#### **ETH** zürich



Méthodes et principaux domaines de recherche pour un approvisionnement plus sûr en énergie électrique

18. novembre 2016

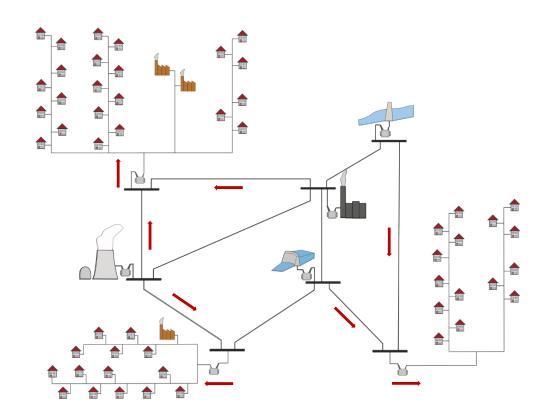
Prof. Gabriela Hug, ghug@ethz.ch

En collaboration avec: Stavros Karagiannopoulos, Dinghuan Zhu, Larry Pileggi, Uros Markovic, Amritanshu Pandey, David Bromberg, Xin Li





- Réseau électrique traditionnel
  - Production à grande échelle contrôlable
  - Demande non flexible
  - Sens du courant connu
  - Surveillance et contrôle centralisés

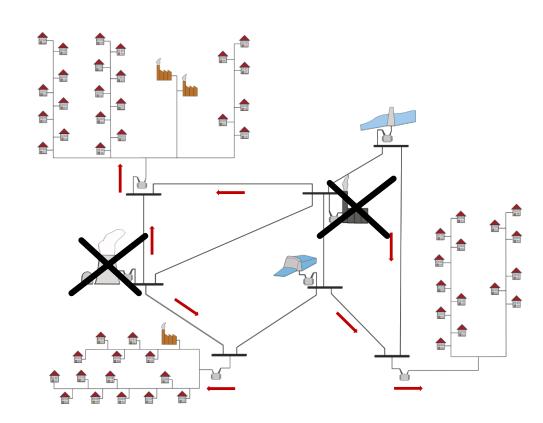






- Réseau électrique traditionnel
  - Production à grande échelle contrôlable
  - Demande non flexible
  - Sens du courant connu
  - Surveillance et contrôle centralisés

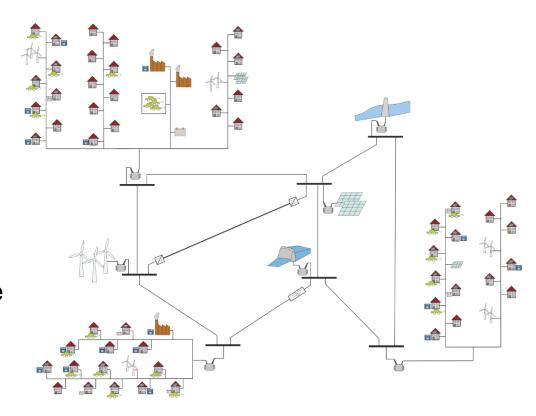
But: Remplacement des producteurs d'énergie nucléaire et fossile







- Réseau électrique du futur
  - Production et stockage décentralisés
  - Demande flexible
  - Sens du courant variable
  - Production d'énergie renouvelable intermittente
  - Contrôle du flux de charge



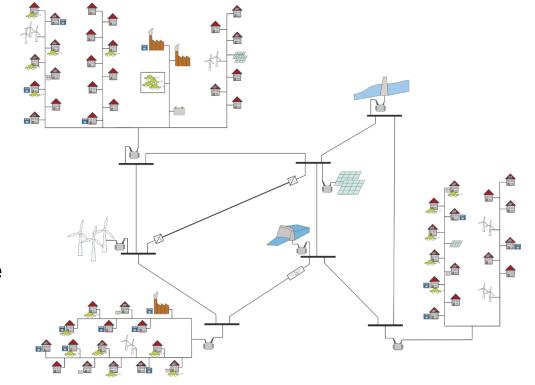




- Réseau électrique du futur
  - Production et stockage décentralisés
  - Demande flexible
  - Sens du courant variable
  - Production d'énergie renouvelable intermittente
  - Contrôle du flux de charge

Plus de variabilité et d'incertitude, mais aussi plus de flexibilité

Milliers d'unités décentralisées et contrôlables









À quoi ressemblera la structure du système énergétique du futur (décentralisé vs. centralisé) pour exploiter au mieux le potentiel de toutes les ressources?





- À quoi ressemblera la structure du système énergétique du futur (décentralisé vs. centralisé) pour exploiter au mieux le potentiel de toutes les ressources?
- Comment l'infrastructure d'un système avec autant d'«éléments mobiles» et un approvisionnement incertain peut-elle être gérée et planifiée efficacement?





- À quoi ressemblera la structure du système énergétique du futur (décentralisé vs. centralisé) pour exploiter au mieux le potentiel de toutes les ressources?
- Comment l'infrastructure d'un système avec autant d'«éléments mobiles» et un approvisionnement incertain peut-elle être gérée et planifiée efficacement?
- D'un point de vue méthodologique, quelles sont les possibilités permettant de prendre en compte des nouvelles caractéristiques lors de l'exploitation du système?





- À quoi ressemblera la structure du système énergétique du futur (décentralisé vs. centralisé) pour exploiter au mieux le potentiel de toutes les ressources?
- Comment l'infrastructure d'un système avec autant d'«éléments mobiles» et un approvisionnement incertain peut-elle être gérée et planifiée efficacement?
- D'un point de vue méthodologique, quelles sont les possibilités permettant de prendre en compte des nouvelles caractéristiques lors de l'exploitation du système?
- Quels nouveaux phénomènes ou quelles nouvelles caractéristiques pourra-t-on observer dans le réseau et comment pourront-ils être simulés et traités?





- À quoi ressemblera la structure du système énergétique du futur (décentralisé vs. centralisé) pour exploiter au mieux le potentiel de toutes les ressources?
- Comment l'infrastructure d'un système avec autant d'«éléments mobiles» et un approvisionnement incertain peut-elle être gérée et planifiée efficacement?
- D'un point de vue méthodologique, quelles sont les possibilités permettant de prendre en compte des nouvelles caractéristiques lors de l'exploitation du système?
- Quels nouveaux phénomènes ou quelles nouvelles caractéristiques pourra-t-on observer dans le réseau et comment pourront-ils être simulés et traités?



## Planification et gestion du réseau de distribution

- Gestionnaire de réseau de distribution passif
  - Charge maximale = capacité requise des lignes électriques et des transformateurs
- Gestionnaire de réseau de distribution actif
  - Considération des possibilités de maîtrise de la demande et de la production (puissance active et réactive) et de stockage local
  - ⇒Évaluation d'un renforcement du réseau par rapport à des méthodes de contrôle actif
- Projet:



Partenaires:













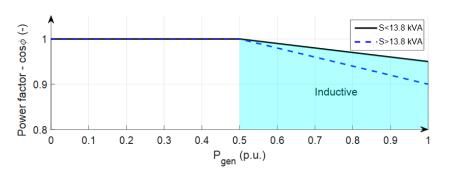


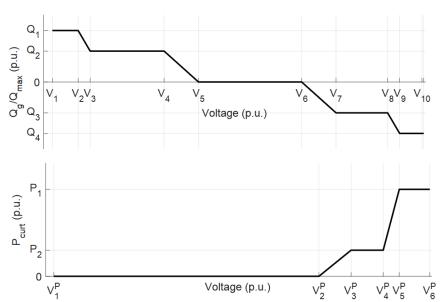


- Réglages momentanés de la production décentralisée
  - Simple, mais peut être contre-productif



- Coordination optimale mais complexe, particulièrement en temps réel
- Réglages coordonnés localement
  - Détermination des courbes sur la base de calculs d'OPF hors-ligne

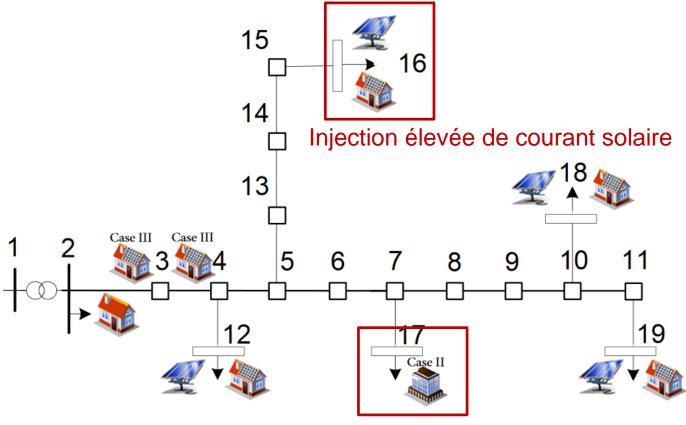








Exemple

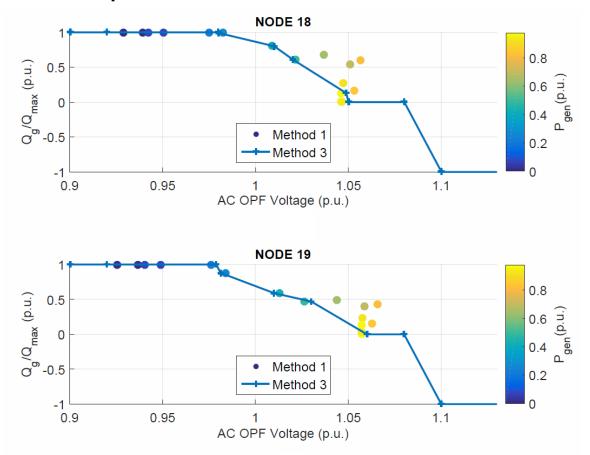


Grand consommateur





Courbes opérationnelles sur la base d'un AC OPF





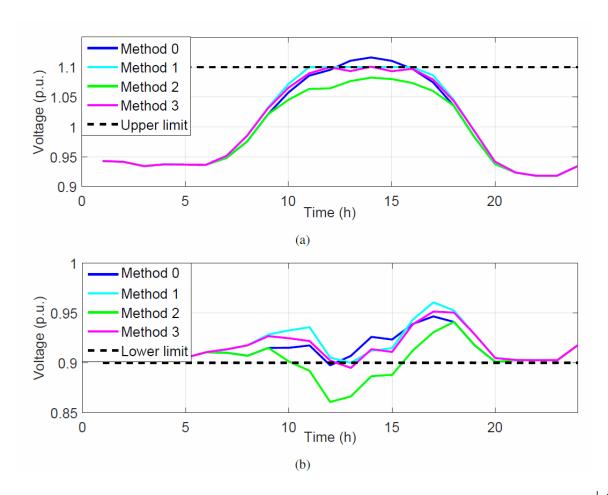


Method 0: flux de charge, pf = 1

Method 1: AC OPF centralisé avec contrôle de la puissance réactive

Method 2: flux de charge, norme allemande

Method 3: flux de charge avec courbes calculées

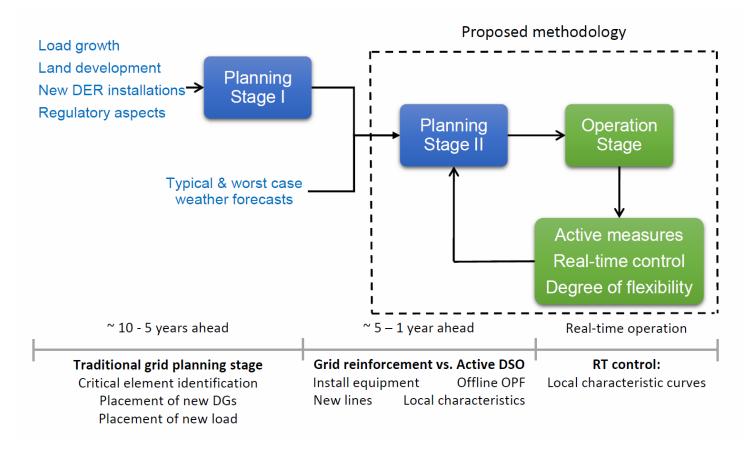






## Planification et gestion du réseau de distribution

Approche de planification







## Planification et gestion du réseau de distribution

- Conclusions
  - Des mesures opérationnelles locales mais sur mesure et coordonnées peuvent résoudre des problèmes locaux
  - La gestion du réseau détermine la façon dont celui-ci doit être développé dans le futur
  - ⇒Prochain domaine de recherche: prise en compte d'une gestion incluant la maîtrise de la demande dans la planification du réseau de distribution





- À quoi ressemblera la structure du système énergétique du futur (décentralisé vs. centralisé) pour exploiter au mieux le potentiel de toutes les ressources?
- Comment l'infrastructure d'un système avec autant d'«éléments mobiles» et un approvisionnement incertain peut-elle être gérée et planifiée efficacement?
- D'un point de vue méthodologique, quelles sont les possibilités permettant de prendre en compte des nouvelles caractéristiques lors de l'exploitation du système?
- Quels nouveaux phénomènes ou quelles nouvelles caractéristiques pourra-t-on observer dans le réseau et comment pourront-ils être simulés et traités?





### Production stochastique

- Énergie éolienne et solaire
  - contrôlable uniquement de façon limitée
  - intermittente (à court et long terme)
  - grandes variations de production en peu de temps
  - prévisible uniquement avec imprécision
- Compensation possible grâce
  - à une production contrôlable
  - aux unités de stockage
  - à la maîtrise de la demande





### **Production stochastique**

- Énergie éolienne et solaire
  - contrôlable uniquement de façon limitée
  - intermittente (à court et long terme)
  - grandes variations de production en peu de temps
  - prévisible uniquement avec imprécision
- Compensation possible grâce
  - à une production contrôlable
  - aux unités de stockage
  - à la maîtrise de la demande





#### **Production stochastique**

- Énergie éolienne et solaire
  - contrôlable uniquement de façon limitée
  - intermittente (à court et long terme)
  - grandes variations de production en peu de temps
  - prévisible uniquement avec imprécision
- Compensation possible grâce
  - à une production contrôlable
  - aux unités de stockage
  - à la maîtrise de la demande

Pour une gestion et une planification optimales, ces incertitudes doivent être prises en compte explicitement!





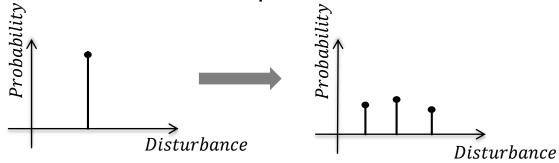
#### Pistes de solution

- Approche traditionnelle
  - Prévision de la demande nette
  - Optimisation déterministe de la feuille de route des centrales électriques sur la base de ces prévisions
  - Mise à disposition de réserves
- Optimisation stochastique
  - Intégration explicite des incertitudes dans l'élaboration de la feuille de route des centrales électriques
  - Exigeant en terme de puissance de calcul
  - Couverture de risque contre de mauvaises prévisions

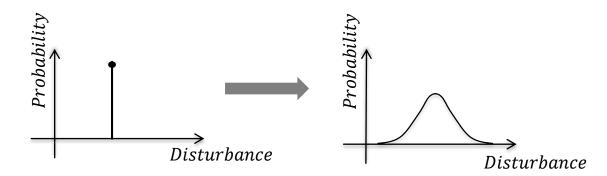




- Approches sur la base des scénarios
  - Élaboration de scénarios pour la production d'énergie intermittente
  - Optimisation déterministe à partir de ces scénarios



- Inégalité probabiliste
  - Satisfaction de l'inégalité avec une probabilité β sur la base d'une loi de probabilité donnée





- Approches sur la base des scénarios
  - Élaboration de scénarios pour la production d'énergie intermittente
  - Optimisation déterministe à partir de ces scénarios

$$\min E(f(x_s)) = \sum_{s=1}^{S} p_s \cdot f(x_s)$$
s.t.  $g_s(x_s) = 0, s = 1, ..., S$ 
 $h_s(x_s) \le 0, s = 1, ..., S$ 

- Inégalité probabiliste
  - Satisfaction de l'inégalité avec une probabilité β sur la base d'une loi de probabilité donnée

min 
$$f(x)$$
  
s. t.  $g(x) = 0$   
 $h(x) \le 0$   
 $\Pr\{p(x,\xi) \le 0\} \ge \beta$ 



- Approches sur la base des scénarios
  - Élaboration de scénarios pour la production d'énergie intermittente
  - Optimisation déterministe à partir de ces scénarios

$$\min E(f(x_s)) = \sum_{s=1}^{3} p_s \cdot f(x_s)$$
s.t.  $g_s(x_s) = 0, s = 1, ..., S$ 
 $h_s(x_s) \le 0, s = 1, ..., S$ 

- Inégalité probabiliste
  - Satisfaction de l'inégalité avec une probabilité β sur la base d'une loi de probabilité donnée

$$\min_{\substack{f(x)\\ s.\,t.\ g(x)=0\\ h(x)\leq 0\\ \Pr\{p(x,\xi)\leq 0\}\geq \beta}} \Pr\{p(x,\xi)\leq 0\} = \Phi_p(0)\geq \beta$$



- Approches sur la base des scénarios
  - Élaboration de scénarios pour la production d'énergie intermittente
  - Optimisation déterministe à partir de ces scénarios

$$\min E(f(x_s)) = \sum_{s=1}^{S} p_s \cdot f(x_s)$$
s.t.  $g_s(x_s) = 0, s = 1, ..., S$ 
 $h_s(x_s) \le 0, s = 1, ..., S$ 

- Inégalité probabiliste
  - Satisfaction de l'inégalité avec une probabilité β sur la base d'une loi de probabilité donnée

min 
$$f(x)$$
  
 $s.t.$   $g(x) = 0$   
 $h(x) \le 0$   
 $Pr\{p(x, \xi) \le 0\} \ge \beta$ 

$$Pr(p(x,\xi) \le 0) = \Phi_p(0) \ge \beta$$

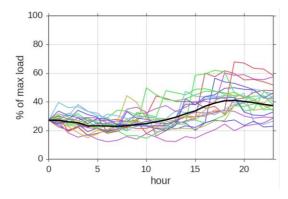
Dans le cas d'une loi normale:

$$\left(\frac{0-\mu'}{\sigma'}\right) \ge \Phi^{-1}(\beta)$$



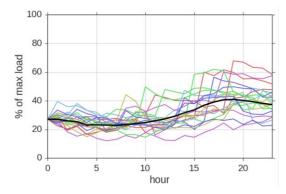


- Model Predictive Control stochastique
  - Scénarios

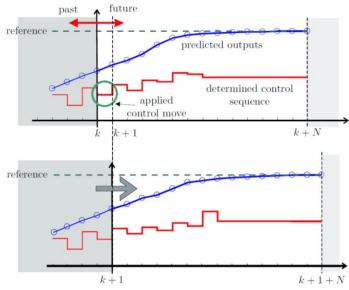




- Model Predictive Control stochastique
  - Scénarios



Problème d'optimisation

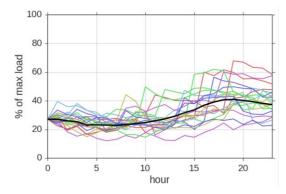




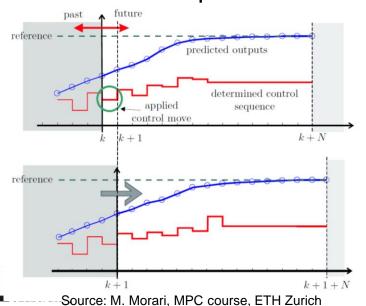
1 18



- Model Predictive Control stochastique
  - Scénarios

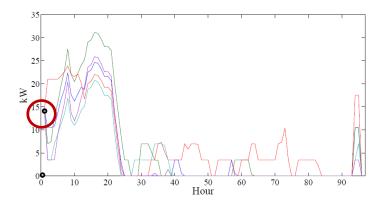


Problème d'optimisation



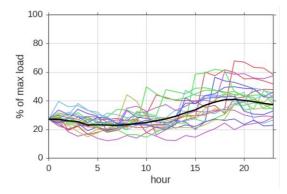
Plusieurs scénarios



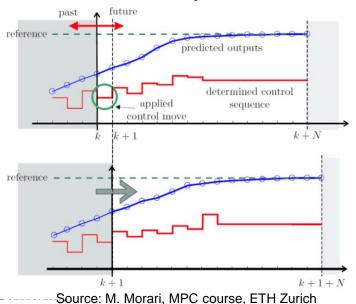




- Model Predictive Control stochastique
  - Scénarios

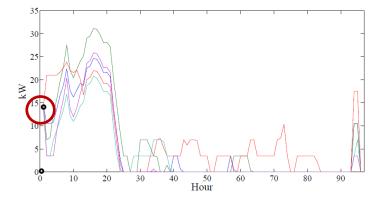


Problème d'optimisation



Plusieurs scénarios



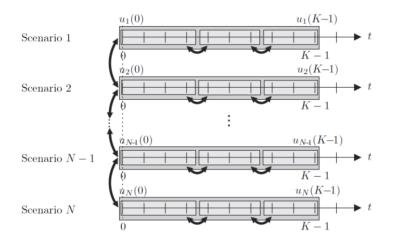


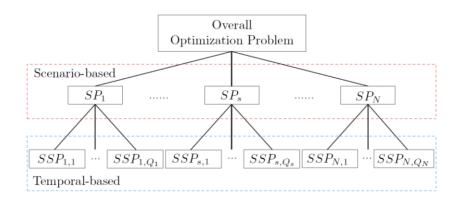
Grand problème d'optimisation!

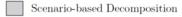




- Possibilités de calcul en parallèle
  - Parallélisation selon le scénario
  - Parallélisation sur une base temporelle







Temporal-based Decomposition

Complicating Constraints





#### Exemple

- Gestion optimisée des unités de stockage
- Les scénarios correspondent aux courbes de production d'éoliennes (40 scénarios)
- Système à 39 noeuds, horizon de 4 heures avec résolution de 5 minutes

#### Résultats

Cases	Total $\#$ of	Total $\#$ of	Total $\#$ of	Wall Time	Est. Time in sec.
	Major Iter.	Minor Iter.	GMRES Iter.	in sec.	for Par. Computing
BF	262	-	-	1,864.32	1,864.32
BD	3	12,720	-	2,856.07	57.12
OCD	234	-	1,780	1,901.33	38.03
2OCD	193	-	20,159	8,079.91	53.87
MD	3	14,848	110,802	3,228.37	10.76





- Conclusions
  - De nouvelles formulations et approches numériques permettent l'intégration d'incertitudes dans les problèmes d'optimisation
  - La création de certaines variables stochastiques peut conduire à de mauvais résultats mais elles permettent en moyenne de mieux se prémunir contre des prévisions incertaines
  - ⇒Prochain domaine de recherche: Méthodes performantes qui ne reposent pas sur des scénarios mais sur des soit-disant «noisy gradients»



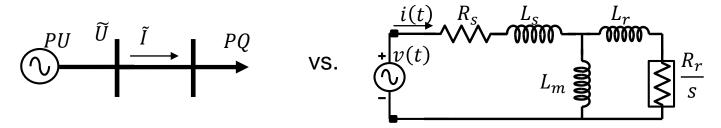


- À quoi ressemblera la structure du système énergétique du futur (décentralisé vs. centralisé) pour exploiter au mieux le potentiel de toutes les ressources?
- Comment l'infrastructure d'un système avec autant d'«éléments mobiles» et un approvisionnement incertain peut-elle être gérée et planifiée efficacement?
- D'un point de vue méthodologique, quelles sont les possibilités permettant de prendre en compte des nouvelles caractéristiques lors de l'exploitation du système?
- Quels nouveaux phénomènes ou quelles nouvelles caractéristiques pourra-t-on observer dans le réseau et comment pourront-ils être simulés et traités?





- Motivation
  - Les méthodes de calcul du flux de charge se basent sur des modèles de la puissance active et réactive (P et Q); les simulations en régime transitoire sont cependant effectuées comme la simulation d'un circuit électrique sous la forme de courants et de tensions (I et U)
  - ⇒ Les résultats finaux ne concordent pas



- Augmentation des composants d'électronique de puissance dans le réseau électrique => correspondent à des circuits électriques
- Les mesures dans le réseau électrique sont réalisées sur la base du courant et de la tension



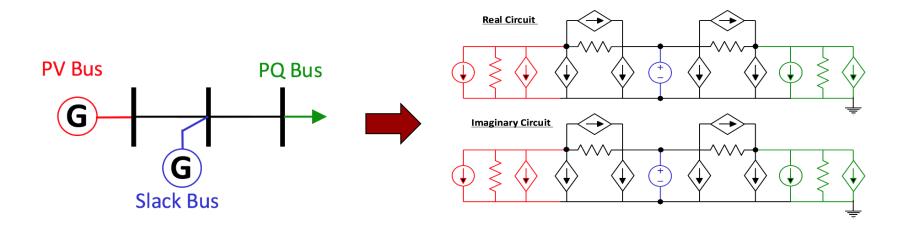


- Qu'obtient-on si l'on effectue toute la modélisation en fonction du courant et de la tension?
  - Application de dizaines d'années de recherche en simulation de réseaux électriques (SPICE)
  - Modélisation de la demande plus proche des caractéristiques réelles de la demande
  - Simulation performante et exacte des nouvelles technologies qui reposent sur l'électronique de puissance
  - ⇒ Les nœuds PU rendaient une telle formulation difficile jusqu'à présent





- Approche Split-Circuit
  - Modélisation des équations de flux de charge en tant que circuits électriques couplés
  - N'importe quels modèles physiques peuvent être intégrés
  - Très robuste, en particulier par rapport aux valeurs de départ



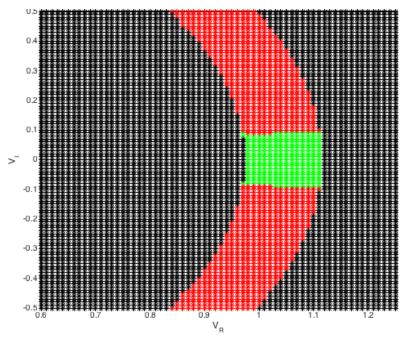
PCT/US2015/049700 – Systems, Methods and Software for Planning, Simulating and Operating Electrical Power Systems, Pileggi, Bromberg, Li, Hug and Jereminov. **Patent Pending.** 



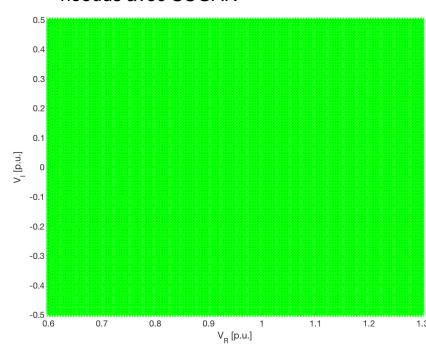


Robuste par rapport au point de départ

Convergence pour un système à 9241 noeuds avec un logiciel largement répandu



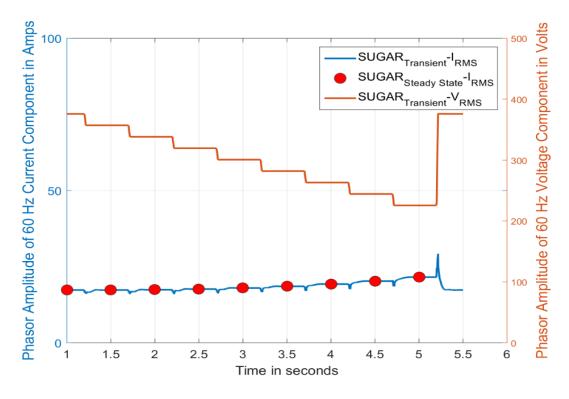
Convergence pour un système à 9241 noeuds avec SUGAR







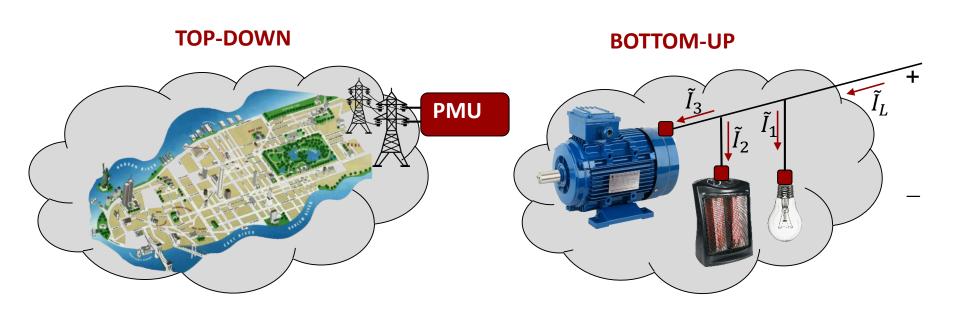
- Résultats homogènes
  - les simulations en régime transitoire et stationnaire montrent des résultats homogènes







- La formulation permet une intégration directe aussi bien des modèles Top-Down que Bottom-Up
  - Top-Down: sur la base de mesures et d'information historique
  - Bottom-Up: sur la base d'équations physiques







- Conclusions
  - Les nouvelles technologies nécessitent de nouvelles approches de modélisation et de simulation pour représenter au mieux leurs caractéristiques
  - Les logiciels de simulation comme SUGAR permettent une simulation performante et précise du réseau du futur

⇒ Prochain domaine de recherche: Élargissement à d'autres applications dont l'optimisation





#### Bilan

#### Prémisse

 Les centrales nucléaires et les producteurs d'énergie fossile dans le réseau électrique sont progressivement remplacés par des sources d'énergie renouvelable (éolien, solaire)

#### Conclusions

- De nouvelles méthodes et approches mathématiques sont nécessaires pour pouvoir intégrer de manière fiable un nombre croissant de sources d'énergie renouvelable intermittentes
- Une coordination efficace de toutes les parties prenantes dans le réseau concernant sa gestion et sa planification est indispensable pour profiter pleinement de toutes les possibilités techniques
- L'étude du réseau électrique en tant que système global est primordiale





## Merci pour votre attention!

