

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 101 (2010)  
**Heft:** 4

**Artikel:** Gestion des réseaux électriques à grandes échelle  
**Autor:** Lalou, Moncef Justin / Affolter, Jean-François  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-856066>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 19.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Gestion des réseaux électriques à grande échelle

## Contrôle des flux de puissance d'un réseau électrique

La sécurité de l'approvisionnement en énergie électrique est un défi industriel du futur, aussi bien au niveau de la production que du transport et de la distribution. Dans ce contexte, la gestion du fonctionnement d'un réseau de plus en plus saturé est un enjeu majeur. Cet article présente une méthode de gestion optimale et en temps réel, des flux de puissance dans un réseau électrique équipé de Facts et de mesureurs de phase.

**Moncef Justin Lalou, Jean-François Affolter**

Les réseaux électriques doivent faire face à de nouveaux et nombreux défis. Par exemple, la libéralisation engendre de nouvelles contraintes sur les prix et une volatilité des tarifs ayant pour conséquences des variations d'échanges, donc de flux. A cela s'ajoute le caractère stochastique des nouvelles productions éoliennes qui, avec l'avantage d'un coût raisonnable et de leur source renouvelable, sont désormais bienvenues dans les réseaux, comme le sera l'énergie solaire, dès que son coût aura baissé [1].

D'autre part, les économies d'énergie souhaitées ne se réalisent pas. Au contraire, la consommation électrique ne cesse d'augmenter du fait de la croissance économique et de l'évolution des vecteurs énergétiques. En effet, notre mode de vie ainsi que les innovations énergétiques favorables à l'environnement, telles que les pompes à chaleur ou la mobilité électrique par exemple, font que nous sommes et serons de plus en plus dépendants du vecteur électrique. Parallèlement, très peu de nouvelles lignes de transport sont construites. En effet, le soutien de la population envers des ouvrages, qui bien que nécessaires sont dotés d'une esthétique peu élégante, fait cruellement défaut, alors que les alternatives technologiques ne sont actuellement pas économiquement viables.

De par ces effets conjugués, les réseaux sont exploités à des niveaux proches de leurs limites de capacité, et leur gestion devient de plus en plus complexe. Ainsi, paradoxalement, face à une demande continuellement croissante, les opérateurs de réseaux sont toujours plus

contraints à améliorer la qualité de la distribution. C'est ainsi que des pénalités en cas de panne apparaissent. Par exemple, certains réseaux se voient désormais obligés de délivrer une certaine quantité d'énergie gratuite pour chaque interruption.

C'est dans ce contexte que les nouveaux développements des technologies de l'information, associés aux nouvelles techniques de mesure et de contrôle du réseau, deviennent très intéressants. Cet article décrit un travail de recherche dans lequel ces technologies sont utilisées pour la gestion et la sécurisation du réseau. Il s'agit d'optimiser les flux afin no-

tamment de réduire les pertes de puissance, d'éviter la surcharge des lignes et de maintenir la tension dans les limites normatives.

### Description du projet

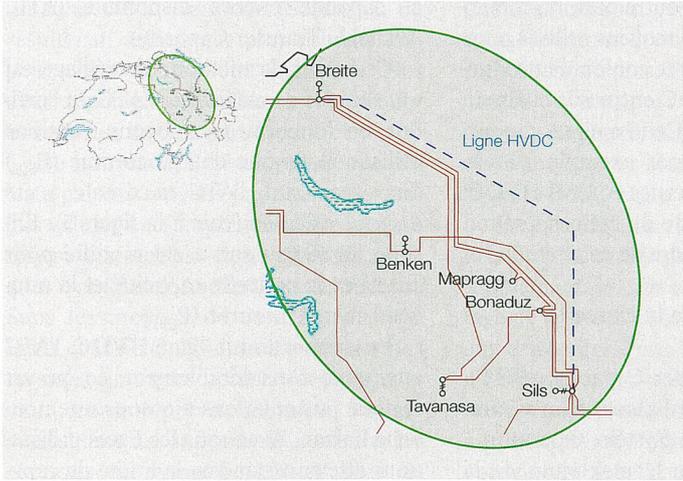
La technologie WAMS (Wide Area Monitoring System) repose sur la mesure en temps réel des phaseurs aux nœuds qui, couplée à des calculateurs performants, permet de surveiller le réseau et de prévenir certaines perturbations avec un bref temps de réaction. La surveillance se fait à l'aide d'unités de mesure de phaseurs (PMU ou Phasor Measurement Unit) et l'intervention, pour la prévention, s'opère par le contrôle de moyens d'action tels que les génératrices ou les Facts (Flexible Alternative Current Transmission System).

### Intervention automatique sur le réseau

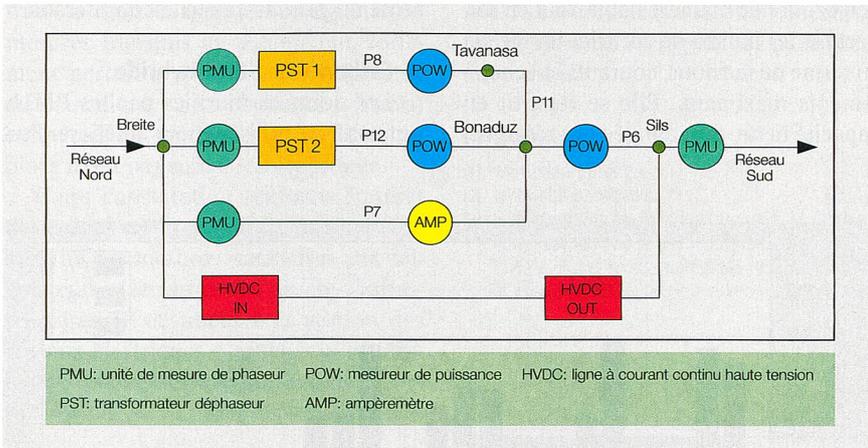
Le but principal du projet WACS (Wide Area Controlling System) est d'aller plus loin que le concept WAMS en assurant l'intervention sur le réseau de manière automatique, sans opérateur. Le régulateur implanté dans le calculateur de processus permet de traiter les mesu-



**Figure 1** Miniréseau analogique de l'EIA-FR.



**Figure 2** Corridor alpin suisse, étendu en théorie.



**Figure 3** Configuration des moyens d'action (PSTs, ligne HVDC) sur le miniréseau.

res provenant des PMUs, afin de générer les commandes adéquates nécessaires au maintien du bon fonctionnement du réseau, ceci en fonction d'objectifs définis par l'exploitant.

Pour cela, le simulateur analogique de réseau électrique, appelé miniréseau, dont dispose la HES-SO sur le site de l'école d'ingénieurs de Fribourg, est utilisé (figure 1). Il est équipé de moyens de surveillance (PMUs) et d'action (Facts, ici deux transformateurs déphaseurs, appelés également PSTs, ainsi qu'une ligne HVDC, c'est-à-dire une ligne à courant continu à haute tension). Le régulateur est implanté dans un ordinateur personnel, et communique avec les PMUs et les Facts par bus de terrain. Il est configurable par l'utilisateur en fonction des objectifs à atteindre, par exemple le maintien du plan de tension dans les limites normales, la minimisation des pertes ou la prévention d'une surcharge des lignes.

**Un estimateur d'état plus précis**

Le second but est d'étudier, puis de réaliser un estimateur d'état. Actuelle-

ment, les entreprises de réseaux utilisent les mesures Scada (Supervisory Control and Data Acquisition) pour déterminer leur estimateur d'état. Dans le cadre de ce projet, les données fournies par les PMUs sont utilisées pour réaliser l'estimation de l'état du réseau. L'objectif est d'améliorer la précision de l'estimateur d'état classique (Scada) et de pouvoir mieux détecter les erreurs de mesures.

**Une application concrète: le « corridor alpin »**

Le « corridor alpin » situé entre Breite et Sils (figure 2) est un passage important du réseau suisse. En effet, une grande partie de l'énergie circulant vers l'Italie, pays très dépendant des importations, transite par la Suisse à travers cette portion du réseau. Celle-ci a donc été réali-

sée à échelle réduite en hardware sur le miniréseau. Deux PSTs ont été intégrés sur les lignes du corridor. Puis une ligne HVDC (technologie « HVDC Light » [2]) a été ajoutée en parallèle avec celui-ci. Ces Facts ont été dimensionnés et conçus lors d'un précédent projet [3].

Les algorithmes de réglage développés dans le cadre de l'actuel projet sont écrits en code Matlab. Le logiciel LabView, équipé de cartes d'acquisition, permet d'interfacer les PMUs et les Facts. Finalement, les mesures effectuées dans chaque cas de fonctionnement du miniréseau ont été confrontées aux valeurs obtenues par simulation numérique au moyen du logiciel Neplan.

**Méthode de gestion globale**

La synthèse du régulateur précité repose sur la méthode de réglage global, appelée méthode de minimisation sous contraintes [3, 4], qui consiste à définir une fonction-objectif  $f(\vec{x}, \vec{u})$  qui attribue une valeur réelle positive à chaque état de conduction du corridor. Cette fonction dépend des vecteurs  $\vec{x}$  et  $\vec{u}$ , respectivement des tensions aux nœuds (modules et phases) et des variables de commande des trois Facts.

Une formulation usuelle d'une telle fonction est donnée dans l'équation (1) (voir encadré ci-dessous), dans laquelle les indices  $i$  et  $j$  sont relatifs respectivement aux lignes et aux nœuds.

La valeur de la fonction  $f(\vec{x}, \vec{u})$  est la somme des trois composantes suivantes:

- A: la somme des puissances dissipées dans toutes les lignes,  $P_i^{loss}$  étant la puissance dissipée dans la ligne n°  $i$ .
- B: la somme des écarts entre les flux de puissance nominaux et réels dans les lignes. La variable  $\eta_i$  représente l'écart entre le flux nominal et réel (donc mesuré) dans la ligne n°  $i$ , et la variable  $\epsilon_i$ , l'écart entre 90% du flux nominal et le flux réel dans la même ligne. Cette dernière variable est définie afin d'évaluer plus finement les dépassements de capacité.
- C: la somme des écarts entre les tensions nominales et réelles aux nœuds,  $V_j$  représentant la tension au nœud  $j$ , et  $V_j^{ref}$  la tension de référence au même nœud.

$$f(\vec{x}, \vec{u}) = \sum_i \left( a \cdot P_i^{loss} + b \cdot \epsilon_i + c \cdot \eta_i \right) + \sum_j d \cdot (V_j - V_j^{ref})^2 \quad (1)$$

La minimisation de (1) par la commande des moyens d'action (Facts) permettra donc de réduire les pertes (A), la congestion dans les lignes (B) et la dérive de la tension aux nœuds (C). Pour l'utilisateur, il est possible de modifier les priorités entre ces trois objectifs en imposant les coefficients de pondération a à d. Le terme (A, B ou C) ayant les coefficients les plus élevés sera évidemment optimisé en priorité.

Du point de vue opérationnel, l'équation (1) est minimisée à l'aide d'un algorithme itératif exécuté périodiquement. Chaque itération correspond à une combinaison de commande des Facts. La combinaison optimale, c'est-à-dire celle qui minimise (1), est ensuite appliquée. Le calcul de la répartition du flux de puissance (load flow) à chaque itération, qui est nécessaire pour calculer (1), est fait à l'aide du modèle du réseau.

### Résultats de l'étude

La méthode de réglage global est validée expérimentalement pour régler les puissances dans les lignes du corridor alpin suisse, pour maximiser sa capacité, ainsi que pour améliorer son estimateur d'état.

#### Réglage des puissances avec différents moyens d'action

Les mesures sont effectuées sur le miniréseau dont le schéma électrique est représenté dans la figure 3. Plusieurs configurations sont considérées, avec différents PSTs enclenchés ou non, et avec ou sans ligne HVDC. Les coefficients de pondération de la fonction-objectif (1) sont choisis de manière à maintenir les puissances dans les lignes en-dessous de 90% de la charge nominale.

Les puissances actives sont exprimées en p.u. (per unit), par rapport à  $S_{max}$ , la puissance apparente maximale par ligne. Pour les lignes P<sub>7</sub>, P<sub>8</sub> et P<sub>12</sub>, ces puissances sont représentées à la figure 4.

Des comparaisons entre ces mesures et les calculs montrent des différences souvent faibles, atteignant tout au plus environ 5%. En outre, des résultats similaires sont obtenus avec d'autres objectifs tels que le respect d'une limite de pertes ou des limites normatives de la tension.

Les conclusions les plus intéressantes de cette partie de l'étude sont que, d'une part, les algorithmes de réglages appliqués à un cas pratique, bien qu'en modèle réduit, fonctionnent parfaitement et que les objectifs de réglage, par exemple le respect des limites de charge, sont opération-

nels en pratique. D'autre part, on remarque que de tous les moyens utilisés pour réguler les flux dans ce couloir, l'introduction d'un lien HVDC entre Sils et Breite est le plus efficace. Cette opération pourrait être réalisée, par exemple, par la transformation de ternes en liens HVDC. L'aspect économique de cette opération sort toutefois du cadre de cette étude.

#### Maximisation de la capacité de transfert

La « Total Transfer Capacity » (TTC), telle que définie par l'association « European Transmission System Operators » (ETSO), représente le maximum de la puissance qui peut être transmise entre deux zones de manière fiable, tout en respectant les limites de sécurité du réseau en terme de tensions, courants et échauffements maximaux. Elle se répartit en capacité nette, déjà allouée (ou réservée)

et capacité encore disponible (ATC, Available Transfer Capacity).

Cette fois, la méthode de réglage est utilisée afin de maximiser l'ATC du corridor, en fonction des moyens d'actions utilisés. Sous une charge connue ( $P_{Sils}$ ) du réseau sud, l'ATC maximale a été d'abord calculée (voir à la figure 5). Ensuite, le réseau sud a été modifié pour absorber la nouvelle capacité, et la nouvelle charge mesurée ( $P_{Sils}$ ).

En connectant la ligne HVDC, l'ATC augmente considérablement, ce qui est logique puisque nous ajoutons une nouvelle liaison. Avec tous les Facts utilisés, nous atteignons même la limite de capacité pour toutes les lignes, ce qui représente un gain de capacité considérable.

#### Estimateur d'état hybride

Les données fournies par les PMUs ont aussi été utilisées pour améliorer l'es-

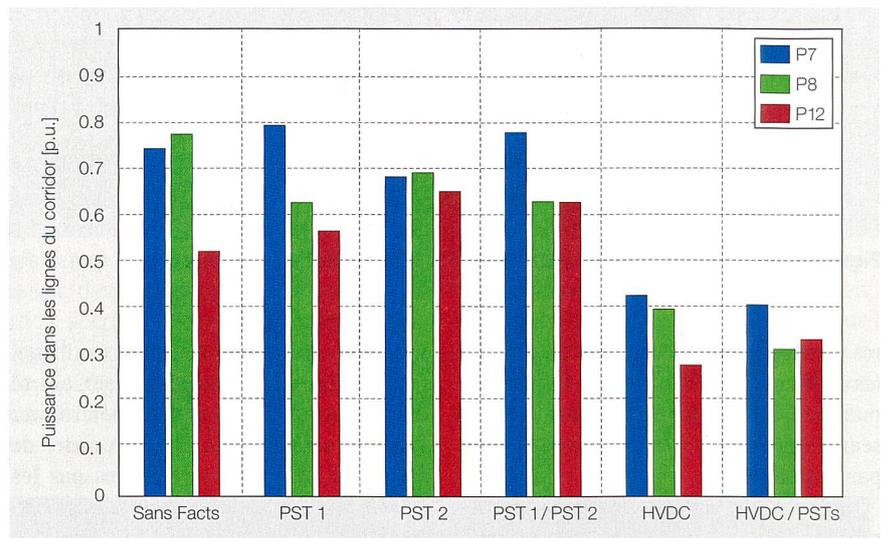


Figure 4 Charges des lignes du corridor en fonction des moyens d'action utilisés.

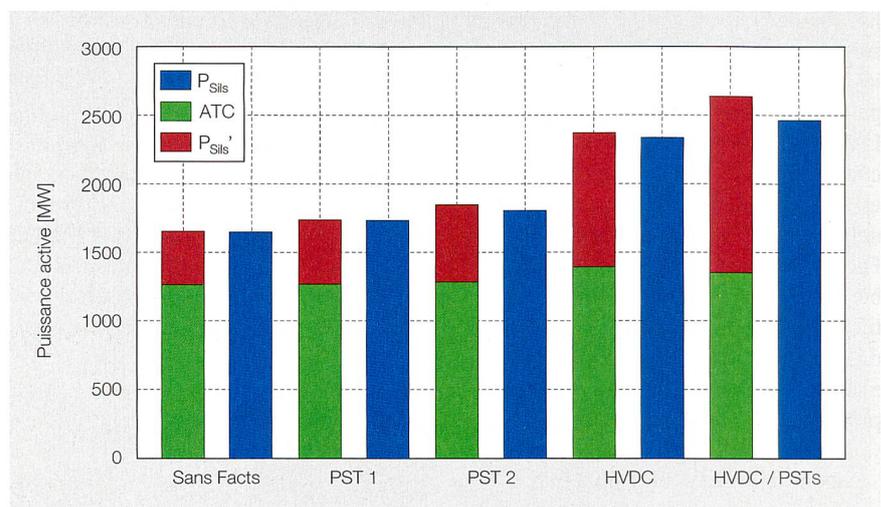


Figure 5 Mesure de l'ATC sur le miniréseau, en rouge.

Figures: EIA-FR

timeur d'état classique (Scada). Il en résulte un estimateur plus robuste, appelé « estimateur d'état hybride ». Des développements détaillés au sujet de ces estimateurs se trouvent dans [6].

De nouveau, ce développement a été testé par des moyens logiciels, puis, une fois validé, a été implémenté sur le mini-réseau. Dans ce cas-ci, les résultats pratiques n'ont pas donné entière satisfaction. Sans les moyens de contrôle de type Facts et HVDC, l'estimateur d'état et les mesures pratiques corroborent parfaitement, comme prévu. Toutefois, lors de l'utilisation des moyens de contrôle, les résultats divergent parfois de plus de 25%. La cause de ces différences a été trouvée dans la qualité des signaux de mesures transmis au calculateur, fortement perturbés à cause des dispositifs d'électronique de puissance (Facts) connectés au miniréseau. Les filtres en place n'ont pas suffi à les supprimer.

Cette constatation renforce l'intérêt des études sur la qualité, la fiabilité et la sécurité des mesures transmises aux calculateurs, décrites dans l'article « Infrastructures IT destinées à la gestion des réseaux électriques », article qui est également publié dans ce numéro du Bulletin.

## Conclusion

Ce projet, soutenu par Swisselectric Research, Swissgrid et Groupe E, réalisé en collaboration avec l'EPFZ et la TU Ilmenau, a permis de mettre en évidence divers éléments en rapport avec le contrôle des réseaux électriques.

Les problèmes de congestion nécessitent l'introduction graduelle de Facts.

Ces derniers sont généralement du type transformateur déphaseur pour des raisons économiques. Pour les grandes distances, le transport à courant continu apporte en plus la possibilité d'un réglage des transits et du réactif (avec la technologie « HVDC Light »).

La surveillance du réseau à grande échelle à l'aide des phaseurs est un atout supplémentaire ; un seul exemple : l'avantage de connaître les angles des tensions aux extrémités d'une ligne lors d'un réencenchement ou d'une reconfiguration. Mais le contrôle-commande d'un système à boucle fermée (mesure des phaseurs, commande des Facts) n'est pas envisageable dans la prochaine dizaine d'années. La fiabilité des télécommunications est insuffisante en regard des puissances mises en jeu.

## Références

- [1] [www.smartgrids.eu](http://www.smartgrids.eu).
- [2] [www.abb.com/hvdc](http://www.abb.com/hvdc).
- [3] E. Valdambri, M. Pellerin, J. Dunand, M. Bochud : Poche asynchrone et gestion des flux. Rapport POCHÉ, Projet fonds stratégique HES-SO, EIA-FR et HEIG-VD, 2003.

- [4] G. Glanzmann, G. Andersson : Coordinated Control Facts Devices based on Optimal Power Flow. North American Power Symposium (NAPS), Ames, USA, 2005.
- [5] G. Hug-Glanzmann : Coordinated Power Flow Control to Enhance Steady-State Security in Power System. Swiss federal institute of technology Zurich, 2008.
- [6] R. Alla, F. Sanni : Réalisation d'un estimateur d'état. State estimation, Projet de diplôme EIA-FR 2008.

## Informations sur les auteurs

**Moncef Justin Lalou** a obtenu le diplôme d'ingénieur électricien de l'EPF Lausanne en 1990 et le grade de docteur ès sciences techniques de cette même institution en 1994. Après quelques années passées comme chef de projet dans l'industrie des machines, il enseigne depuis 1999 le réglage automatique à la HES-SO (ARC puis Fribourg) et collabore, en parallèle, dans des projets traitant des entraînements et des réseaux électriques.

EIA-FR, 1705 Fribourg, [moncef.lalou@hefr.ch](mailto:moncef.lalou@hefr.ch)

**Jean-François Affolter** enseigne l'énergie électrique à la HES-SO/HEIG-VD depuis 1995. Il est responsable du laboratoire haute tension et du laboratoire d'énergie électrique. Son expérience professionnelle débute dans les câbleries (Cortailod) et se poursuit dans les réseaux électriques (Ontario Hydro, EOS). Ses projets de recherche concernent plus particulièrement les réseaux électriques et la production d'énergie.

HEIG-VD, 1400 Yverdon-les-Bains, [jean-francois.affolter@heig-vd.ch](mailto:jean-francois.affolter@heig-vd.ch)

## Zusammenfassung **Flächendeckende Stromnetzsteuerung**

### Steuerung der Leistungsflüsse im Stromnetz

Die Stromversorgungssicherheit wird die Industrie in Zukunft vor eine neue Herausforderung stellen, dies sowohl bezüglich der Erzeugung als auch des Transports und der Verteilung elektrischer Energie. Vor diesem Hintergrund stellt die Steuerung eines immer stärker gesättigten Netzes eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Dieser Beitrag stellt eine Methode zur optimalen Steuerung von Leistungsflüssen in einem mit Facts und Phasennessern ausgerüsteten Stromnetz in Echtzeit vor.

CHe

## Finis les chemins à grille, les chemins de câbles et les conduites montantes! Il existe maintenant les Multi-chemins LANZ: un chemin pour tous les câbles

- Les Multi-chemins LANZ simplifient la planification, le métré et le décompte!
- Ils diminuent les frais d'agencement, d'entreposage et de montage!
- Ils assurent de meilleurs profits aux clients: excellente aération des câbles
- Modification d'affectation en tout temps. Avantageux. Conformes aux normes CE et SN SEV 1000/3.

Pour des conseils, des offres et des livraisons à prix avantageux, adressez-vous au grossiste en matériel électrique ou directement à

**LANZ** **lanz oensingen sa** e-mail: [info@lanz-oens.com](mailto:info@lanz-oens.com)  
CH-4702 Oensingen • Tél. 062/388 21 21 • Fax 062/388 24 24



# CARTOON



Die Software ist so gut,  
man sieht sogar, wann  
mein Neffe in Bümpliz  
sein Handy auflädt!



MARTIN GUHL  
cartoonexpress.ch

Le software est si performant  
que j'arrive même à voir mon neveu  
en train de charger son natel à Bümpliz!