

Jumeau numérique de réseaux de distribution

Optimisation de l'exploitation des données de réseaux | Les jumeaux numériques ont le potentiel de révolutionner la gestion des réseaux de distribution. Ces représentations virtuelles d'un système physique en temps réel intègrent et enrichissent les données de diverses sources: la plateforme TwinDiGrid permet ainsi de visualiser l'état du réseau, d'identifier les points critiques et de simuler les scénarios du futur.

M. BOZORG, N. FATEMI, C. MEIER, M. RAYATI, L. TOMASINI

Historiquement, les réseaux électriques conventionnels étaient conçus en adoptant une structure arborescente. Un nombre restreint de grandes centrales électriques pilotables, notamment hydrauliques et nucléaires en Suisse, générait la quasi-totalité de l'énergie électrique. L'énergie produite était ensuite distribuée à un vaste ensemble de consommateurs. Au niveau des réseaux de distribution, les flux de puissance étaient ainsi unidirectionnels et bien maîtrisés. L'exploitation du réseau était alors relativement simple. Elle ne demandait qu'un nombre limité d'appareils de mesure et de pilotage pour maintenir l'équilibre du réseau, tout en préservant son intégrité et en évitant les risques de surcharge.

De nos jours, la transition énergétique engendre une transformation profonde des réseaux électriques, complexifiant considérablement leur gestion. D'une part, l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables, telles que l'éolien et le solaire, entraîne une augmentation significative du nombre de producteurs d'électricité. Cette complexification est accentuée par les fluctuations de production liées à la variabilité des conditions météorologiques, souvent à l'échelle de la minute. D'autre part, la demande devient, elle aussi, de plus en plus imprévisible en raison de l'électrification croissante de la mobilité et du secteur du bâtiment, par le biais des bornes de recharge des véhicules électriques et des pompes à chaleur. La direction des flux de puis-

sance dans les réseaux n'est plus toujours garantie, et l'état global du réseau ne peut plus être aussi aisément modélisé.

Face à ces enjeux, les gestionnaires de réseaux de distribution (GRD) ont besoin d'outils leur offrant une image de leur réseau qui soit précise, exhaustive et régulièrement mise à jour. Ces outils sont déjà en place pour les réseaux de transport haute tension. Cependant, reproduire cette approche au niveau des réseaux de distribution de moyenne et basse tension reste ardu en raison de leur complexité et de leur dimension en termes de nombre d'équipements.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet TwinDiGrid, qui a pour objectif de développer un jumeau numérique pour les réseaux électriques de distribution [1].

Un jumeau numérique, qu'est-ce que c'est ?

Un jumeau numérique est une représentation virtuelle d'un système physique en temps réel. Il est construit sur la base de modèles numériques, alimentés par des données récoltées en temps réel. Le but est ainsi de reproduire le plus fidèlement possible le comportement et les interactions du système. Cela permet de réaliser des analyses approfondies et des prévisions précises dans l'objectif d'optimiser les prises de décisions pour la gestion du système.

En d'autres termes, les jumeaux numériques se distinguent des simulations et des algorithmes traditionnels d'analyse de données [2] par leur capacité à opérer en temps réel. Alors que ces derniers génèrent des résultats hors ligne, les jumeaux numériques produisent des résultats exploitables directement par le système.

Les défis techniques

Le déploiement d'un jumeau numérique dans les réseaux de distribution pose un certain nombre de défis techniques: l'un des principaux est la collecte de données provenant de sources hétérogènes telles que différents types de composants, d'appareils de mesure,

de moyens de communication et d'intervalles d'échantillonnage.

Ces données doivent ensuite être uniformisées, agrégées et validées avant de pouvoir être exploitées. Durant ce processus, il est impératif de tenir compte de l'évolution topologique du réseau, comprenant notamment l'état des interrupteurs et l'installation de nouveaux équipements. Pour cela, une compréhension approfondie des modèles physiques et des lois des réseaux électriques est essentielle.

Le projet TwinDiGrid

Dans le cadre de ce projet multidisciplinaire, une équipe constituée d'ingénieurs informaticiens et électriciens de la HEIG-VD (Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud) a développé, testé et validé un tel jumeau numérique¹. La plateforme TwinDiGrid modélise le réseau et s'ajuste en permanence grâce à des données récoltées en temps réel sur les éléments du réseau ainsi qu'à d'autres informations telles que les données météorologiques.

On distingue donc deux parties fondamentales: d'une part, les données brutes et, d'autre part, l'ensemble des processus qui, en accord avec les modèles physiques de réseaux, intègrent et valident ces données à intervalles régu-

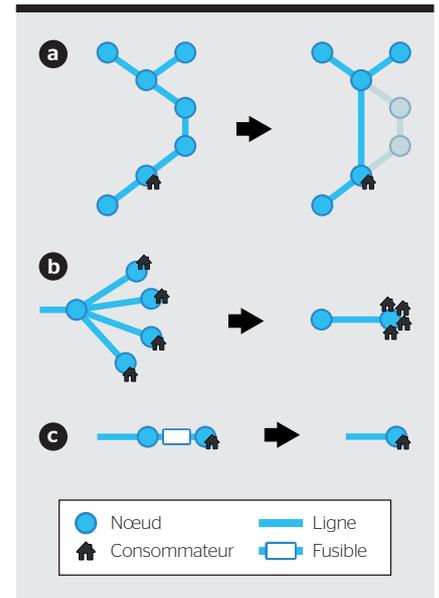


Figure 1 Exemples schématiques de certains des algorithmes d'agrégation implémentés : **a)** le regroupement des lignes en série, **b)** le regroupement des consommateurs connectés à un même point de réseau, et **c)** la suppression des fusibles connectés à un unique consommateur.

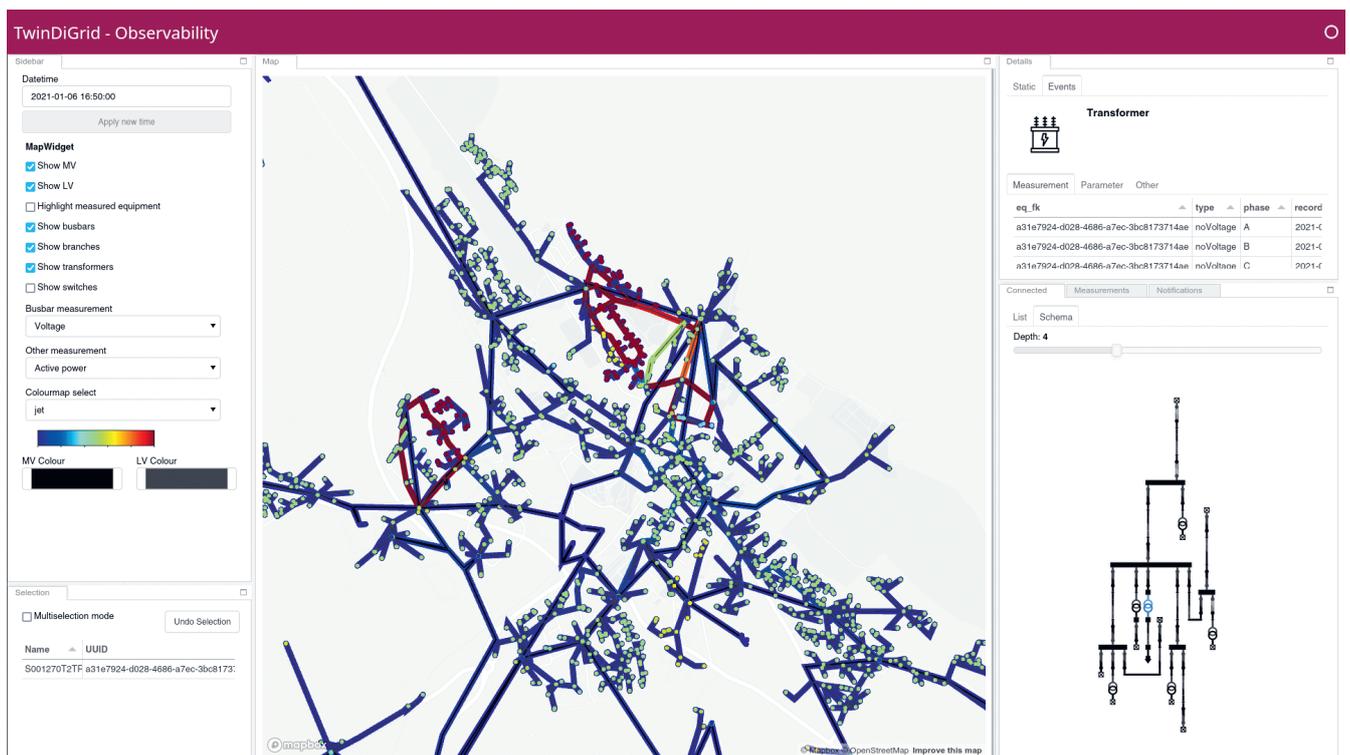


Figure 2 Plateforme de visualisation illustrant l'état du réseau en termes de flux de puissance par ligne ainsi que les tensions par nœud aux niveaux moyenne et basse tension.

liers. Le résultat est structuré selon un modèle de données spécifiquement conçu pour ce jumeau numérique.

Le modèle de données

Le modèle de données du jumeau numérique repose sur la spécification commune d'échange de modèle de réseau CGMES [3,4], développée par l'ENTSO-E [5]. Cette spécification vise à faciliter les échanges de données opérationnelles et de planification entre les gestionnaires de réseaux de transport et de distribution. Elle fournit un cadre complet permettant de représenter la plupart des équipements d'un réseau électrique. Toutefois, le jumeau numérique doit être capable d'accomplir diverses tâches dépassant les limites du cadre posé par la spécification CGMES. Ces tâches comprennent notamment :

- le stockage des profils de consommation et de production pour la planification à moyen et long terme ;
- le stockage des prévisions de consommation et de production à des fins de planification opérationnelle ;
- et l'enregistrement en temps réel des mesures au niveau du réseau.

Ainsi, c'est dans le but d'intégrer toutes les données non incluses dans la spécification CGMES que le modèle de données proposé pour la plateforme a été étendu.

Agrégation des équipements

Pour opérer en temps réel, le jumeau numérique doit pouvoir générer une image précise et validée dans un laps de temps restreint (par exemple, 15 min). La réduction de la taille du réseau modélisé contribue à diminuer le temps de calcul des processus. Dans cette optique, un ensemble d'algorithmes a été implémenté pour regrouper divers équipements du réseau. Ainsi, la modélisation du réseau se décline simultanément en deux couches d'abstraction distinctes: une couche physique qui facilite l'intégration en temps réel de nouvelles données, et une couche abstraite utilisée par les algorithmes de validation des données.

Ces algorithmes doivent garantir la conservation de toutes les informations essentielles. Ils doivent également maintenir la correspondance entre les données physiques du réseau et l'image abstraite qui en découle. Voici, à titre d'exemples, quelques-uns des algorithmes implémentés (figure 1) :

- le regroupement des lignes en série ;
- l'élimination des lignes dont l'impédance est nulle ;
- le regroupement des interrupteurs en série et/ou en parallèle ;
- le regroupement des consommateurs connectés à un même point de réseau ;

- ou encore, l'élimination des fusibles connectés à un unique consommateur.

Le modèle de données a en outre été conçu pour permettre l'ajout de couches d'abstraction supplémentaires, selon les besoins du GRD.

Validation des données

La qualité des données utilisées par la plateforme est évaluée par des algorithmes de validation. L'algorithme principal estime l'intégralité des flux de puissance et les niveaux de tension dans le réseau. Pour ce faire, il formule un problème d'optimisation mathématique qui se base sur les mesures disponibles, la topologie habituelle du réseau, l'état précédent des interrupteurs et les équations physiques régissant les réseaux électriques. Une solution optimale globale à ce problème est déterminée en continu.

Il convient de souligner que la précision et la qualité de la solution dépendent de divers facteurs tels que le nombre, l'emplacement et la précision des appareils de mesure. Enfin, pour compléter les données de production et de consommation manquantes, l'algorithme utilise un estimateur reposant sur l'intelligence artificielle. Cet estimateur tient compte des données histo-

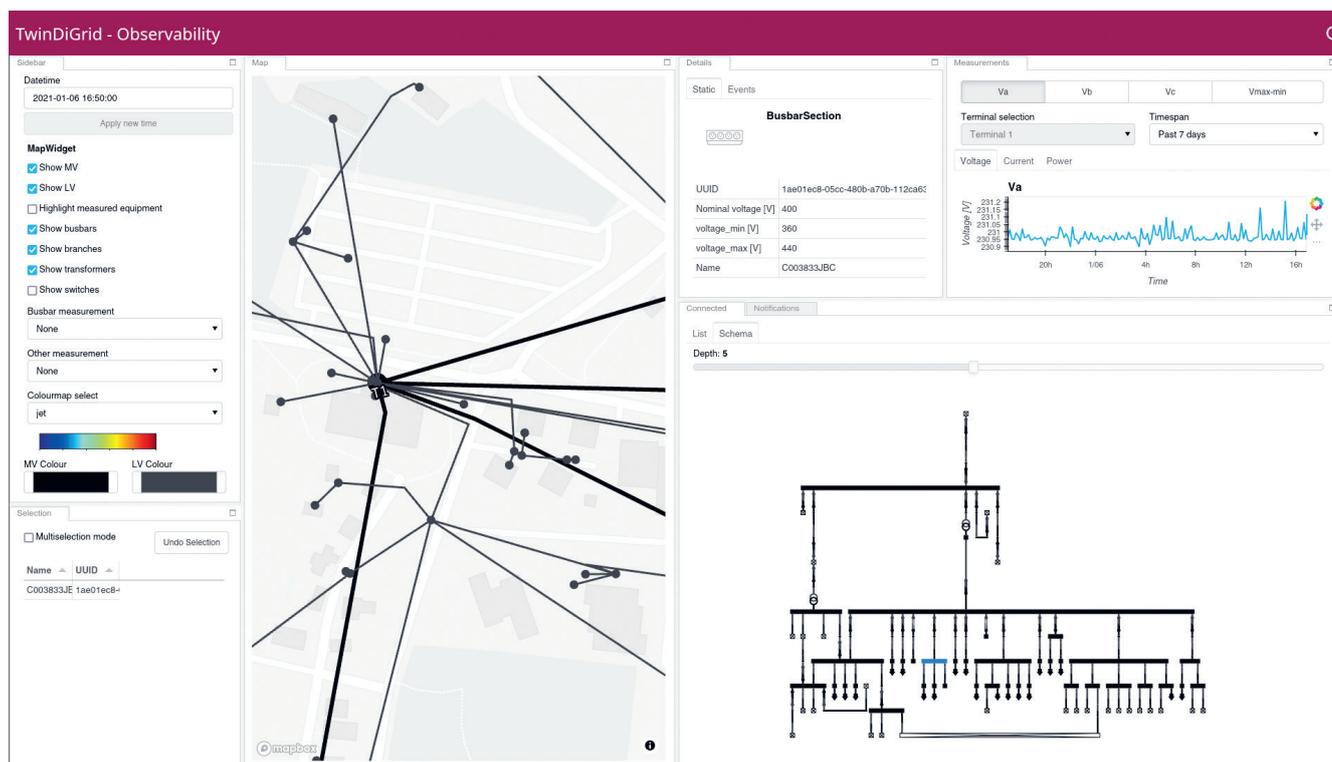


Figure 3 Plateforme de visualisation illustrant la liaison automatique entre le schéma électrique et la représentation géographique du réseau, ainsi que l'historique de mesure de tension sur une phase d'un composant sélectionné (en bleu).

riques de chaque équipement ainsi que des mesures en temps réel des équipements voisins.

Plateforme de visualisation

Afin de valoriser les résultats du projet, le prototype de jumeau numérique implémenté a été doté d'une plateforme de visualisation (figure 2). Ce prototype a été testé et évalué en utilisant des données réelles, provenant des GRD partenaires du projet tels que Groupe E, Romande Energie ainsi que les Services industriels de Lausanne (SIL) et de Genève (SIG).

La plateforme offre une représentation complète de l'état du réseau électrique, tant actuel que passé. Elle permet d'afficher sur une carte les mesures et les estimations de courant et de tension ainsi que l'état des interrupteurs. Elle facilite également l'identification des points critiques du réseau, en termes de surcharge et de tensions anormales, tout en permettant de suivre les évolutions temporelles de chaque mesure. De plus, elle établit une relation entre les données géographiques et la topologie du réseau, simplifiant ainsi la création automatique du schéma électrique (figure 3). Enfin, elle intègre les don-

nées statiques des équipements composant le réseau, comme les transformateurs ou les câbles, notamment.

Une version de démonstration comportant des données synthétisées et anonymisées est disponible [6]. Dans les projets futurs, qui débiteront dans les prochains mois, le prototype sera développé en un produit mature.

Cas d'application

Pour adapter la plateforme aux besoins et exigences des gestionnaires de réseaux de distribution, une série de discussions et d'entretiens a été menée avec les GRD partenaires du projet. Ces échanges ont mis en lumière diverses applications spécifiques pour lesquelles cette plateforme constituerait un élément clé. Il s'agit, notamment, de la prévision des congestions, la décomposition des charges, l'identification du type de charge, et l'estimation de la flexibilité disponible et requise pour une gestion fiable du réseau.

La plateforme peut également être utilisée pour planifier l'évolution du réseau, par exemple en simulant l'impact de nouvelles installations telles que les pompes à chaleur ou les stations de recharge pour véhicules électriques.

Références

- [1] TwinDiGrid - Une plateforme de jumeau numérique de réseau électrique de distribution. hes-so.ch/en/recherche-innovation/research-projects/detail-projet-recherche/twindigrid-une-plateforme-de-jumeau-numerique-de-reseau-electrique-de-distribution
- [2] M. Bozorg, N. Fatemi, C. Pena, O. Mousavi, M. Carpita, « L'intelligence artificielle au service des réseaux », Bulletin SEV/VSE 8/2020, p. 19-23, 2020. bulletin.ch/fr/news-detail/lintelligence-artificielle-au-service-des-reseaux.html
- [3] « Common Grid Model Exchange Standard (CGMES) Library », ENTSO-E. entsoe.eu/data/cim/cim-for-grid-models-exchange
- [4] Spécifications techniques IEC 61970-600-1:2021 et IEC 61970-600-2:2021.
- [5] European Network of Transmission System Operators for Electricity. www.entsoe.eu
- [6] twindigrid.heig-vd.ch

Auteurs

Prof. Dr **Mokhtar Bozorg** est professeur en énergie et réseaux électriques à la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD).
→ [HEIG-VD, 1401 Yverdon-les-Bains](mailto:HEIG-VD,1401Yverdon-les-Bains)
→ mokhtar.bozorg@heig-vd.ch

Prof. Dr **Nastaran Fatemi** est professeure en systèmes d'information et analyse des données big data à la HEIG-VD.
→ nastaran.fatemi@heig-vd.ch

Christopher Meier est collaborateur Ra&D à la HEIG-VD.
→ christopher.meier@heig-vd.ch

Dr **Mohammad Rayati** est chargé de Ra&D à la HEIG-VD.
→ mohammad.rayati@heig-vd.ch

Luca Tomasini est assistant HES académique à la HEIG-VD.
→ luca.tomasini@heig-vd.ch

¹⁾ Ce projet a été initié et réalisé en collaboration avec Depsys.



Digitaler Zwilling von Verteilnetzen

Netzwerkdaten besser nutzen

Die zunehmende Integration fluktuierender erneuerbarer Energieerzeugung sowie die Elektrifizierung der Mobilität und der Wärmeerzeugung führen zu einer tiefgreifenden Veränderung der Stromnetze, wodurch deren Betrieb erheblich komplexer wird. Die Verteilnetzbetreiber (VNB) benötigen daher Werkzeuge, die ihnen ein genaues, umfassendes und regelmässig aktualisiertes Bild ihres Netzes vermitteln. Für die Hochspannungsübertragungsnetze gibt es solche Werkzeuge bereits. Die Übertragung dieses Ansatzes auf die Mittel- und Niederspannungsnetze ist jedoch aufgrund der Komplexität und der Anzahl der Elemente schwierig.

In diesem Zusammenhang ist das Projekt TwinDiGrid zu sehen, dessen Ziel es ist, einen digitalen Zwilling für die Verteilnetze zu entwickeln. Die an der Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD) entwickelte Plattform modelliert das Stromnetz und passt sich dank der in Echtzeit gesammelten Daten der Netzelemente und anderer Informationen wie Wetterdaten laufend an. Sie bietet eine umfassende Darstellung des aktuellen Netzzustands und vergangener Netzzustände und ermöglicht es, Strom- und Spannungsmessungen und -schätzungen sowie den Zustand von Schaltern auf einer Karte anzuzei-

gen. Sie erleichtert auch die Identifizierung kritischer Punkte im Netz und ermöglicht es, die zeitlichen Entwicklungen der einzelnen Messungen zu verfolgen. Zudem verbindet sie die geografischen Daten mit der Netzwerktopologie und vereinfacht so die automatische Erstellung des Netzschemas. Schliesslich integriert sie die technischen Daten der Netzkomponenten wie Transformatoren und Kabeln. In den Gesprächen mit den am Projekt involvierten VNB wurden verschiedene Anwendungen identifiziert, für die diese Plattform ein Schlüsselement darstellen würde. Dazu gehören die Vorhersage von Engpässen, die Lastflussanalyse, die Identifizierung von Lasttypen und die Schätzung der verfügbaren und benötigten Flexibilität für ein zuverlässiges Netzmanagement. Zudem kann die Plattform auch zur Netzplanung genutzt werden, z. B. durch Simulation der Auswirkungen neuer Anlagen wie Wärmepumpen oder Ladestationen für Elektrofahrzeuge.

Der Prototyp des digitalen Zwillings wurde mithilfe echter Daten von den im Projekt involvierten VNB getestet und evaluiert. Eine Demoversion mit synthetisierten und anonymisierten Daten ist unter twindigrid.heig-vd.ch verfügbar.