modèle d'apprentissage en profondeur pour la détection d'isolateurs défectueux sur la base d'images prises par des drones; un algorithme qui aide à l'évaluation des données DGA pour les transformateurs; enfin, un modèle d'apprentissage automatique entraîné pour le diagnostic des défauts des transformateurs à partir des données DGA.

Selon Blaze Gjorgiev, chercheur à l'ETHZ, les dernières découvertes pourraient également être importantes pour les gestionnaires de réseaux de distribution suisses qui exploitent leurs propres réseaux à haute tension. En outre, les réseaux à moyenne et basse tension pourraient également bénéficier de méthodes d'apprentissage automatique avancées pour la



Les programmes de détection des défauts peuvent détecter les isolateurs, mais aussi les amortisseurs de vibrations (en vert) et les nids d'oiseaux (en jaune). Photo: Swissgrid

détection des erreurs, selon M. Gjorgiev. L'applicabilité des connaissances acquises dans le cadre de ce projet à des installations d'autres niveaux de tension doit encore être étudiée.

- Le **rapport final** du projet de recherche « IMAGE - Intelligent Maintenance of Transmission Grid Assets » est disponible à l'adresse suivante: [www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=48027](http://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=48027).
- Michael Moser ([michael.moser@bfe.admin.ch](mailto:michael.moser@bfe.admin.ch)), responsable du programme de recherche « réseaux » de l'OFEN communique des **informations** à ce sujet.
- Vous trouverez plus d'**articles spécialisés** concernant les projets pilotes, de démonstration et les projets phares dans le domaine de l'électricité sur [www.bfe.admin.ch/ec-electricite](http://www.bfe.admin.ch/ec-electricite).