# Emulation du réseau électrique

Autor(en): **Kayal, Maher / Fabre, Laurent / Nagel, Ira**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **103 (2012)**

Heft 9

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857336

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

# Emulation du réseau électrique

## Stabilité dynamique du « smart grid » en temps réel grâce à la microélectronique

L'émergence du « smart grid » va bouleverser la vision de notre gestion énergétique. Dans ce nouveau schéma, le consommateur pourra produire lui-même une partie de son énergie et gérer sa consommation via des systèmes qui tiendront compte de paramètres tels que le prix, la puissance ou la pollution. Assurer la stabilité d'un tel réseau devient un vrai challenge. Cet article propose de nouvelles technologies qui permettront de détecter rapidement les risques d'instabilités dynamiques et transitoires du réseau et d'aider à y remédier.

**Maher Kayal, Laurent Fabre, Ira Nagel**

L'évolution programmée du réseau intelligent (smart grid), dans lequel vont cohabiter le flux de puissance électrique à véhiculer, les données de mesures, l'analyse de ces dernières et les ordres de gestion, va modifier la vision que nous avons de notre réseau électrique. En effet, des systèmes de mesure intelligents (smart metering), de nouveaux moyens de production ainsi qu'une consommation intelligente couplée à des facilités de gestion de charges en temps réel sont aujourd'hui introduits pour aider à optimiser notre consommation. La masse de nouvelles données ainsi générée est particulièrement conséquente et il est indispensable de disposer de systèmes de calcul de réseau et de prise de décision extrêmement rapides.

De nos jours, les ordinateurs sont largement utilisés pour calculer et analyser les paramètres de gestion de notre réseau et ceci d'une manière assez centralisée. Une démultiplication des centres de contrôle et un rapprochement du lieu où se passent les décisions dites « intelligentes » est à prévoir. Ceci permettra de s'affranchir du spectre de congestion et de saturation du traitement d'informations, mais peut provoquer une explosion du coût et une difficulté de gestion qui fragilise notre réseau de distribution.

Heureusement, les progrès techniques dans le domaine de l'électronique permettent de concentrer des fonctions de calcul et de traitement de signaux à bas coût sur des puces de silicium (circuits intégrés). Un groupe de chercheurs de l'EPFL a réussi pour la première fois grâce à la microélectronique à créer des circuits électroniques pour l'émulation de réseaux très performants en vitesse et potentiellement bon marché (figure 1). Il est donc possible de réaliser des circuits qui puissent être facilement dupliqués, conçus pour être programmés afin d'effectuer des calculs qu'un ordinateur normal arrive à faire uniquement en gaspillant beaucoup de temps, un paramètre précieux pour gérer un réseau en temps réel.

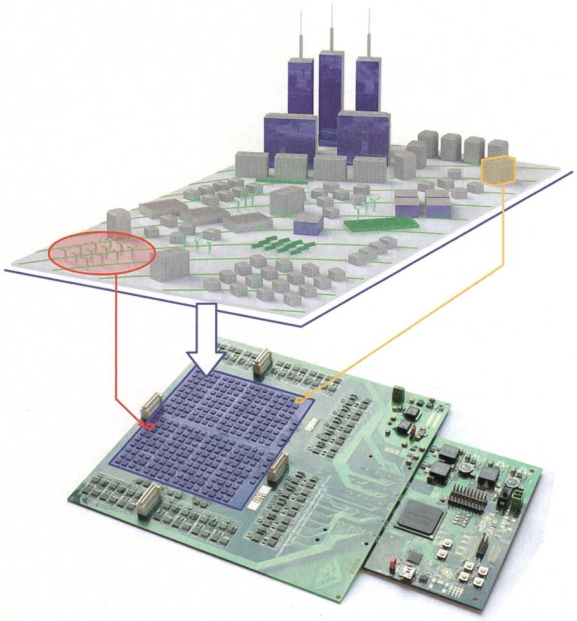


**Figure 1** Emulateur en temps réel d'un réseau électrique sur un circuit électronique.

### Les grandes tendances du réseau électrique

La consommation d'énergie électrique est en constante augmentation. En outre, une partie des gros centres de production sera remplacée ces prochaines décennies par des centrales plus petites orientées vers les énergies renouvelables. Or l'approvisionnement renouvelable, comme le solaire et l'éolien, est non seulement décentralisé, mais aussi de nature stochastique, ce qui signifie qu'une partie de la production n'est plus forcément assurée à tout moment. Il sera donc de plus en plus difficile de gérer la stabilité dite « stationnaire » du réseau, une partie de la production électrique étant en constante fluctuation.

### Mise en danger de la stabilité dynamique

La stabilité dynamique du réseau électrique va également être affectée. Celle-ci dépend en effet de deux critères : la masse tournante des générateurs (communément appelée inertie des générateurs), ainsi que l'aptitude des générateurs à refouler leur énergie cinétique au réseau. La faculté du réseau à répondre aux variations de charge brusques est directement liée à cette masse tournante qui agit comme tampon capable de compenser rapidement une variation de la charge en accélérant ou en décélérant. Un généra-

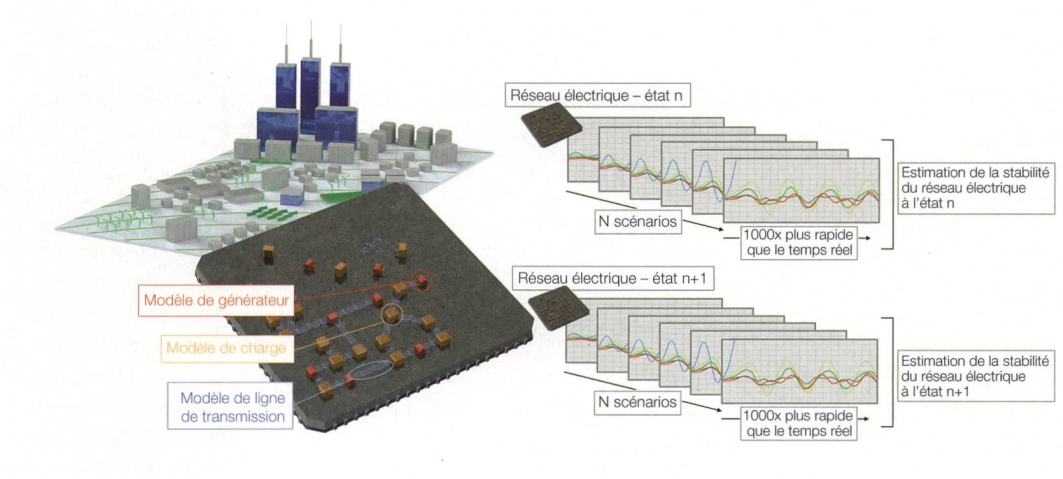



**Figure 2** Circuit intégré programmable pour la simulation de la stabilité dynamique du réseau.

teur, ou groupe de générateurs, est donc considéré comme dynamiquement stable s'il a une masse tournante élevée et si son interaction avec le réseau lui permet rapidement d'éliminer son énergie cinétique après une perturbation.

Le remplacement des gros centres de production par de multiples centrales à énergies renouvelables connectées au réseau par des éléments d'électronique de puissance va sensiblement diminuer la masse tournante du réseau électrique. Dans un même temps, l'accroissement de la demande électrique requiert de la part des générateurs de fournir de plus en plus de puissance au réseau, réduisant ainsi leur capacité à éliminer rapidement leur énergie cinétique.

### Des simulations pour une meilleure gestion

Cet état de fait pousse les opérateurs du réseau à rechercher des simulateurs qui leur permettent d'estimer très rapidement la stabilité dynamique d'un réseau et de réagir immédiatement dans le cas où celle-ci ne serait pas suffisante. Deux types de simulations leur sont nécessaires pour une gestion optimale : la simulation de l'état stationnaire du réseau afin d'en connaître l'état général à un instant donné et la simulation dynamique qui permet de connaître la transition du réseau entre deux ou plusieurs états. Il s'agit pour cette dernière d'une simulation temporelle, très gourmande en termes de puissance de calcul, dont le pas de simulation devient de plus en plus petit avec l'arrivée de l'électronique de puissance liée aux nouveaux convertisseurs. De nouvelles architectures dédiées à ce calcul sont donc à réinventer pour permettre aux opérateurs de réseau d'obtenir les informations nécessaires au plus vite.

## Simulation dynamique en temps réel

Les lois physiques qui décrivent le fonctionnement du réseau électrique sont assez bien maîtrisées et les modèles mathématiques des génératrices, des charges et des lignes existent avec plusieurs niveaux d'abstraction. Il est donc possible de décrire le fonctionnement d'un réseau électrique en tenant compte de son comportement dynamique.

### Emulation du réseau électrique

Historiquement, les premiers simulateurs sont analogiques et font appel à l'émulation du réseau électrique plutôt qu'à l'algorithmique et à la nature purement numérique des processeurs actuels. A l'époque, les avantages de l'émulation analogique sont très clairs : ces simulations fonctionnent aisément en temps réel, puisque basées sur des composants électroniques qui peuvent reproduire physiquement la réalité. Les grandeurs physiques d'un réseau électrique sont en effet des courants et des tensions qui peuvent être réduits à des échelles que les circuits électroniques peuvent manipuler.

### Simulation numérique

Entre temps, le développement de l'informatique a permis aux processeurs actuels de devenir les outils par excellence utilisés pour simuler et faciliter la gestion du réseau. Le grand avantage d'un simulateur numérique codé dans un programme informatique est son extrême souplesse. Pour modifier les caractéristiques d'une génératrice, d'une charge ou la topologie d'un réseau, il suffit de procéder à une simple modification de paramètres dans un programme informatique, alors que dans le cas d'un simulateur analogique, c'est une propriété physique qui doit être remplacée.

### Evolutions récentes

L'arrivée des processeurs multi-cœurs, des plates-formes de calcul sur des processeurs graphiques, ainsi que l'émergence des logiciels de base qui permettent de réaliser des architectures distribuées client-serveur, sont sans doute les évolutions majeures que le domaine de la simulation du réseau électrique a pu exploiter avec des résultats assez spectaculaires.

En parallèle, le monde de la microélectronique a, lui aussi, effectué une percée technologique fulgurante. Nous pouvons aujourd'hui réaliser des fonctions électroniques de plus en plus performantes à des coûts de plus en plus faibles. La modélisation des paramètres physiques des technologies CMOS a fait un bond prodigieux, alors que de nouvelles méthodologies de conception fournissent des outils de plus en plus simples pour réaliser des fonctions. Cette constatation a poussé des chercheurs de l'EPFL à proposer une solution de type émulation électronique, qui est d'autant plus prometteuse que la limite des ordinateurs dans certains domaines est presque atteinte.

## Limites de la simulation numérique

La simulation dynamique du réseau électrique passe par l'évaluation de l'état complet du modèle du réseau à chaque pas de temps. Ainsi, le simulateur calcule à chaque pas les tensions à tous les nœuds ainsi que les courants qui transitent par toutes les lignes du réseau, et ceci en même temps que l'état des générateurs et charges connectés à tous les

nœuds. Le calcul des tensions et courants s'effectue à l'aide d'une lourde manipulation matricielle basée sur la matrice d'admittance qui représente la topologie du réseau. Pour un processeur à simple cœur, le temps de calcul global est donc proportionnel au nombre de nœuds au carré ($n^2$) ($n$ étant le nombre de nœuds ou de bus du réseau à simuler).

A partir de 2006, les constructeurs de processeurs ont décidé de limiter l'augmentation de la fréquence des processeurs en raison du temps de propagation de l'horloge. La parallélisation (processeurs multi-cœurs par exemple) a alors permis d'augmenter la vitesse de simulation. Malgré cela, les limitations en termes de vitesse ne sont pas dues à la puissance de calcul mais bel et bien à la vitesse d'accès à la mémoire qui, avec l'augmentation du nombre de variables et la complexité des modèles de plus en plus élevée, est véritablement devenue le goulot d'étranglement du système. Les méthodes et les architectures utilisées dans la simulation numérique du réseau atteignent clairement une limitation difficile à surmonter.

## Une architecture intrinsèquement parallèle

Afin de s'affranchir de ce problème, une nouvelle architecture intrinsèquement parallèle a été imaginée et réalisée au laboratoire d'électronique de l'EPFL. Le concept vise à remplacer le lourd calcul matriciel par une circuiterie analogique dédiée et reconfigurable qui représente le modèle des lignes du réseau. Les liaisons entre nœuds ou bus de la topologie d'un réseau sont configurées grâce à des connexions analogiques programmables. Les nœuds sont ensuite liés à de multiples circuits microélectroniques capables de résoudre les équations des générateurs et des charges en parallèle (figure 2).

L'information qui découle du calcul des lignes du réseau est donc accessible de manière parallèle par les blocs de calcul des charges et des générateurs, ce qui permet d'éliminer le goulot d'étranglement des systèmes numériques cités précédemment. Le point fondamental de cette architecture est sa vitesse de calcul qui est constante quel que soit le nombre de nœuds. Une nouvelle structure électronique programmable et capable de s'adapter à diverses topologies du réseau a été inventée [1].

Dans cet article, deux approches sont présentées pour obtenir une telle architecture. La première est purement analogique et l'autre est dite hybride : à moitié numérique et à moitié analogique. L'approche analogique a l'avantage d'être plus rapide alors que l'approche hybride a une meilleure flexibilité en termes de modèle et des possibilités de calibration beaucoup plus aisée.

### Emulation analogique

L'émulation dite analogique a pour but de garder les caractéristiques fréquentielles du réseau réel. Les blocs de calcul sont une véritable miniaturisation des composants réels du réseau. Les lignes de transmission, par exemple, sont représentées par des inductances, résistances et capacités microélectroniques. La vitesse de calcul est par conséquent relative à la fréquence du réseau émulé.

Les grandeurs physiques du réseau électrique, les courants et tensions alternatifs, s'y retrouvent réduits d'un facteur d'échelle. La reproduction du réseau nécessite une configuration des composants microélectroniques du circuit, ce qui est obtenu grâce à une polarisation adéquate en courant des éléments du circuit.

Un premier démonstrateur basé sur un circuit intégré a permis de valider cette approche (figure 3). Grâce à la bande passante élevée des éléments miniaturisés, la fréquence du réseau émulé est de 500 kHz (au lieu des 50 Hz d'un réseau réel). Il en résulte une vitesse de calcul 10 000 fois plus rapide que le temps réel [2–5].

### Emulation hybride

Le concept de l'émulation hybride (ou signal mixte) est basé sur le calcul analogique des équations des lignes de transmission, alors que les équations des générateurs et des charges sont calculées de manière numérique. L'interface entre ces deux mondes s'effectue grâce à des convertisseurs analogiques-numériques (ADC) et numériques-analogiques (DAC) haute vitesse. Le calcul analogique des équations du réseau passe par une modélisation mathématique qui permet de représenter les effets inductifs, capacitifs et résistifs des lignes à l'aide de multiples réseaux résistifs configurables. Le calcul numérique des équations des charges et des générateurs est ensuite effectué à l'aide d'une architecture dédiée avec plusieurs pipelines en parallèle [6,7].

Un émulateur capable d'émuler une centaine de nœuds a été réalisé. Basé sur l'empilement de cartes reconfigurables à 24 nœuds (figure 4a), ce démonstrateur a permis de valider cette approche en vitesse et en précision. En termes de vitesse, par exemple, une simulation de 1600 ms est émulée en 1,6 ms, soit 1000 fois plus vite que le temps réel, et ce quelle que soit la taille du réseau, alors qu'un simulateur du commerce basé sur un processeur AMD Quad-Core nécessite 400 ms (4 fois plus rapide que le temps réel) pour la même opération.

Un second émulateur, également 1000 fois plus rapide que le temps réel, basé sur l'interconnexion d'un circuit intégré de 6 nœuds, a aussi été réalisé (figure 4b). Cette approche microélectronique permet d'envisager une production en masse et une diminution drastique des coûts d'une telle architecture, de façon à fournir une solution de calcul distribuée aux opérateurs du réseau.

## Conclusion

Les nouvelles orientations de la consommation et de la production d'énergie électrique auront des conséquences sur la manière dont les opérateurs devront gérer le réseau électrique.

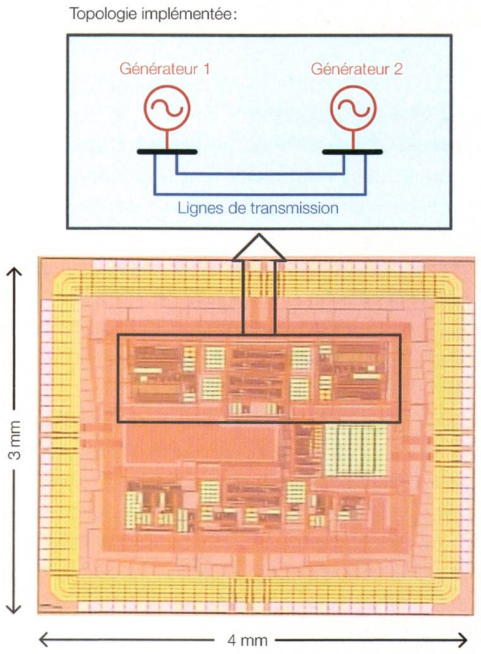
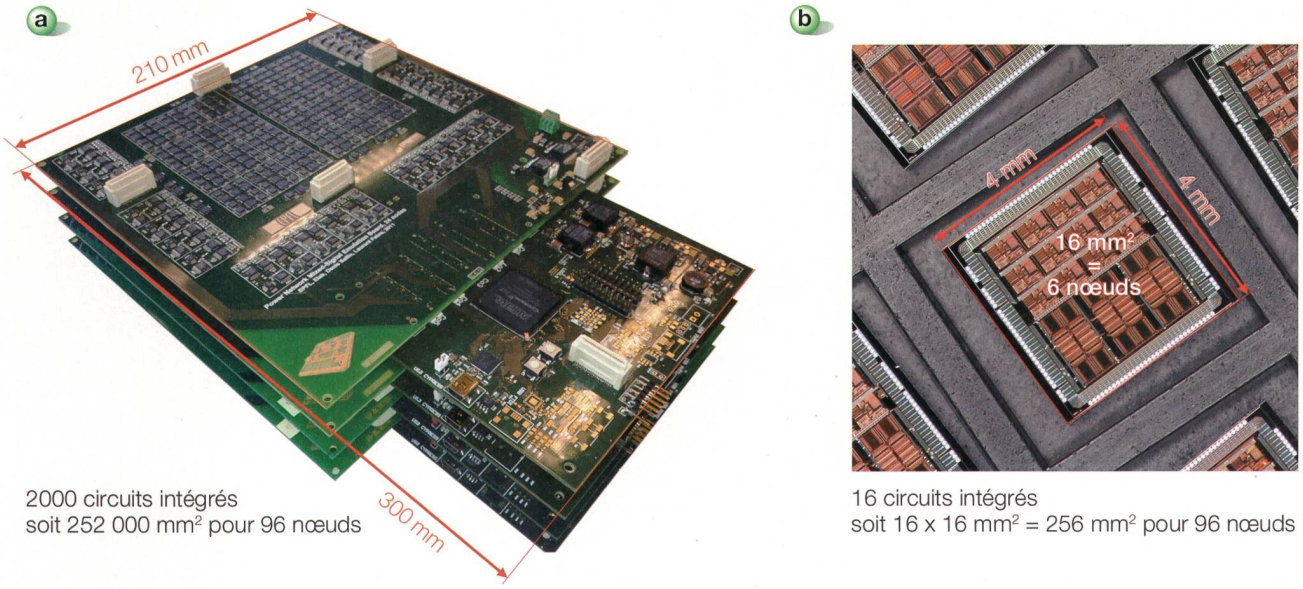



**Figure 3** Démonstrateur de l'émulation analogique capable d'émuler 10 000 fois plus vite que le temps réel.




Figures: EPFL

**Figure 4** Emulateurs développés à l'EPFL. (a) Prototype à composants discrets. (b) Prototype miniaturisé réalisé sur une puce de silicium.

Dans cet article, une nouvelle vision d'aide à la gestion du réseau a été décrite, basée sur des architectures dédiées qui utilisent la microélectronique afin d'accélérer la vitesse de calcul lors de la simulation du réseau. Plusieurs approches et réalisations basées sur l'émulation sont présentées afin de pouvoir passer outre les limitations posées par les processeurs numériques. Cette nouvelle technologie change le paradigme actuel de la gestion du réseau et pourrait fournir l'une des clés nécessaires à la gestion efficace des réseaux intelligents avec un rapport prix/performance que les ordinateurs ne peuvent assurer.

## Références

[1] A. Oudalov, Y. Maret, I. Nagel, L. Fabre, M. Kayal and R. Cherkaoui: Programmable and reconfigurable hardware for real-time power system emulation. United States Patent Application 20100332211 and European Patent Application EP 2267561 A1, 2010.

[2] I. Nagel, L. Fabre, R. Cherkaoui and M. Kayal: High-speed power system stability simulation using analog computation. MIXDES'09, 25th to 27th June 2009, Lodz, Poland, 2009.

[3] I. Nagel, L. Fabre, R. Cherkaoui and M. Kayal: High-speed power system stability simulation using analog computation. International Journal of Microelectronics and Computer Science, Vol. 1, No. 2, pp. 180-187, 2010.

[4] I. Nagel, L. Fabre, R. Cherkaoui and M. Kayal: High-speed power system stability simulation using analog computation: systematic error analysis. MIXDES'10, 24th to 26th June 2010, Wroclaw, Poland, 2010.

[5] I. Nagel, L. Fabre, R. Cherkaoui and M. Kayal: Reconfigurable fully integrated inductance for high-speed transient stability emulation. PSCC'11, 22th to 26th August 2011, Stockholm, Sweden, 2011.

[6] L. Fabre, I. Nagel, R. Cherkaoui and M. Kayal: High-speed, mixed-signal emulation for power system dynamic analysis. PowerTech'09, 28th June to 2nd July 2009, Bucharest, Romania, 2009.

[7] L. Fabre, I. Nagel, C. Meinen, R. Cherkaoui and M. Kayal: A field programmable power network system (FPPNS) for high-speed transient stability emulation. PSCC'11, 22th to 26th August 2011, Stockholm, Sweden, 2011.

**Zusammenfassung** **Emulation des Stromnetzes**

**Dynamische Stabilität des Smart Grids in Echtzeit dank Mikroelektronik**

Das Aufkommen des Smart Grids wird die Vorstellung unseres Energiemanagements revolutionieren. Dank dieser intelligenten Stromnetze wird der Verbraucher selbst einen Teil seiner Energie erzeugen und seinen Verbrauch über Systeme verwalten können, die Parameter wie Preis, Leistung oder Verschmutzung berücksichtigen. Dabei wird die Sicherstellung der Stabilität eines solchen Netzes zu einer echten Herausforderung. Dieser Artikel stellt neue Technologien vor, mit denen die Risiken einer Instabilität des Netzes schnell erfasst und beseitigt werden können.

Es wird ein neues Konzept zur Unterstützung der Netzsteuerung beschrieben, das auf besonderen Architekturen beruht, bei denen die Mikroelektronik zur Beschleunigung der Berechnungsgeschwindigkeit bei der Netzsimulation eingesetzt wird. Eine spezielle, rekonfigurierbare Analogschaltung, die das Modell der Netzleitungen darstellt, ersetzt dabei die den rein numerischen Simulationen zugrunde liegende, komplexe Matrizenrechnung. Die Verbindungen zwischen den Knoten werden dank programmierbarer analoger Anschlüsse konfiguriert. Die Knoten selbst sind mit mehreren mikroelektronischen Schaltungen verbunden, die in der Lage sind, die Gleichungen der Generatoren und der Lasten parallel zu lösen.

Diese neue Technologie könnte die wirksame Steuerung von Smart Grids bei einem Preis-Leistungs-Verhältnis, das Rechner nicht bieten können, ermöglichen. CHe

## Informations sur les auteurs

Prof. Dr **Maher Kayal** a obtenu un diplôme d'ingénieur électricien et une thèse de doctorat de l'EPFL, respectivement en 1983 et 1989. Il a été nommé professeur à l'EPFL en 2001. Il est auteur et co-auteur de plus de 100 articles scientifiques, de 3 livres et de 7 brevets. Il a eu 6 distinctions internationales pour des publications scientifiques et a obtenu, en 2009, le prix du Crédit Suisse du meilleur enseignant. Il est actif dans le domaine de la conception des circuits intégrés et leurs applications dans les capteurs et les réseaux électriques intelligents.

**EPFL/ELAB Station 11, 1015 Lausanne, maher.kayal@epfl.ch**

**Laurent Fabre** est ingénieur diplômé en microtechnique (ETS) et en électricité (EPFL). Dans le cadre de son travail de thèse, il a travaillé sur de nouvelles architectures hybrides pour le calcul des réseaux électriques. Il est co-fondateur et CEO d'esmart technologies qui développe des systèmes de gestion intelligente pour bâtiments.

**EPFL/ELAB Station 11, 1015 Lausanne, laurent.fabre@epfl.ch**

**Ira Nagel** a obtenu un diplôme d'ingénieure électricienne de l'EPFL en 2007. Elle y effectue au sein du laboratoire d'électronique (ELAB) une thèse de doctorat dans le domaine de l'émulation du réseau électrique sur une puce microélectronique.

**EPFL/ELAB Station 11, 1015 Lausanne, ira.nagel@epfl.ch**

# Helfen Sie die Prämien tief zu halten: Tragen Sie Sorge zu Ihren Mitarbeitern.

SPILLMANN / FELSER / LEO BURNETT

Weniger Arbeitsunfälle und eine rasche Wiedereingliederung bedeuten tiefere Kosten. Als nicht gewinnorientiertes Unternehmen geben wir Überschüsse in Form von Prämiensenkungen an die Versicherten zurück. Das finden wir nur gerecht. Denn durch wirkungsvolle Unfallprävention tragen Sie dazu bei, dass die Prämie auch in Ihrer Branche tief bleibt. Sorgen Sie für Sicherheit in Ihrem Betrieb. Es lohnt sich. www.suva.ch/praemien

suvarisk

Sicher versichert