

## Soirée de remise des prix 2019

Le bureau français de l'IEEE PES vous convie à la soirée annuelle de remise des prix des doctorants et ingénieurs de l'année 2019.

Nous débuterons par la remise des prix des « outstanding engineers » à Yannick Kieffel pour ses travaux sur les alternatives éco-responsables au gaz isolant SF<sub>6</sub> et à Mathieu Caujolle pour ses contributions sur la modélisation et la co-simulation des smart-grids. Ils présenteront leurs derniers travaux sur ces thèmes.

Nous poursuivrons avec les trois lauréats doctorants de l'année dont les exposés seront introduits par les responsables industriels qui viendront expliciter les enjeux des thèses.

Ahmed Zama présentera ses [travaux](#) sur la modélisation et le contrôle des convertisseurs AC/DC modulaires multi-niveaux (MMC) pour des applications dans le transport d'électricité en courant continu à très haute tension (HVDC).

Olivier Borne enchainera sur une présentation de sa [thèse](#) sur les services de flexibilités pouvant être apportés par le Vehicle-To-Grid : depuis la solution technique jusqu'à la construction de modèles d'affaire.

Nuno Marinho conclura par l'exposé de nouvelles [méthodes](#) de réduction de modèles de système électrique pour des études technico-économiques.

### Organisation et Parrainage

- Chapitre français de l'IEEE PES (Power & Energy Society)
- Avec l'appui de la SEE (Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication) – Club technique « Systèmes électriques »

### Lieu

RTE – Immeuble Window  
7C, place du Dôme, Paris - La Défense  
RER A / Métro ligne 1 – Station : La Défense Gde Arche



**Mercredi 9 octobre 2019  
de 17h30 à 19h30**

**RTE – Immeuble Window**

**7C, place du Dôme  
Paris - La Défense**

**17h30**

#### **Accueil et introduction**

Sébastien Henry (*IEEE PES France*)

#### **Outstanding engineers 2019**

**17h35**

**Yannick Kieffel (General Electric),  
Alternatives éco-responsables au  
gaz isolant SF<sub>6</sub>**

**17h55**

**Mathieu Caujolle (EDF),  
Modélisation et co-simulation des  
smart-grids**

#### **Doctorants 2019**

**18h15**

**Ahmed Zama (G2ELab, Grenoble  
INP)**

**Modélisation et contrôle des  
convertisseurs modulaires  
multi-niveaux (MMC) HVDC**

**18h40**

**Olivier Borne (CentraleSupélec)  
Services de flexibilité apportés par  
le Vehicle-To-Grid**

**19h05**

**Nuno Marinho (CentraleSupélec)  
Réduction d'un modèle de  
système électrique pour des  
études technico-économiques**

**19h30**

**Pot de l'amitié**

### Inscription et Renseignements

Inscription en ligne gratuite : <http://bit.ly/1gNuQWb>

Après la soirée, les présentations sont disponibles sur  
<http://ewh.ieee.org/r8/france/pes/>



# $g^3$ : Tomorrow's SF<sub>6</sub>-Free Standard for HV Equipment

**Yannick KIEFFEL**

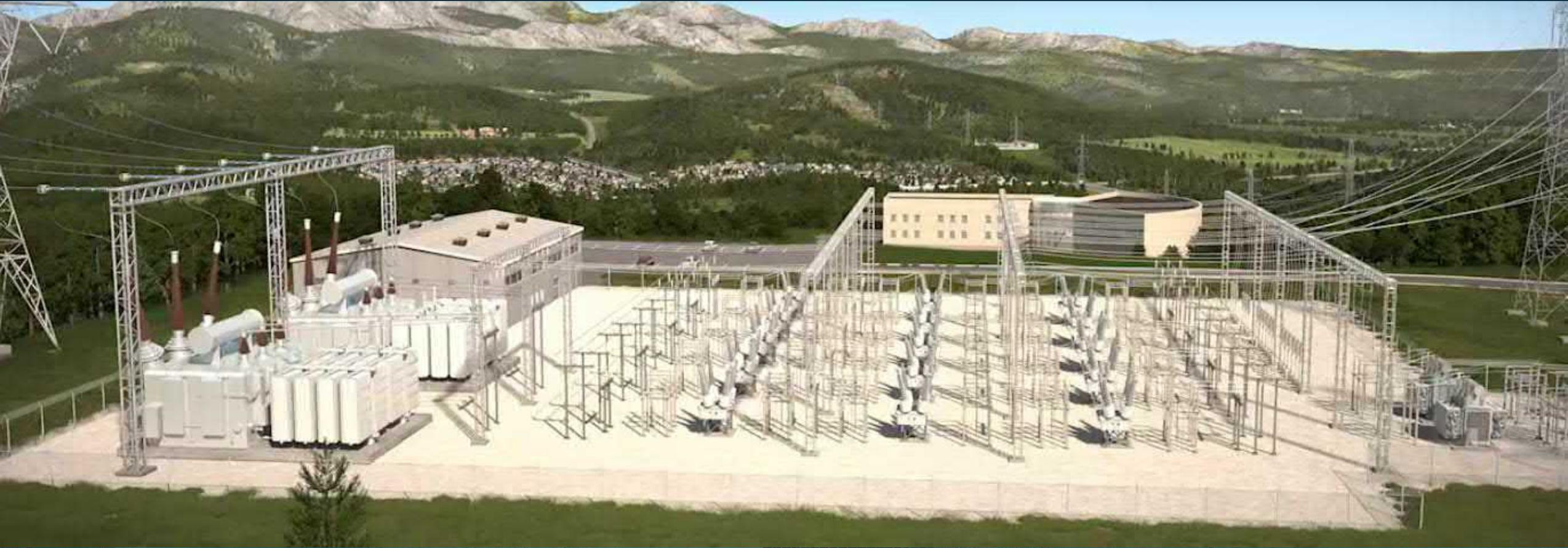
09/10/2019



**Mercredi 9 octobre 2019**  
de 17h30 à 19h30  
RTE – Immeuble Window  
7C, place du Dôme  
Paris - La Défense



# Context



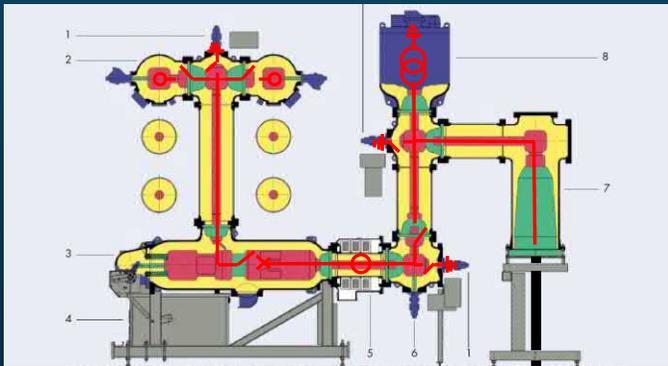
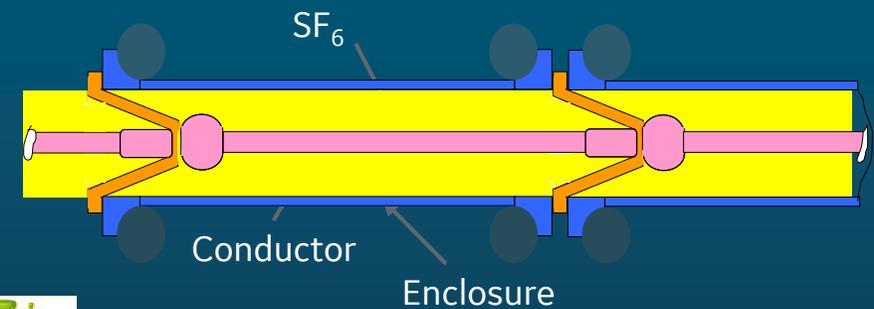
**High voltage substation**

# Context

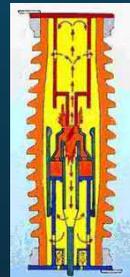
## Where & How we use SF<sub>6</sub> ?

SF<sub>6</sub> is a gas with excellent electric insulating properties.

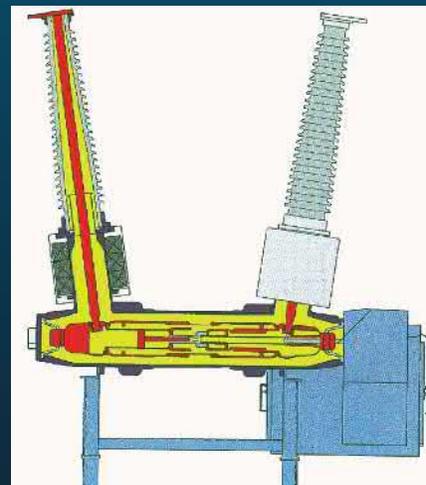
Used for **insulation & interruption of currents** in substations.



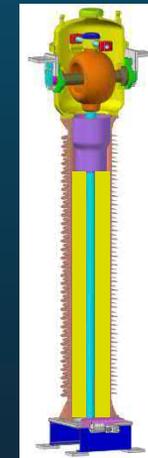
**GIS**



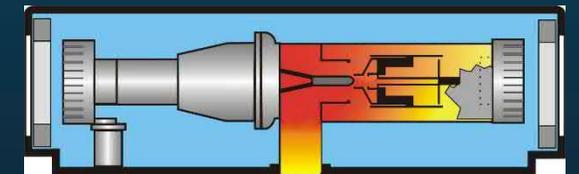
**LT**



**DT**



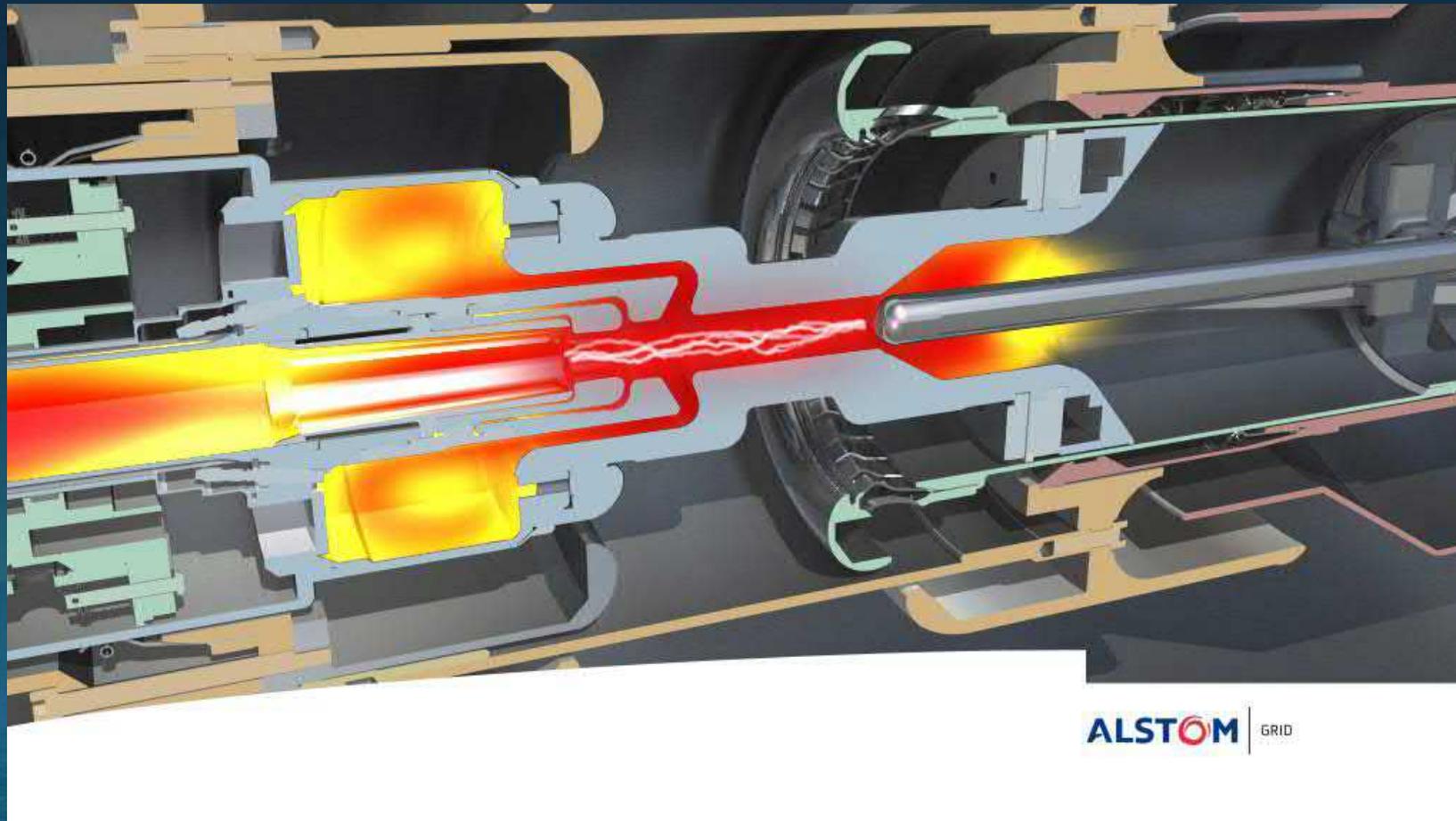
**ITR**



**GCB**

SF<sub>6</sub> is currently used across all High Voltage Switchgear portfolio

# Context

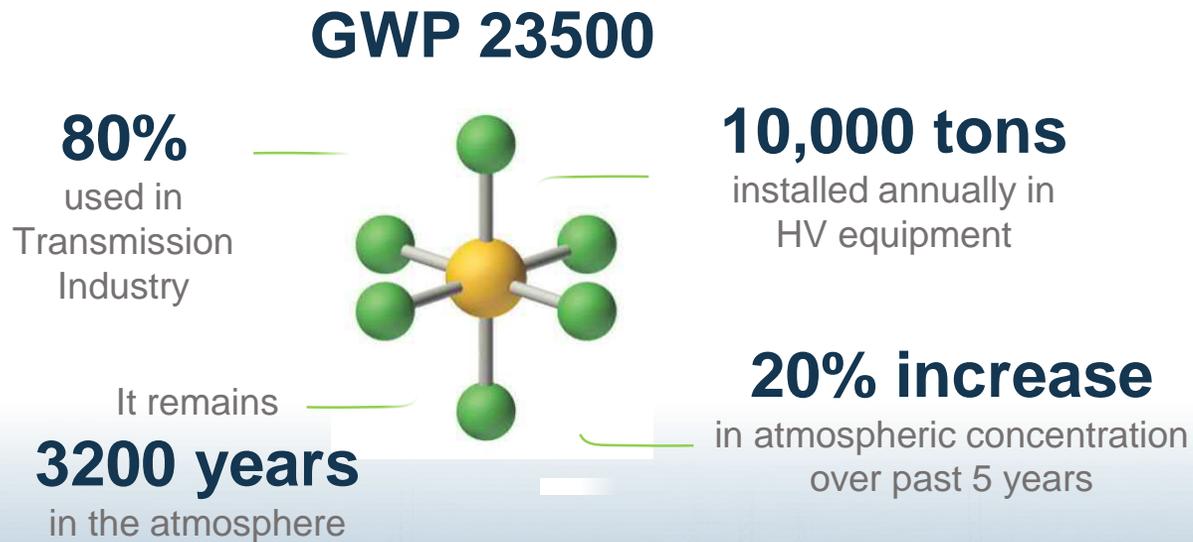


**SF<sub>6</sub> is key to the electrical transmission industry,  
However, it is a greenhouse gas with a strong global warming potential**



# Context

## SF<sub>6</sub>: SIGNIFICANT ENVIRONMENTAL IMPACT



## SF<sub>6</sub> REGULATION

- ✧ 1997 : Kyoto protocol, SF<sub>6</sub> listed as GHG
- ✧ 1999: US EPA SF<sub>6</sub> emission reduction
- ✧ 2006 EU F-gas regulation
- ✧ 2007 California global warming solution act
- ✧ 2009 COP15 Copenhagen reduce GHG emissions by 40 to 70% by 2050 (vs 2010)
- ✧ 2015 COP21 Paris : 196 countries commit to reduce their GHG emissions
- ✧ EU target to cut GHG emissions -20% by 2020, -40% by 2030, -80% by 2050

**SF<sub>6</sub> is key to the electrical transmission industry,  
However, it is a greenhouse gas with a strong global warming potential**



# What is g<sup>3</sup>



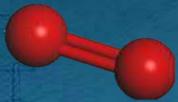
## ⚡ A gas mixture made of :



- (CF<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CFCN, 3M™ Novec™ 4710 Insulating Gas: provides the dielectric strength.



- CO<sub>2</sub> handles the arc interruption process.



- O<sub>2</sub> Oxygen helps reducing carbon and CO generation in arcing condition.

## ⚡ Main characteristics:

- Low GWP : > 99 % CO<sub>2</sub>e reduction versus SF<sub>6</sub>
- Dielectric performance: 100 % of SF<sub>6</sub> by selecting adequate Novec 4710 ratio and pressure
- Application: -25/-30 oC and all voltage levels
- Toxicity: Same toxicity class like SF<sub>6</sub> (new and polluted gas)
- Material compatibility: compatible with the standard materials used in high-voltage equipment
- Non-flammable (like SF<sub>6</sub>)
- Chemically stable : no degradation up to 700 oC
- EU Reach registration : done
- Same dimensions as for SF<sub>6</sub> products
- Technical performance similar to today's SF<sub>6</sub> products

# g<sup>3</sup> – Gas handling tools



## Gas carts for gas filling, recovery and topping-up



## Gas quality check (humidity, ratio)



## Gas leakage detection



## PPE

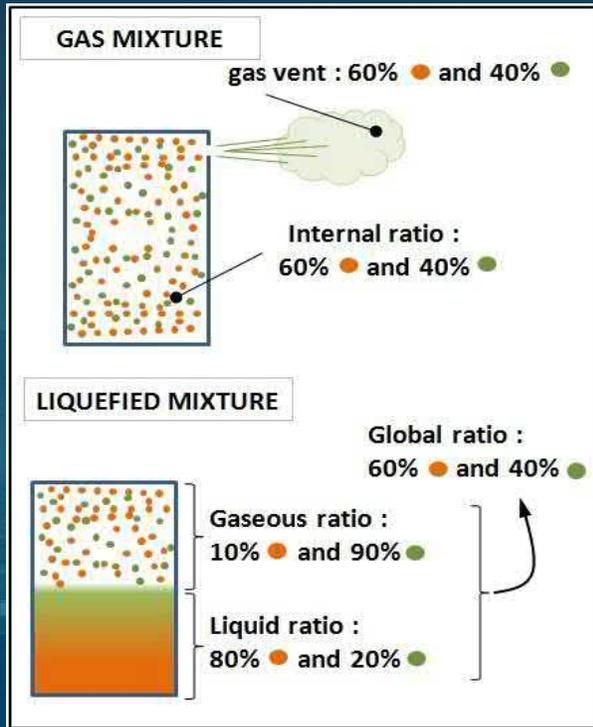


Complete set of tools developed to handle and check the gas safely and efficiently



# Gas handling tools

- How to deliver liquefied gas mixture on site and to fill equipment with homogeneous gas.
- → To use the supercritical phase of the mixture



# Return of experience at Sellinge, 420 kV GIL

## Return of experience at Sellinge, 420kV GIL

- Heating of the liquid  $g^3$  delivered on site to reach the supercritical state of  $g^3$  in order to have an homogeneous gas mixture
- The technologie can be used indoor or outdoor, even in harsh condition.
- Gas quality measurement on site.



HEATING BELT

# Applications - Portfolio

**GAS-INSULATED LINES**  
420 kV



**-99.3 %**

CO<sub>2</sub> equivalent of  
installed gas mass

For -25°C application

**GAS-INSULATED  
SUBSTATIONS**  
145 kV



**-99.1 %**

CO<sub>2</sub> equivalent of  
installed gas mass

For -25°C application

**AIS INSTRUMENT  
TRANSFORMERS**  
123 kV & 245 kV



**-99.2 %**

CO<sub>2</sub> equivalent of  
installed gas mass

For -30°C applications

**AIS  
CIRCUIT-BREAKERS**  
145 kV



**-99.3 %**

CO<sub>2</sub> equivalent of  
installed gas mass

For -30°C applications



# g<sup>3</sup> Adoption



## 16 LEADING UTILITIES

Have decided to install equipment with g<sup>3</sup>

**g<sup>3</sup> Gas-Insulated Lines**  
420 kV, -25 °C  
**5 sites – 2033 meters**

**g<sup>3</sup> Gas-Insulated Substations**  
145 kV, -25 °C  
**12 sites – 70 bays**

**g<sup>3</sup> AIS – Instrument Transformers**  
up to 245 kV, -30 °C  
**3 sites – 6 CT – 3 CMU**

**g<sup>3</sup> AIS – Live Tank CB**  
123 kV, -30 °C  
**1 sites – 2 LT**



# 63 kV GIS, RTE, France



Le réseau  
de transport  
d'électricité

## 7 bays of 72,5 kV g<sup>3</sup> GIS at Grimaud Substation



**Year of order: 2017 – Commissioning : Sept. 2019**

	in tons of CO <sub>2</sub> e
<b>CO<sub>2</sub>e reduction of installed gas masses</b>	17,750
<b>CO<sub>2</sub>e reduction of emissions over 40 years</b>	8,880



# Environmental Wins



## g<sup>3</sup> Global Projects

### ENVIRONMENTAL IMPACT

Global Warming Potential (GWP) of total installed gas masses reduced by

**>386,000 tons CO<sub>2</sub>e**

---

**>82,000 tons CO<sub>2</sub>e**

prevented from entering the atmosphere over 40-yr operational period

Calculation based on multiplying GWP in carbon equivalent by tons of installed gas mass.  
Calculation based on gas emission rate of 0.5% over 40 year lifetime:  $(\text{GWP SF}_6 * 0.5 * 40) - (\text{GWP g}^3 * 0.5 * 40)$



# Standardization is moving forward



*SF<sub>6</sub> became the main insulating and switching medium for High Voltage equipment*



Existing IEC and IEEE standards are not specific to SF<sub>6</sub> but need adaptations for alternative gases



Kista meeting – creation of Ad-Hoc group to review IEC standards

Start revision of IEC 62271-4

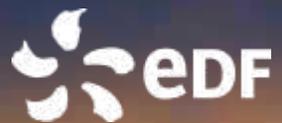
Technical report on impact of alternative gases on existing standards (PES-TR64) + creation of 2 new WG

3 Working Groups (A3.41, B3.45, D1.67)  
1 new brochure TB730

**Growing activity to adapt existing standards**







# *Modélisation et Co-Simulation des Smart-Grids*

**Mathieu CAUJOLLE**

**EDF R&D**

**2019.10.09**

# EDF, un leader de la transition énergétique



**1900** salariés en France  
**225** salariés hors de France



**29** nationalités représentées  
**117** doctorants



**13** laboratoires communs avec des partenaires



**9** centres en France et à l'étranger

## 4 PRIORITÉS STRATÉGIQUES

en cohérence avec le projet CAP 2030 du Groupe EDF



### PRÉPARER

les systèmes et réseaux électriques de demain



### DÉVELOPPER & EXPÉRIMENTER

de nouveaux services énergétiques pour les clients



### CONSOLIDER ET DÉVELOPPER

des mix de production compétitifs et décarbonés



**SOUTENIR** le développement du Groupe à l'international en tissant des partenariats de recherche

# EDF, un leader de la transition énergétique

## PRÉPARER LES SYSTÈMES ET RÉSEAUX ÉLECTRIQUES DE DEMAIN

- Optimiser la durée de vie des infrastructures des réseaux électriques
- Contribuer à la réussite des projets de compteurs communicants
- Développer des outils de pilotage avancés des systèmes électriques
- Concevoir des solutions énergétiques territoriales et les intégrer au système global

15 GW en moyens de stockage d'ici à 2035



LE PLAN  
**stockage**  
électrique

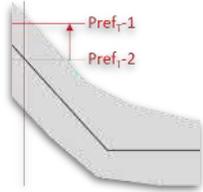
Fournisseur de 100 TWh / an  
Leader de la recharge intelligente

LE PLAN  
**MOBILITÉ**  
ÉLECTRIQUE



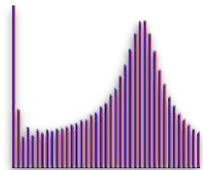
30 % de parts de marché du secteur à l'horizon 2035

# Mes contributions



Planification et nouvelles architectures

Gestion prévisionnelle et conduite



Qualité de l'alimentation

Simulation multi-domaines



Normalisation



# Planification des réseaux de distribution

De nouveaux usages connectés aux réseaux...



...nécessitant la définition de nouvelles méthodes pour évaluer et anticiper ces changements...

... et les intégrer dans les processus de planification



Affiner les hypothèses pour intégrer l'évolution des usages & des réseaux...



...pour améliorer les méthodes et les outils existants...



Et proposer de nouvelles méthodes de planification

Thèse sur la planification des réseaux BT

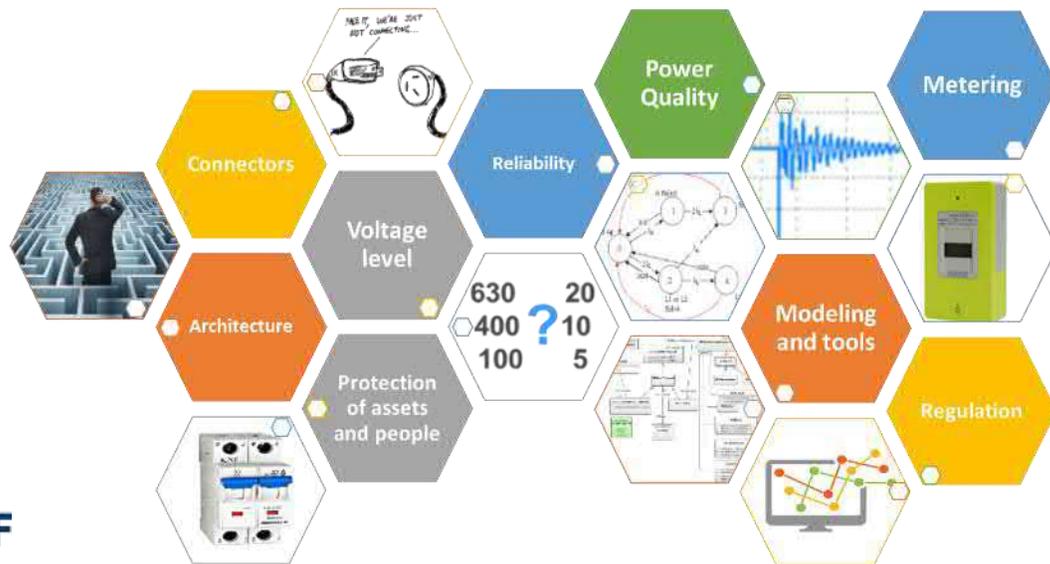
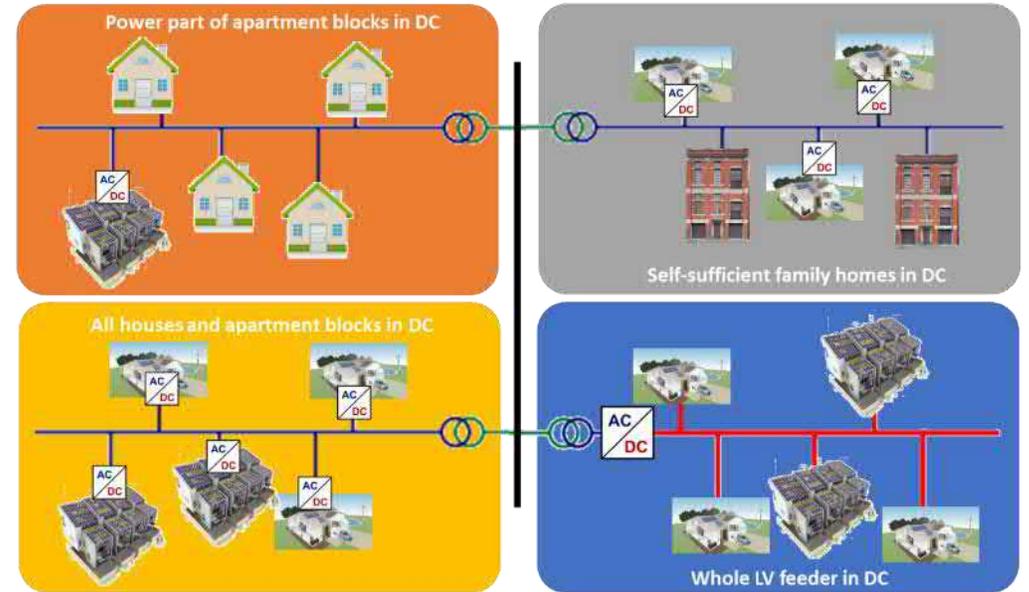




# Nouvelles architectures hybrides AC/DC

## Le courant continu, un facilitateur pour le développement des EnR et les économies d'énergie

- **Des objectifs prometteurs...**
  - Réduction des pertes
  - Intégration plus aisée du stockage, des PV et des VE
  - Réduction des coûts en équipement
- ... potentiellement applicables dans les secteurs résidentiels, tertiaires et industriels...
- ... mais de nombreuses problématiques restent à traiter

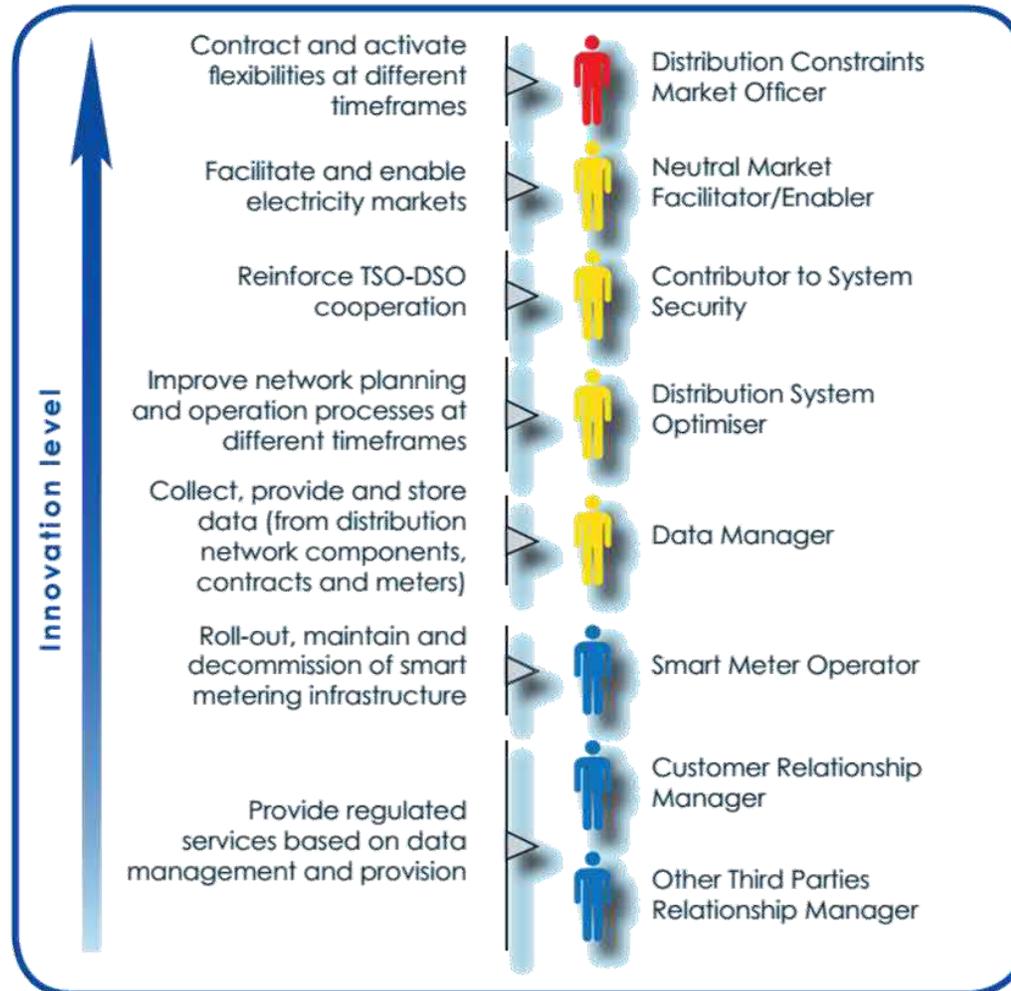


Thèse sur les protections et la qualité de fourniture des réseaux hybrides



# Gestion prévisionnelle avancée

Définir les nouveaux services systèmes de demain...



... et les mécanismes de marchés adaptés



Thèse sur les nouvelles architectures de marchés locaux

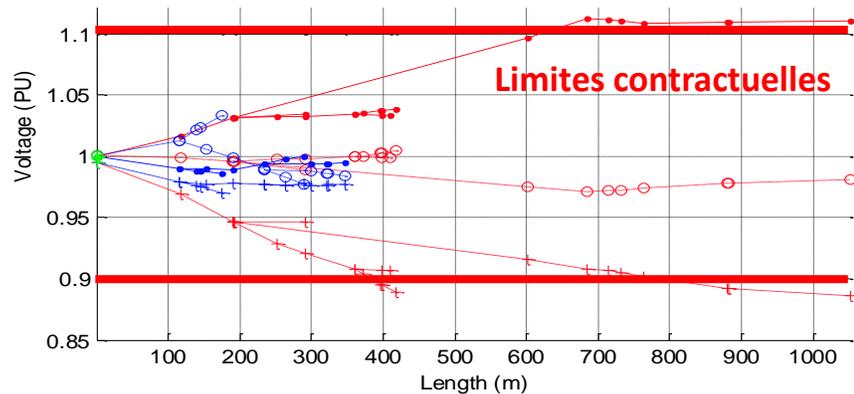


# Conduire les réseaux jusqu'en basse tension

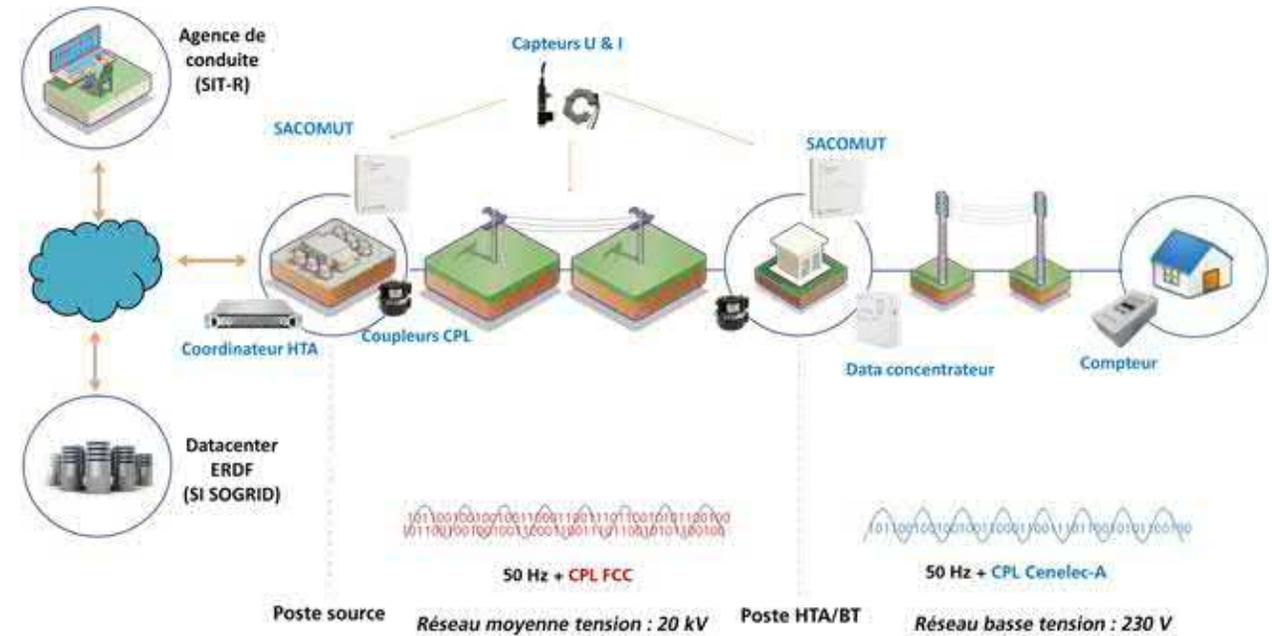


De nouvelles fonctions Smart Grid testées...

- Superviser la continuité de service
- Estimer l'état électrique du réseau



- Contrôler les flexibilités disponibles



... servies par une architecture réseau CPL HTA et BT

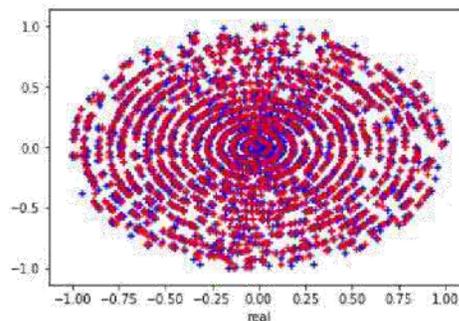
Et toujours plus de possibilités

Thèse sur l'estimation des paramètres  
des réseaux de distribution BT





# Harmoniques, perturbations complexes

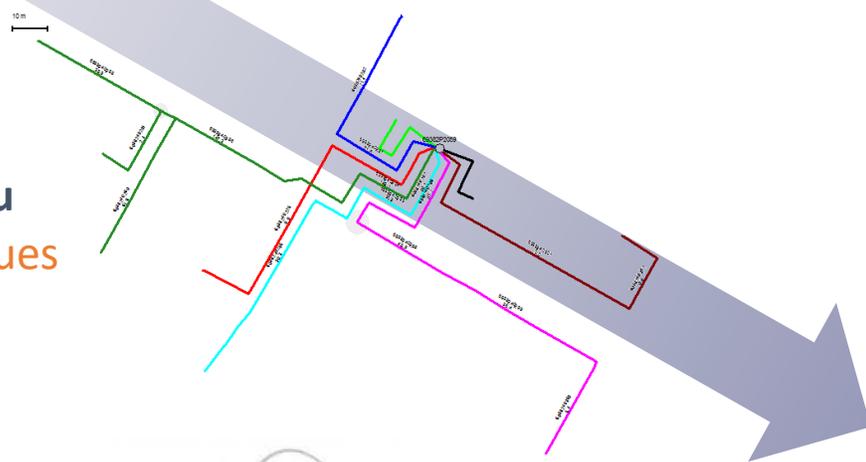


Modélisation des injections harmoniques des usages avec des techniques de machine learning

- SVr, Neural Networks, Random Forest...

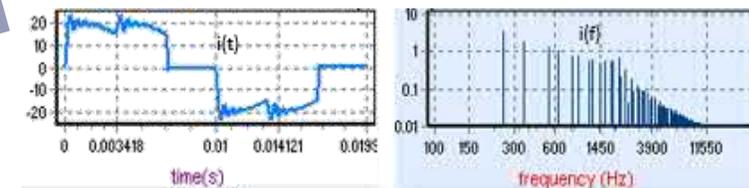
Intégration des modèles sur le réseau

- Prise en compte des problématiques de convergence



Estimation du niveau d'harmoniques

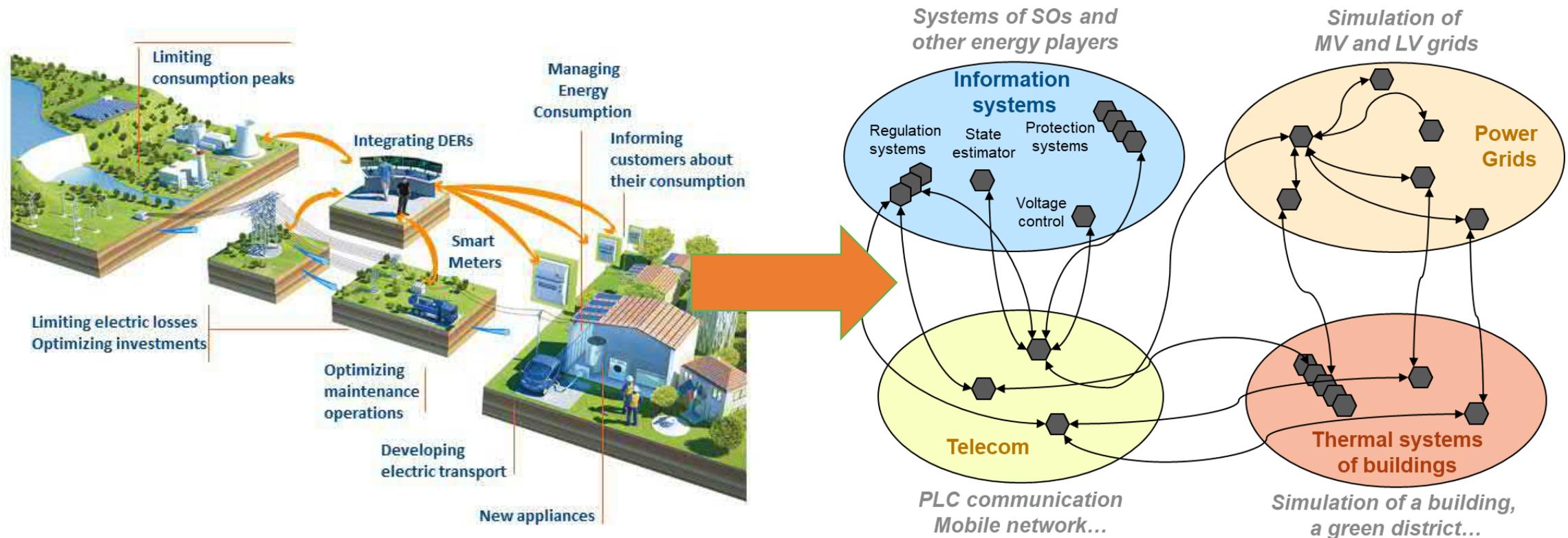
- Evaluation du foisonnement des perturbations subies et générées par les usages



Travaux en partenariat avec

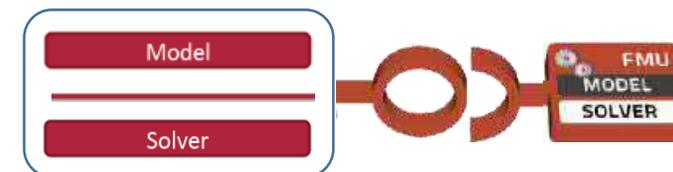


# Smart Grids, systèmes multi-physiques

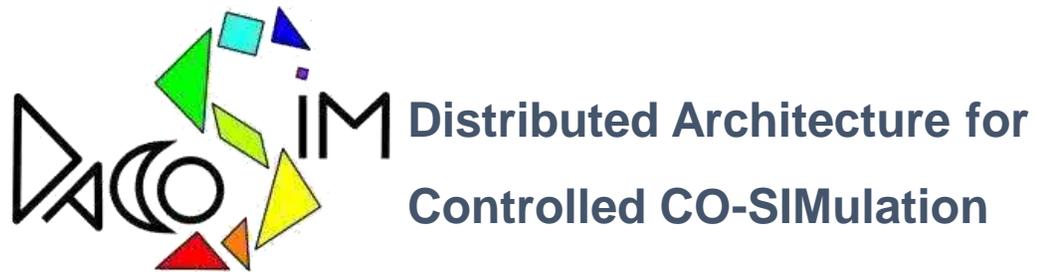


## EDF promoteur du standard « FMI for Co Simulation »

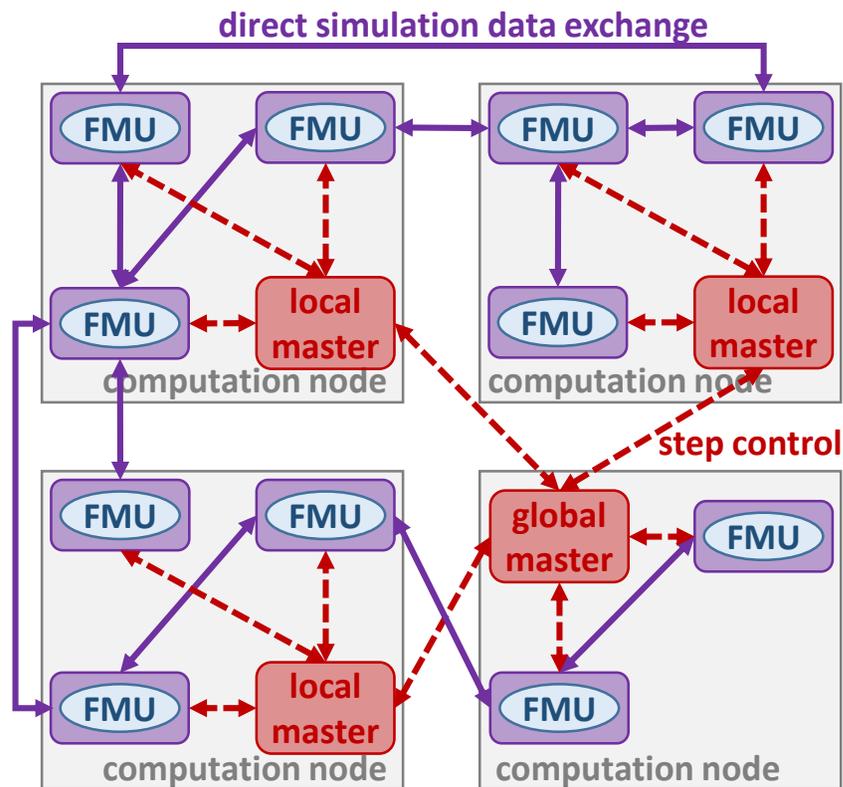
- Génération de codes exécutables de modèles
- Garantie de la protection de la propriété intellectuelle
- Adapté à la simulation à grande échelle



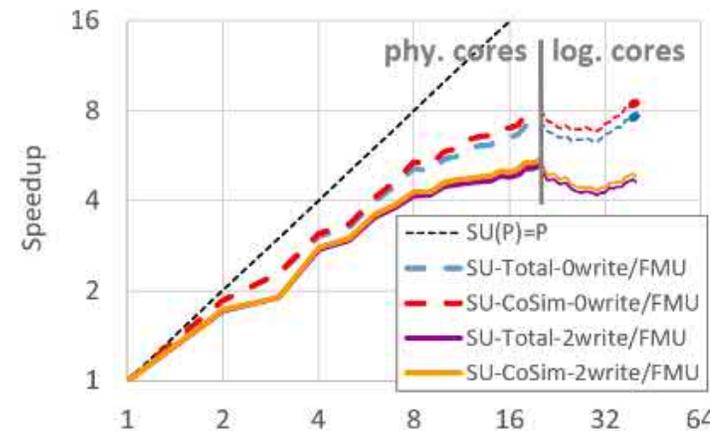
# DACCOSIM, un master de co-simulation



- Exécution locale sur un PC ou un cluster HPC
- Co-initialisation d'un système complexe
- Stratégies de simulation à pas de temps constant & adaptatif
- Détection précise des instants d'apparition d'évènements



## Accélération importante des calculs



Matryoshka  
FMU



Travaux en partenariat avec



CentraleSupélec

# Des actions de normalisation indispensables



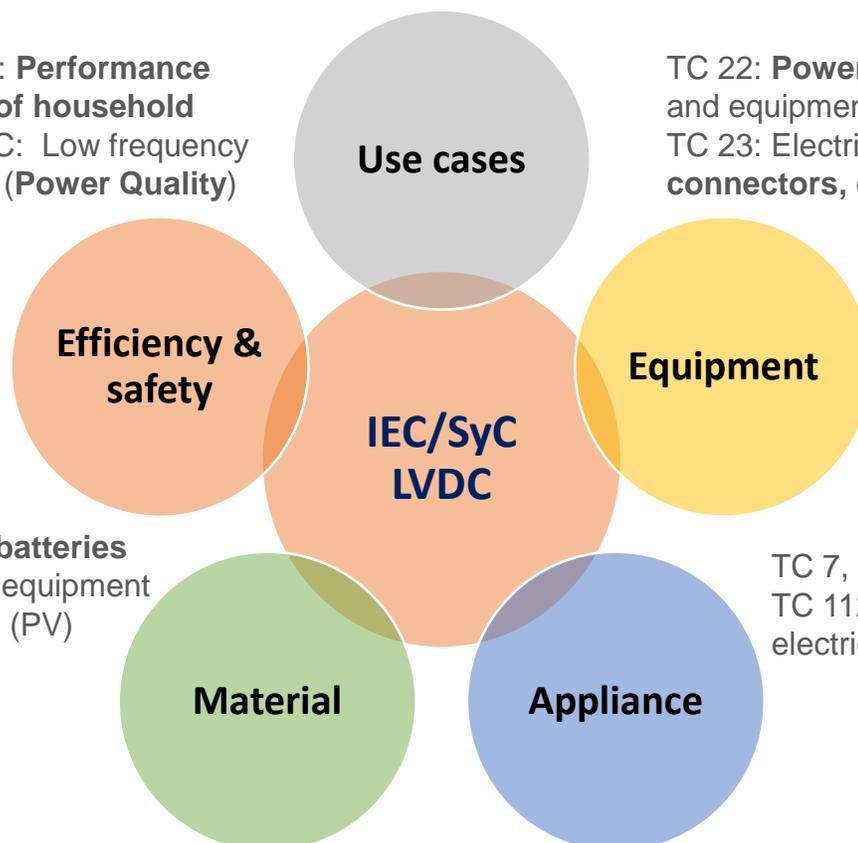
TC 8: **Systems aspects** for electrical energy supply  
 TC 57 : **Power systems management** and associated information exchange

TC 59 & 61 : **Performance and safety of household**  
 SC 77A EMC: Low frequency phenomena (**Power Quality**)

TC 22: **Power electronic systems** and equipment (converters)  
 TC 23: Electrical accessories (**plugs, connectors, circuit-breakers...**)

TC 21: Secondary **cells & batteries**  
 TC 34: **Lamps** and related equipment  
 TC 82: **Solar photovoltaic (PV)**  
 TC 69: **Electric vehicles**

TC 7, 11, 20: **Electric cables**  
 TC 112: Qualification of electrical **insulating materials**



Propositions d'évolutions pour toujours plus d'interopérabilité entre outils et de fonctionnalités de calculs



**Développer un écosystème, structurer le marché et réduire les coûts**

A landscape photograph featuring several wind turbines in a field during sunset. The sky is a mix of orange, yellow, and blue, with a flock of birds flying on the left and a tree with autumn leaves on the right. The text 'Merci !' is centered in the image.

**Merci !**



# **Modeling and Control of Modular Multilevel Converters (MMCs) for HVDC Applications**

**Dr. Ahmed ZAMA (SuperGrid Institute)**

**Soirée de remise des prix IEEE PES 2019**

09 Octobre 2019



# Agenda

## ■ Introduction Générale “Contexte de la thèse”

## ■ Contributions scientifiques de la thèse

- Modélisation des convertisseurs MMCs

- Contrôle rapide des convertisseurs MMCs

- Validations expérimentales

## ■ Conclusions et perspectives

## Introduction Générale “Contexte de la thèse”

■ Cette thèse est le fruit d’une collaboration entre l’entreprise SuperGrid Institute et son partenaire le laboratoire en génie électrique de Grenoble (G2Elab)

■ Pr. Seddik BACHA (G2Elab)

■ Dr. Abdelkrim BENCHAIB (SuperGrid Institute)

■ Dr. David FREY (G2Elab)

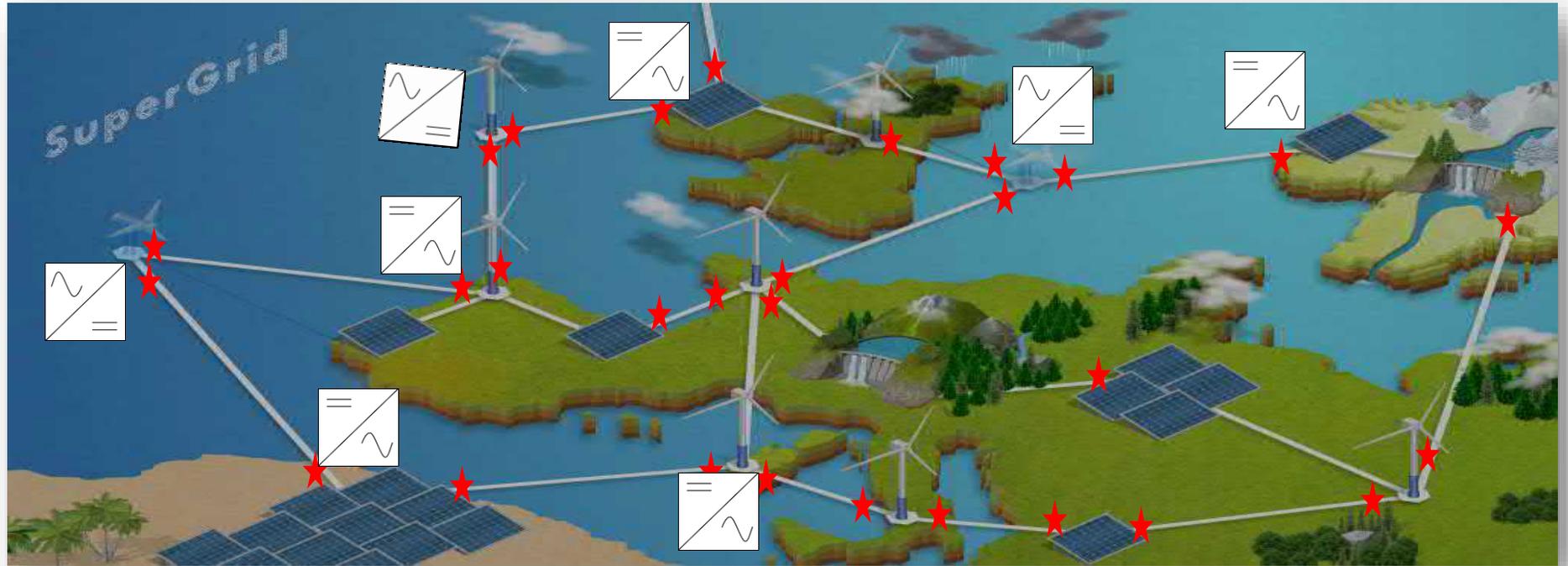
■ SuperGrid « réseau du futur »

■ Renforcement des réseaux

■ Intégration massive de sources renouvelables



## Introduction Générale “Contexte de la thèse”



- Les liaisons HVDC se sont multipliées avec le déploiement de l'éolien Off Shore et des interconnexions entre les pays
- La maîtrise de systèmes hybrides HVAC/HVDC et de systèmes DC multi-terminaux reposent fortement sur le développement des convertisseurs AC/DC

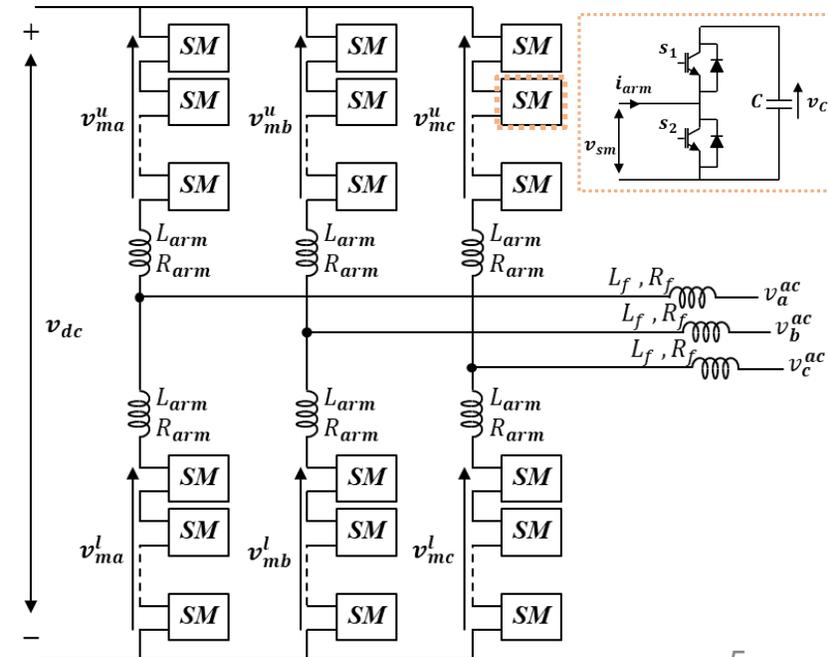
## Introduction Générale “Contexte de la thèse”

### Le convertisseur MMC « Modular Multilevel Converter » a beaucoup d'atouts pour les systèmes de transmission HVDC

- Facilité d'adapter la topologie aux différents niveaux de puissance et de tension
- Continuité de service en cas des pannes de composants
- Equilibrage simple des tensions des condensateurs

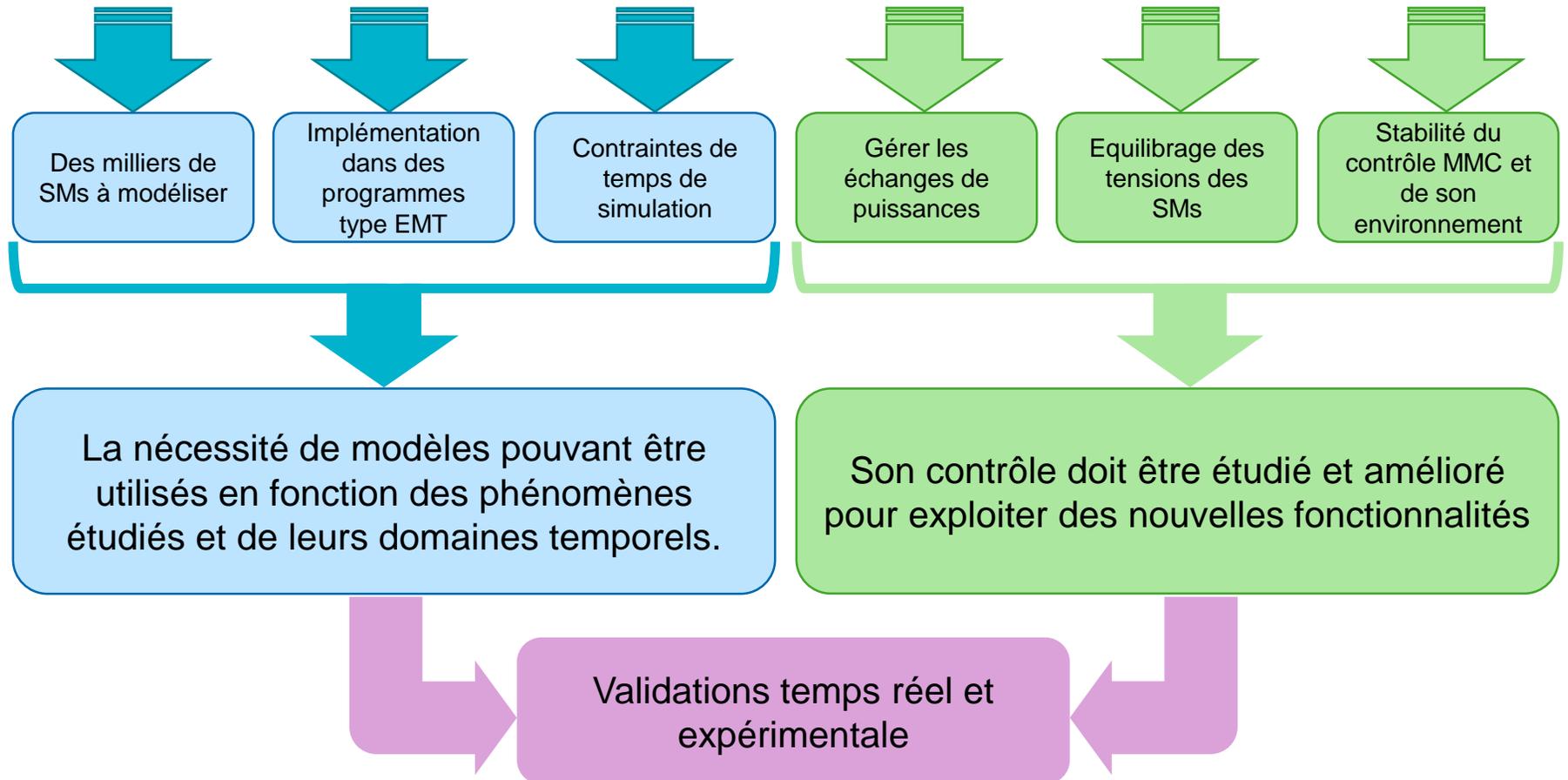
### Plusieurs projets à base des MMCs ont été conçus ou en cours de construction dans le monde

- INELFE (France - Espagne, 2015)
- Savoie Piémont (France - Italie, prévu pour fin 2019)
- et plusieurs dizaines d'autre, notamment en Chine...



## Introduction Générale “Contexte de la thèse”

Le convertisseur MMC est l'une des clés du développement pour les réseaux hybrides AC/DC.



# Agenda

■ Introduction Générale “Contexte de la thèse”

■ **Contributions scientifiques de la thèse**

■ Modélisation des convertisseurs MMCs

■ Contrôle rapide des convertisseurs MMCs

■ Validations expérimentales

■ **Conclusions et perspectives**

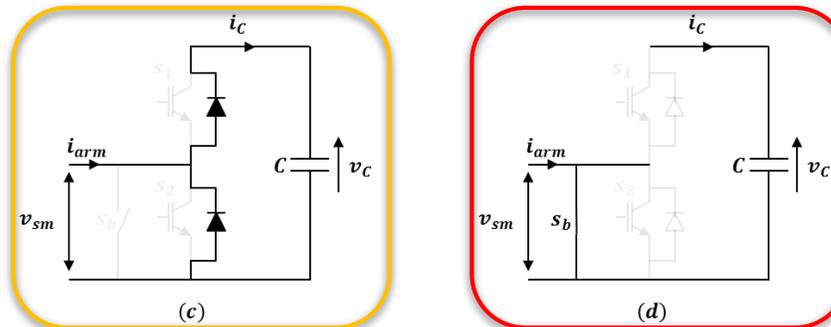
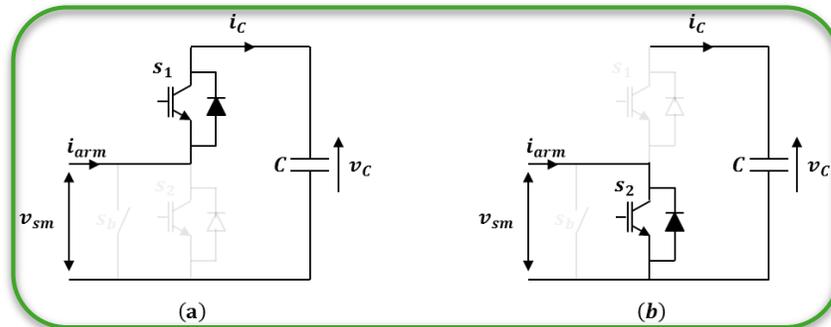


## Contributions scientifiques de la thèse

### Modélisation des convertisseurs MMCs

■ L'objectif de la thèse est de proposer des nouvelles techniques d'implémentations pour les modèles considérés afin de:

- Représenter tous les états du convertisseurs avec un modèle unique
- Faciliter leurs intégration
- Accélérer leurs temps de simulation.



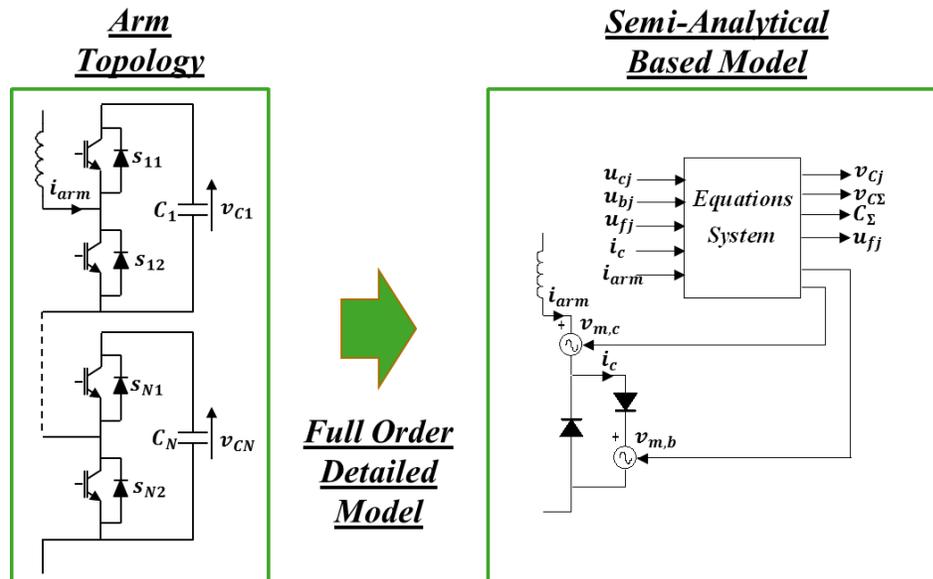
Switches states	State variables	
<b>Inverted SM (a)</b> $(s_1 = 1, s_2 = 0, s_b = 0)$	$v_{sm} \approx v_c$ $i_c = i_{arm}$	
<b>Bypassed SM (b)</b> $(s_1 = 0, s_2 = 1, s_b = 0)$	$v_{sm} \approx 0$ $v_c = cst$ $i_c = 0$	
<b>Blocked SM (c)</b> $(s_1 = 0, s_2 = 0, s_b = 0)$	$i_{arm} > 0$ $v_{sm} \approx v_c$ $i_c = i_{arm}$	$i_{arm} \leq 0$ $v_{sm} \approx 0$ $v_c = cst$ $i_c = 0$
<b>Faulted / out of order SM (d)</b> $(s_1 = 0, s_2 = 0, s_b = 1)$	$v_{sm} \approx 0$ $v_c = cst$ $i_c = 0$	

# Contributions scientifiques de la thèse

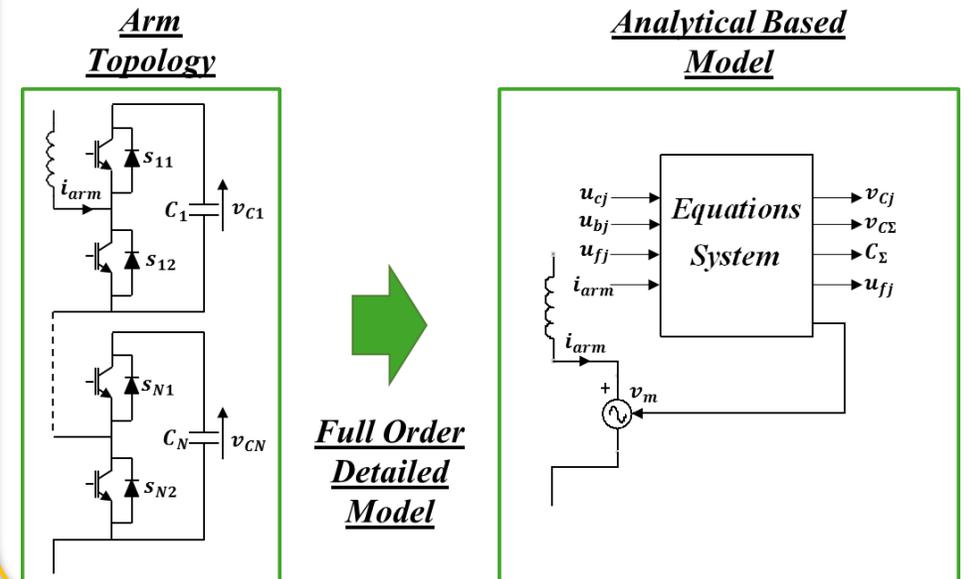
## Modélisation des convertisseurs MMCs

Deux solutions ont été investiguées dans la thèse

### Technique d'implémentation mixte (semi-analytique)



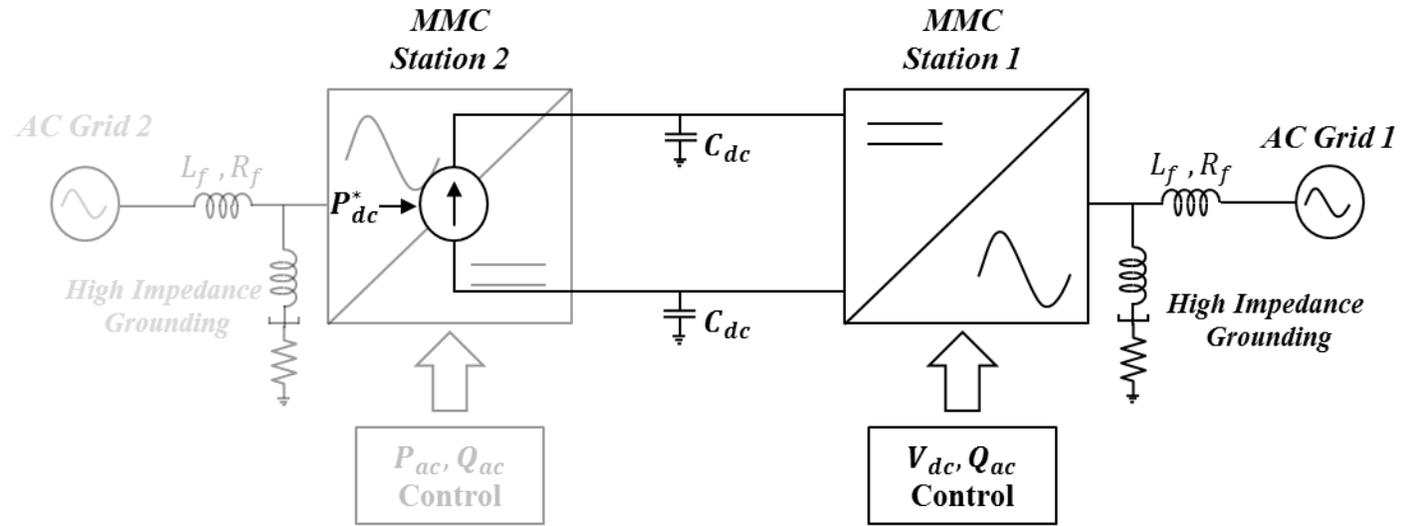
### Technique d'implémentation analytique



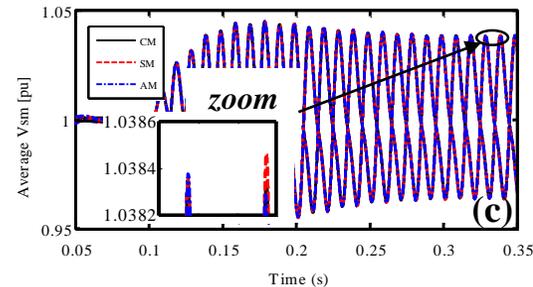
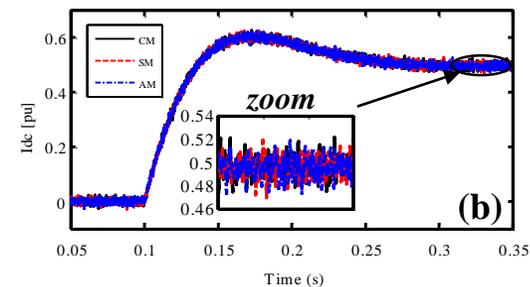
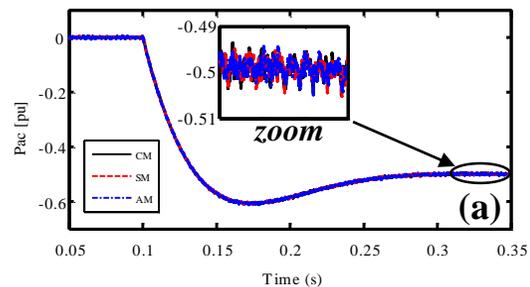
## Contributions scientifiques de la thèse

### Modélisation des convertisseurs MMCs

Les paramètres de la station MMC sont les mêmes que ceux disponibles dans la bibliothèque MMC EMTP-RV réduite à 40 SM.



Echelon de référence de puissance DC



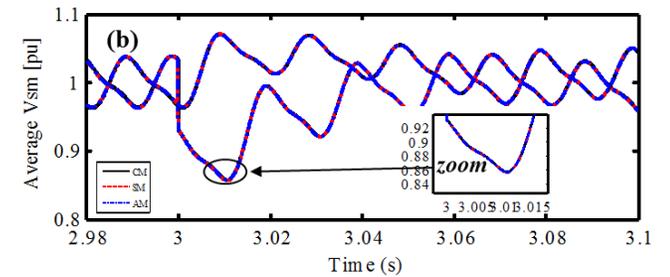
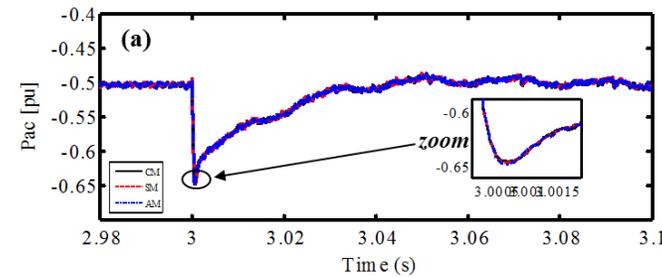
Bonne corrélation entre les deux méthodes et la référence en régime nominal...

# Contributions scientifiques de la thèse

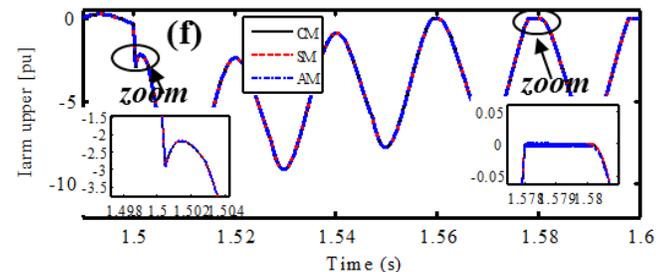
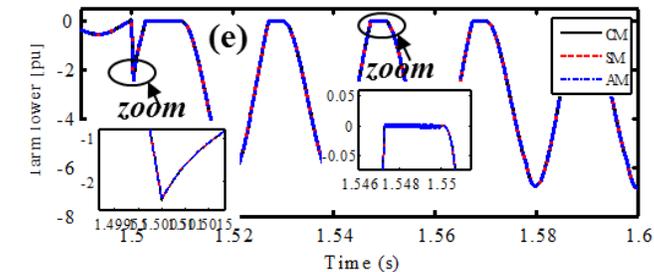
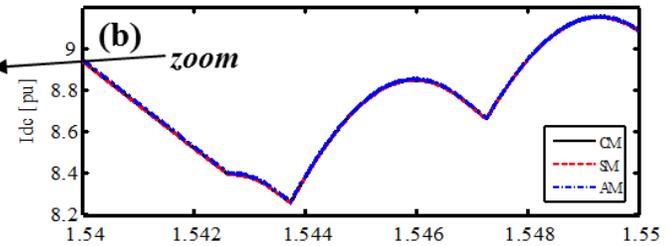
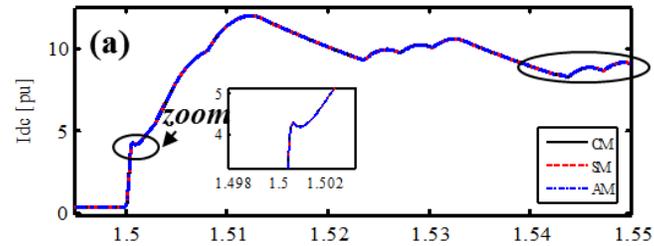
## Modélisation des convertisseurs MMCs

... et en cas de défauts internes ou externes

**Perte de 10% des SMs dans un bras**



**DC Pole-to-Pole fault**



## Contributions scientifiques de la thèse

### Modélisation des convertisseurs MMCs

... pour un temps de simulation bien moindre

	<i>Detailed Model</i>			<i>Equivalent Model</i>			<i>Averaged Model</i>		
<i>Number of SM</i>	<b>400</b>	<b>100</b>	<b>40</b>	<b>400</b>	<b>100</b>	<b>40</b>	<b>400</b>	<b>100</b>	<b>40</b>
<i>Benchmark (Circuit) model</i>	<b>2100 s</b>	<b>308 s</b>	<b>160 s</b>	/	/	/	/	/	/
<i>Semi-analytical</i>	<b>87 s</b>	<b>38 s</b>	<b>18 s</b>	<b>85 s</b>	<b>33 s</b>	<b>17 s</b>	<b>12 s</b>	<b>12 s</b>	<b>12 s</b>
<i>Analytical</i>	<b>70 s</b>	<b>24 s</b>	<b>15 s</b>	<b>69 s</b>	<b>22 s</b>	<b>15 s</b>	<b>9 s</b>	<b>9 s</b>	<b>9 s</b>

# Agenda

■ Introduction Générale “Contexte de la thèse”

■ **Contributions scientifiques de la thèse**

■ Modélisation des convertisseurs MMCs

■ Contrôle rapide des convertisseurs MMCs

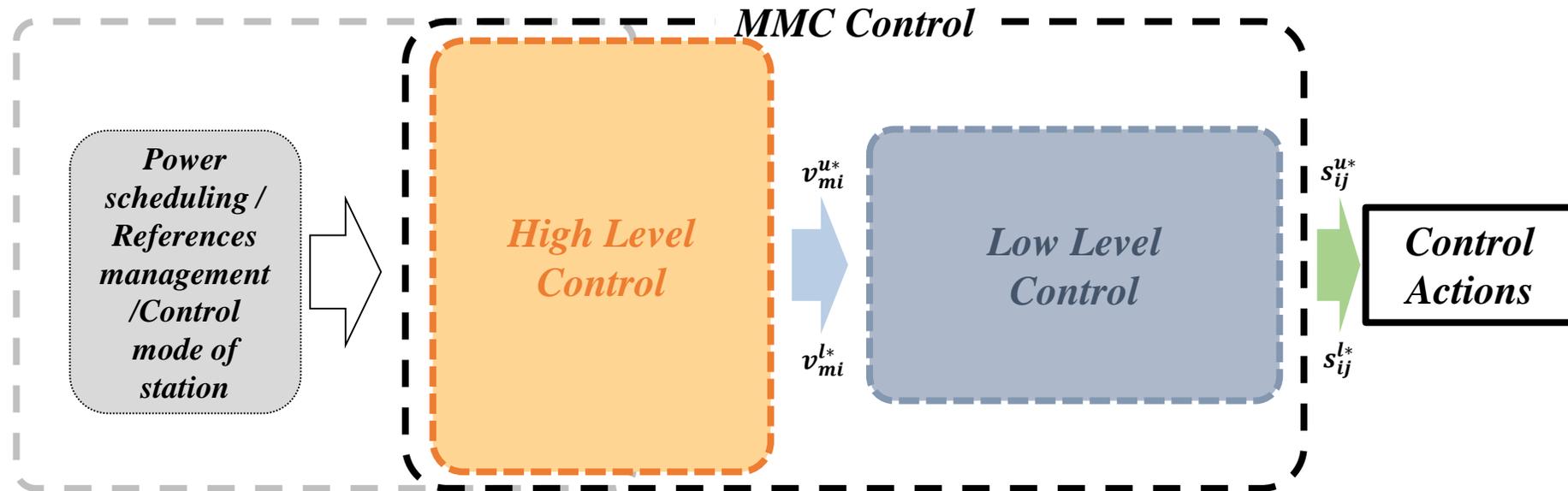
■ Validations expérimentales

■ **Conclusions et perspectives**

## Contributions scientifiques de la thèse

### Contrôle des convertisseurs MMCs

#### Structure de contrôle des MMCs « État de l'art »



L'objectif de la thèse en terme de contrôle c'est d'exploiter les nouveaux degrés de libertés du MMC

# Contributions scientifiques de la thèse

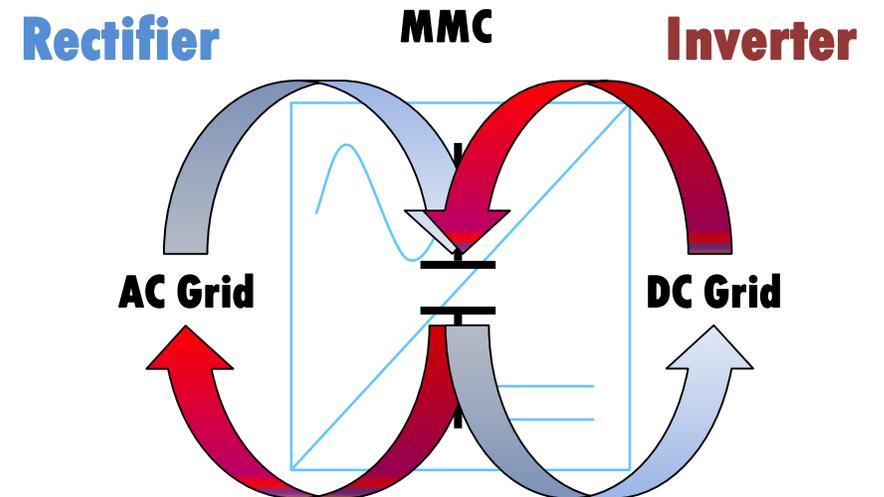
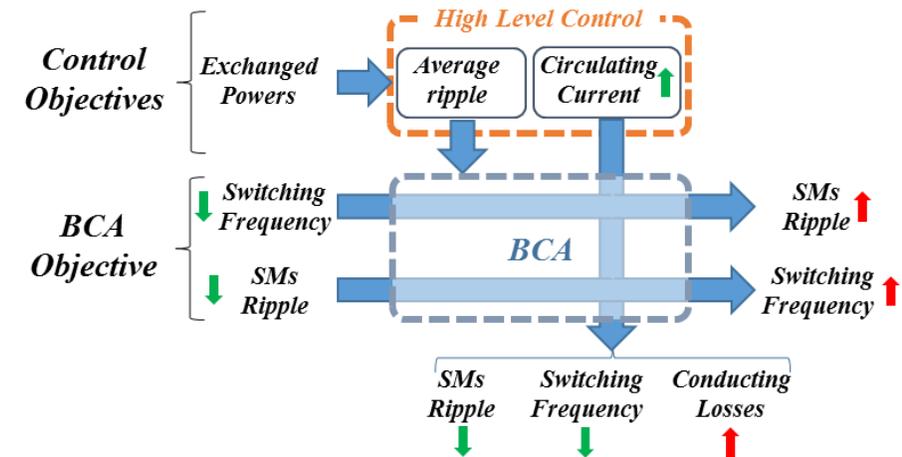
## Contrôle des convertisseurs MMCs

### Low level control

- Equilibrer les tensions des condensateurs des SMs.

### High level control

- Assurer le bon échange de puissance entre les réseaux AC et DC.



# Contributions scientifiques de la thèse

## Contrôle des convertisseurs MMCs

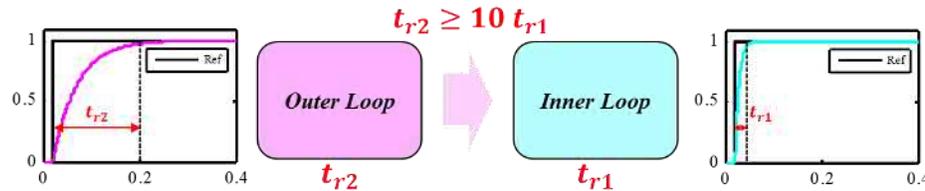
■ Deux structures de contrôle peuvent être utilisées pour contrôler le MMC

■ Multiple Inputs Multiple Outputs (MIMO)

- ✓ Même temps de réponse pour toutes les variables
- x Problème de stabilité
- x Le débogage est compliqué lorsque des instabilités se produisent

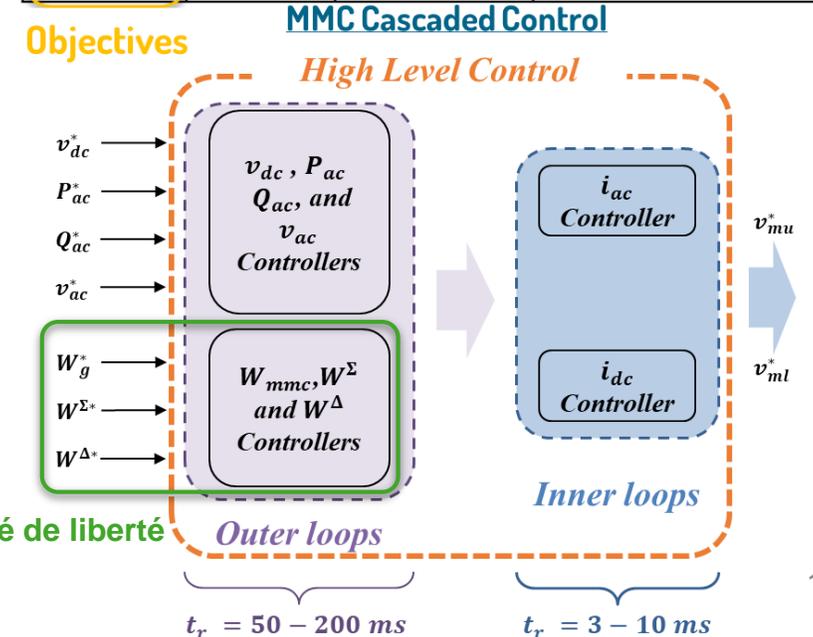
■ Contrôle en cascade

✓ Un contrôle stable très utilisé dans l'industrie.



### MMC state-space equations

Control objectives	State variables	Control inputs	State space equations
AC powers	$i_{ac}$	$v_{mi}^{ac} = \frac{v_{mi}^l + v_{mi}^u}{2}$	$L_{eq} \frac{di_i^{ac}}{dt} = -R_{eq} i_i^{ac} + v_{mi}^{ac} - v_i^{ac}$
DC power	$i_{dc}$	$v_{mi}^{dc} = v_{mi}^u - v_{mi}^l$	$L_{eq} \frac{di_i^{dc}}{dt} = -R_{eq} i_i^{dc} - v_{mi}^{dc} + v_{dc}$
Energy global	$W_{mmc}$	<i>Actions</i> $i_{ac}$ or $i_{dc}$	$\frac{dW_{mmc}}{dt} = v_{dc} i_{dc} - \sum_{i=a}^c v_i^{ac} i_i^{ac}$
Energy Sum (leg)	$W_i^\Sigma$	$i_i^{ac}$ or $i_i^{dc}$	$\frac{dW_i^\Sigma}{dt} = v_{mi}^{dc} i_i^{dc} - v_{mi}^{ac} i_i^{ac}$
Energy diff	$W_i^\Delta$	$i_i^{dc}$	$\frac{dW_i^\Delta}{dt} = 2 v_{mi}^{ac} i_i^{dc} - \frac{v_{mi}^{dc}}{2} i_i^{ac}$



Nouveau degré de liberté

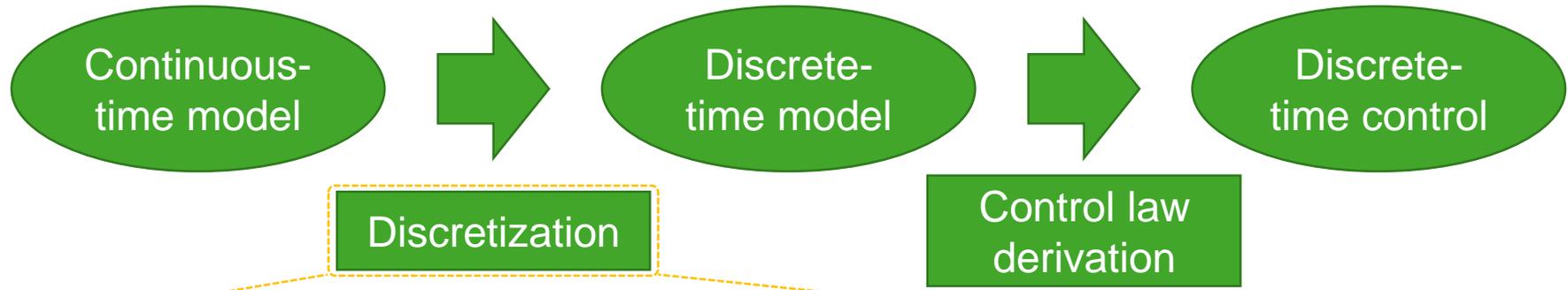
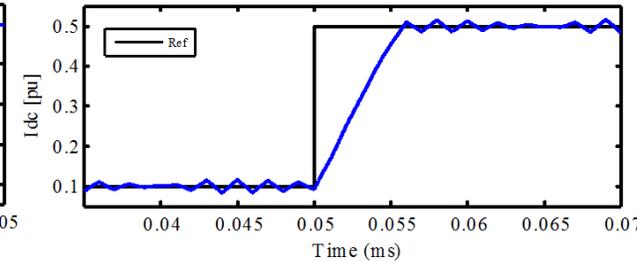
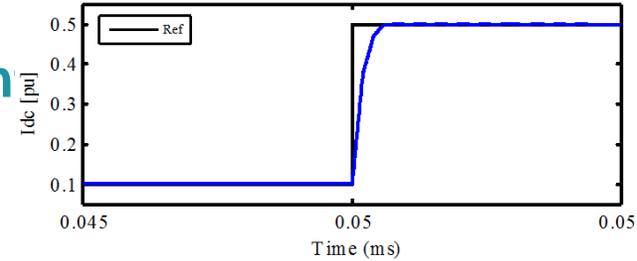
# Contributions scientifiques de la thèse

## Contrôle des convertisseurs MMCs

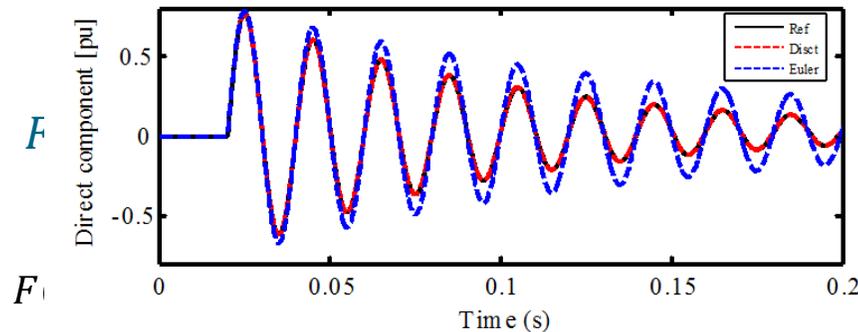
■ **Commande par mode glissant**

■ Impact de la période d'échantillonnage du contrôleur

■ **Modélisation exacte en temps discret**



Where:



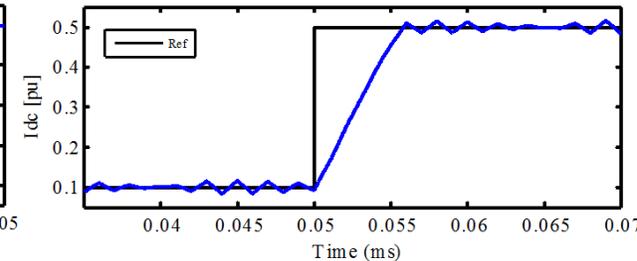
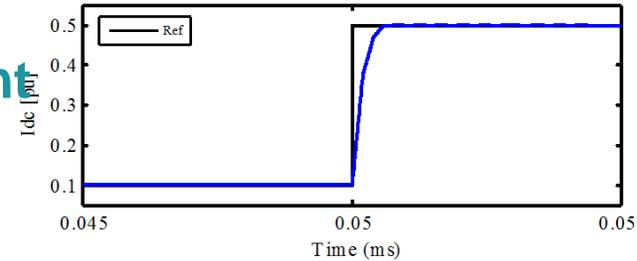
$$T - I)B$$

## Contributions scientifiques de la thèse

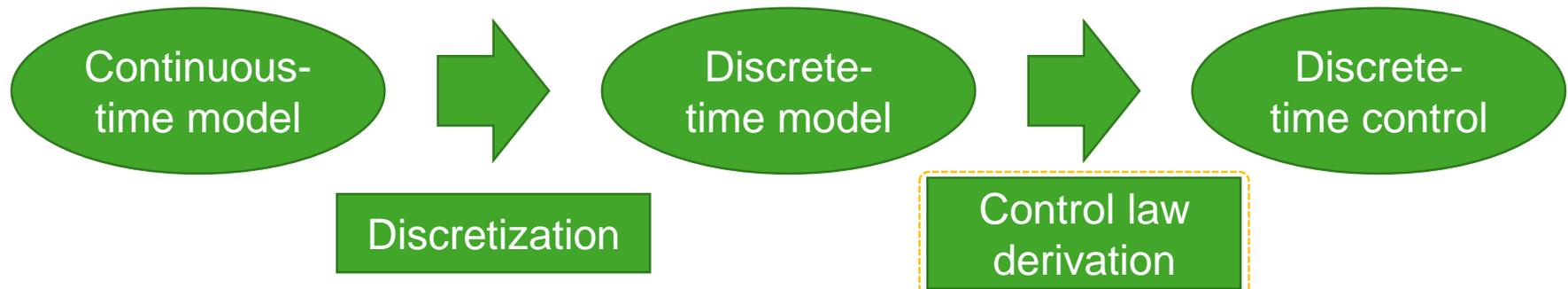
### Contrôle des convertisseurs MMCs

#### ■ Commande par mode glissant

- Impact de la période d'échantillonnage du contrôleur



#### ■ Modélisation exacte en temps discret



#### ■ Deux lois de commandes ont été développées et testées dans la thèse:

- Commande par placement des pôles
- Commande par mode glissant en temps discret

# Agenda

■ Introduction Générale “Contexte de la thèse”

■ **Contributions scientifiques de la thèse**

■ Modélisation des convertisseurs MMCs

■ Contrôle rapide des convertisseurs MMCs

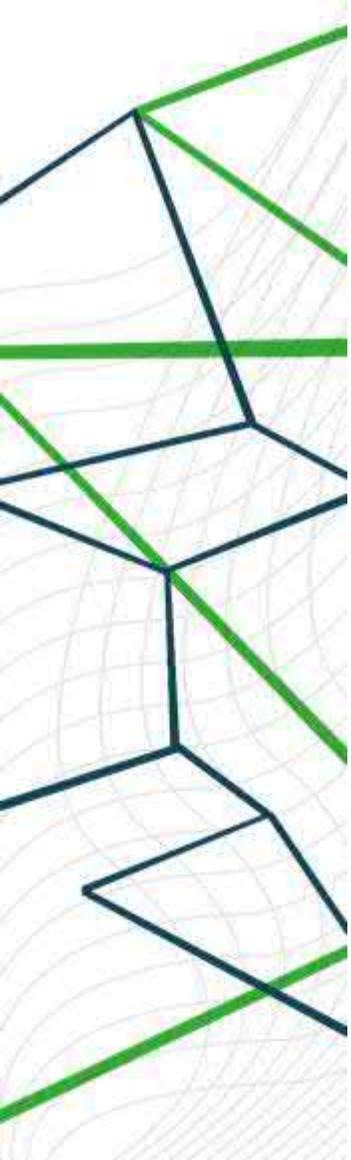
■ Validations expérimentales

■ **Conclusions et perspectives**

## Contributions scientifiques de la thèse

### Validations expérimentales

- Une plateforme de simulation temps réel a été développée durant la thèse afin de valider les résultats obtenus
  - En simulation temps réel (HIL) pour les modèles développés
  - En validation RCP/PHIL pour les lois de commandes obtenues.



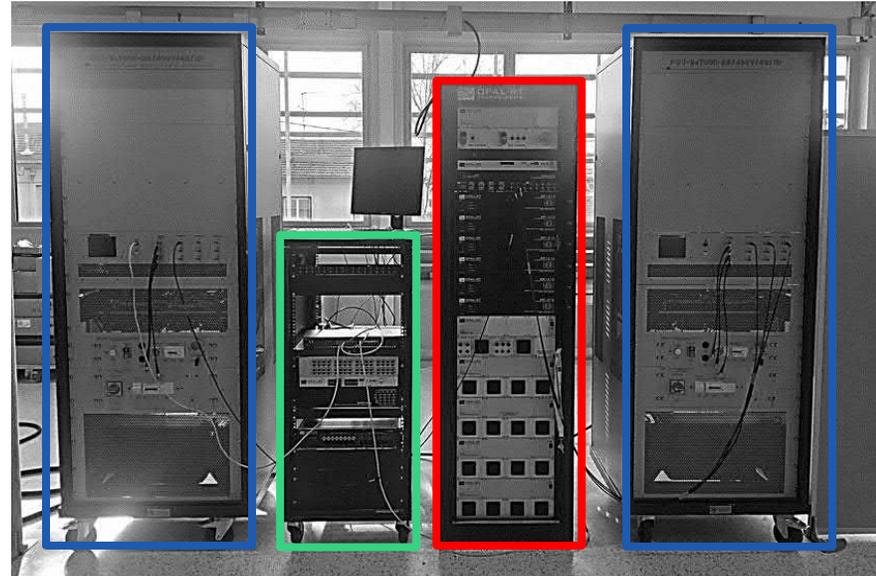
## Contributions scientifiques de la thèse

### Validations expérimentales

#### ■ Deux amplificateurs:

- Amplificateurs de technologie linéaire
- Quatre quadrants configurable en modes AC & DC

Nominal Power		21 kVA 4Q
Voltage	Dynamics	~ 20 $\mu$ s
	Bandwidth	100~150 kHz
Current	Dynamics	30-50 $\mu$ s
	Bandwidth	15 kHz



#### ■ Simulateur temps réel

- Simulateur OP5700 de Opal-rt
- Logiciel Hypersim
- 32 cœurs disponibles

#### ■ Maquette MMC

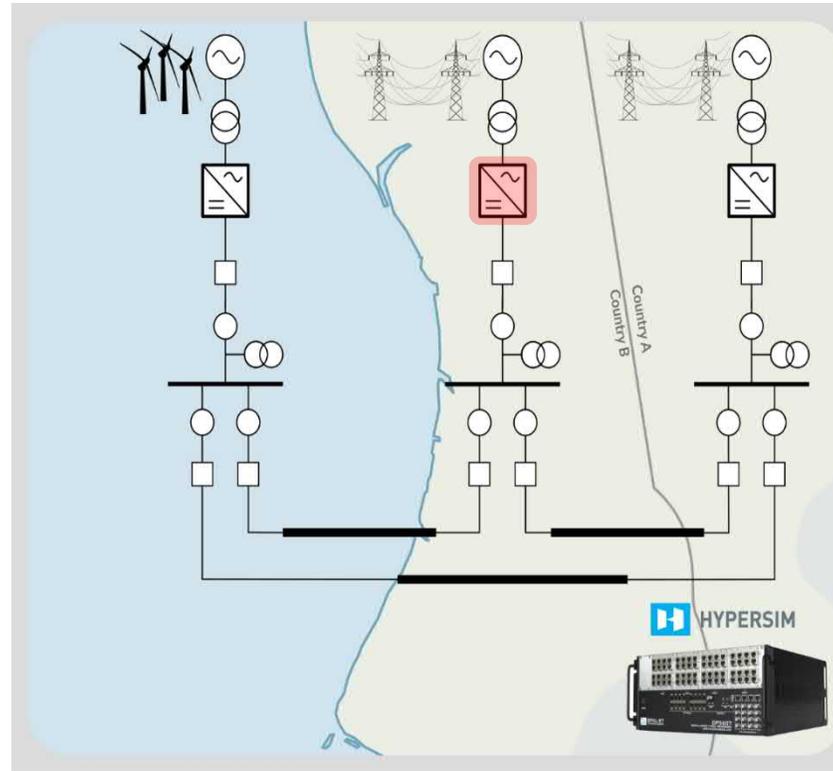
- Une structure modulaire qui peut être adaptée à d'autres topologies.
- Une dynamique proche au celle d'un MMC réel
- Interface de communication avec le contrôleur (gestion des I/Os)

Rated Power	6 kW
Rated DC voltage	400 V (pole to pole)
Rated AC voltage	208 V (rms line to line)
Number of SMs per am	10
SM capacitance	4, 92 mF
Arm inductance/resistance	6 mH / 35 mOhm
AC filter inductance/ resistance	5 mH / 26 mOhm

# Contributions scientifiques de la thèse

## Validations expérimentales

Cas d'étude : un réseau multi-terminal (MTDC) avec trois stations.



Experimental setup

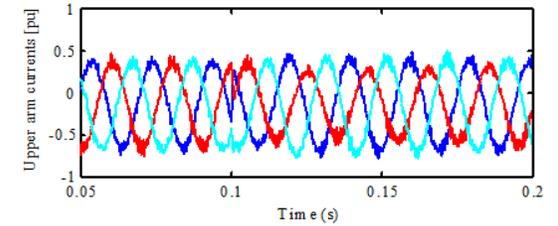
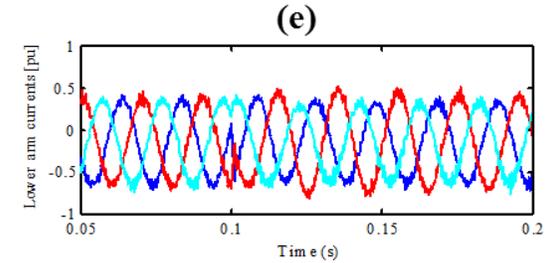
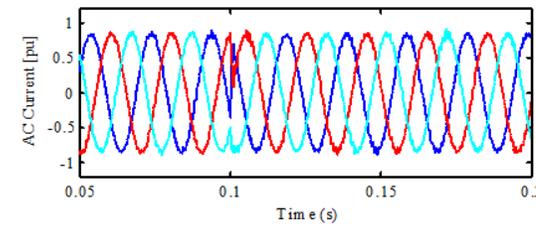
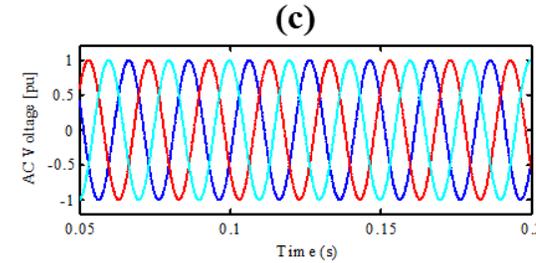
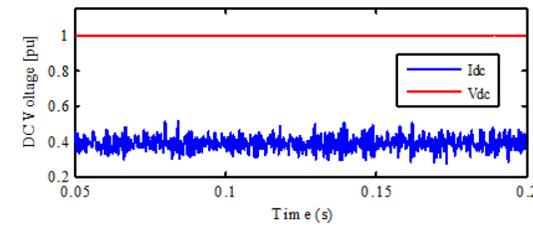
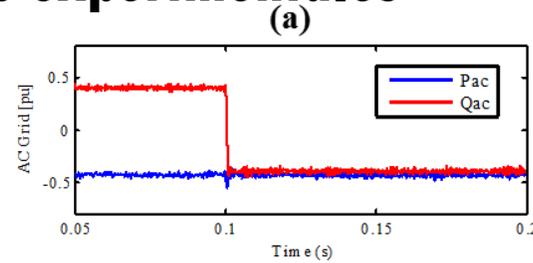


# Contributions scientifiques de la thèse

## Validations expérimentales

■ Echelon sur la référence de la puissance réactive

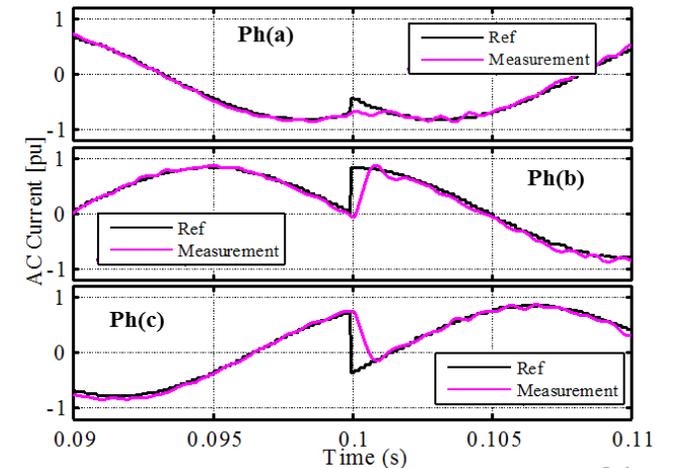
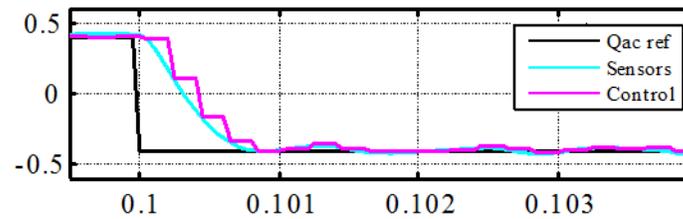
■ Zoom sur les résultats obtenus



(b)

(d)

(f)

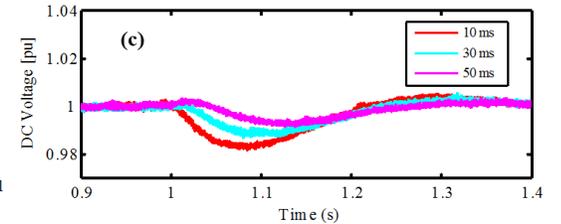
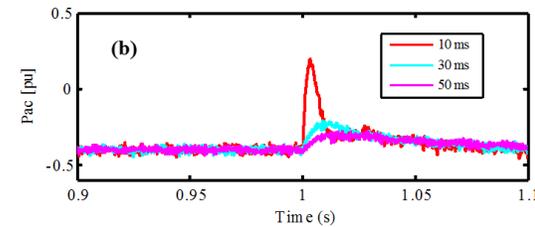
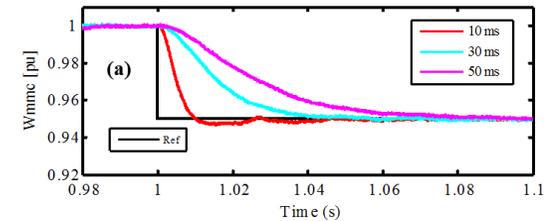


# Contributions scientifiques de la thèse

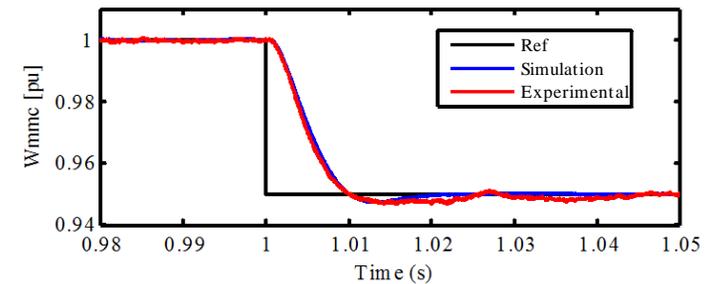
## Validations expérimentales

### Echelon sur la référence de la énergie

Grâce à la réponse rapide des boucles de courant, le temps de réponse de la boucle d'énergie peut être réduit à 10 ms.

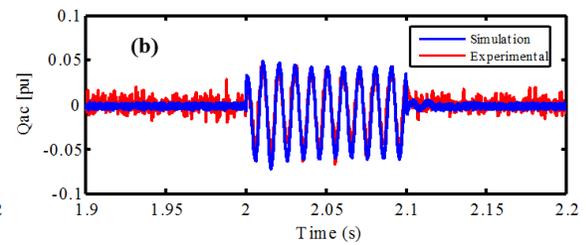
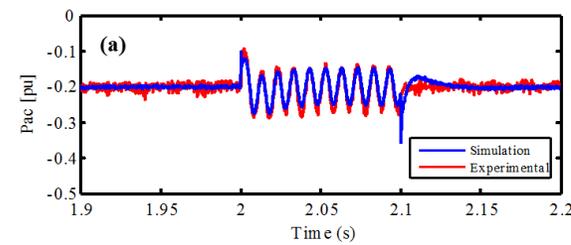


### Echelon sur la référence de la énergie



### Bonne corrélation entre les résultats de simulations et les résultats expérimentaux.

### Défaut biphasé



# Agenda

■ Introduction Générale “Contexte de la thèse”

■ Contributions scientifiques de la thèse

■ Modélisation des convertisseurs MMCs

■ Contrôle rapide des convertisseurs MMCs

■ Validations expérimentales

■ **Conclusions et perspectives**

## Contributions scientifiques de la thèse

### Conclusions et perspectives

#### ■ Cette thèse traite différentes problématiques relatives aux convertisseurs modulaires multiniveaux (MMCs).

##### 1) Modélisation

- Améliorer les modèles existants.
- Proposer des nouvelles techniques d'implémentations

##### 2) Contrôle

- Accélérer le temps de réponse des contrôleurs de courant.
- Assurer la stabilité du contrôle avec de telles dynamiques
- Atténuer l'impact de certains défauts externes

##### 3) Validations expérimentales

- Développer une plateforme de simulation temps réel.
- Valider les résultats obtenus en HIL et PHIL.

#### ■ Les contributions scientifiques de cette thèse ont abouti à :

- 3 brevets
- 3 revues scientifiques dont une est en phase finale d'acceptation
- 7 papiers de conférences

## Contributions scientifiques de la thèse

### Conclusions et perspectives

■ Pour aller au-delà des travaux proposés dans cette thèse, plusieurs thèmes de recherche peuvent être déployés :

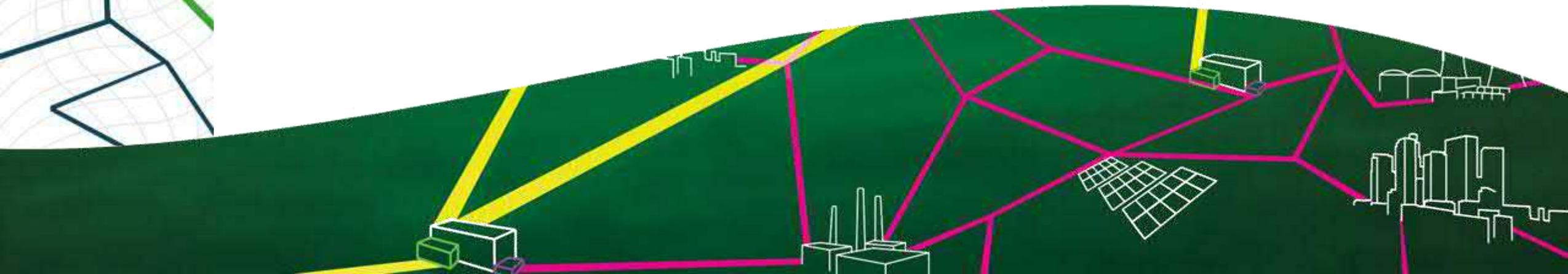
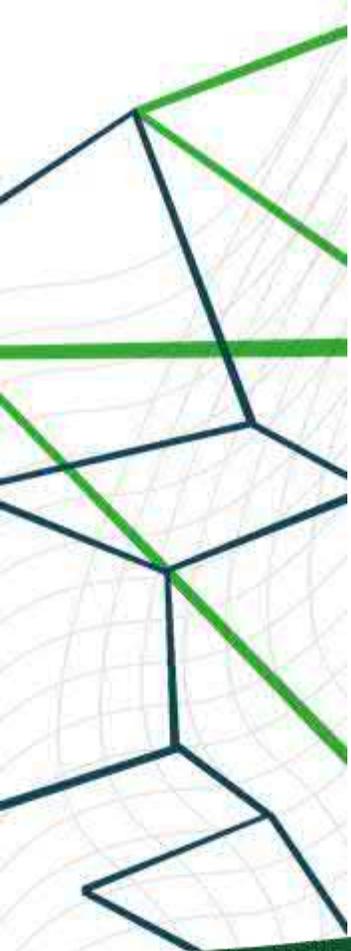
#### 1) Modélisation et contrôle

- Appliquer les méthodologies proposées de modélisation et de contrôle pour d'autres topologies MMC, telles que Full Bridge (FB), Double-Clamped, Alternate Arm Converter, convertisseur DC/DC à base de MMC...
- Considérer les limites structurelles à priori dans la synthèse des lois de contrôle afin de bien maîtriser la réponse dynamique du MMC.

#### 2) MMC avec son environnement réseau

- Considérer la dynamique du réseau AC en particulier dans le cas des réseaux faibles

Merci pour votre attention



**Olivier Borne : (Missing)**  
**Services de flexibilité apportés par**  
**le Vehicle-To-Grid**

# Reduction of an electrical power system model for techno-economic studies

Nuno Marinho

Group of electrical engineering, Paris – GeePs  
CentraleSupélec  
EDF R&D

IEEE PES France  
9/10/2019

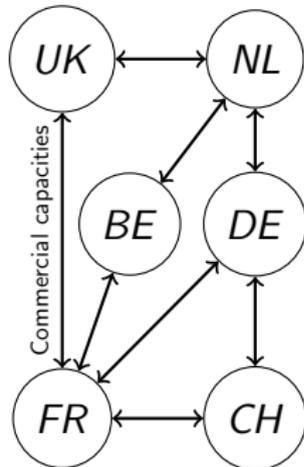


## Reduce electrical power systems, why?



Physical

<https://www.entsoe.eu/data/map/>



Commercial

Two different network visions

## Reduce electrical power systems, why?

### Unit Commitment (Market model)

$$F(u, p) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I FC_i(p_i^t, u_i^t) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I SC_i(u_i^t)$$

- The problem determines the operation schedule of the generating units at every market time unit
- Mixed integer linear problem  $\rightarrow$  NP-hard
- Usually does not take into account network constraints
- Even with simplified models can take up to 40h of simulation

# Reduce electrical power systems, why?

## Network model



→ Benchmark network model: 2842 buses, 1820 generators and 3739 branches.

→ Twelve areas: FR, BE, NL, DE, AT, CH, IT, SL, PL, CZ, SK and DK



## Problem statement

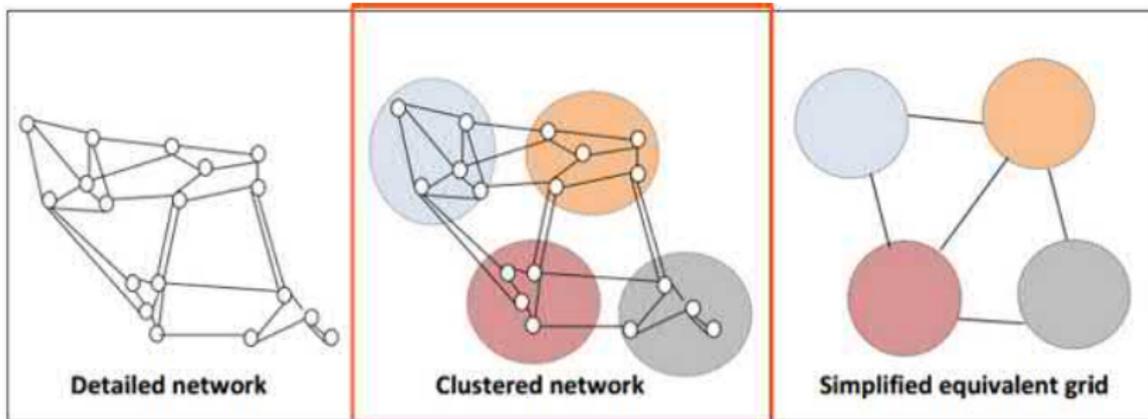
How to integrate a network model into an UC problem?

Answer: Define a reduced network model...

**How to define a reduced network model, while minimizing information loss?**

# Work plan

Cluster → Connect → Define limits



Source: e-Highway2050 report D 2.2

## Are there other clustering approaches?

Multiple approaches proposed in the literature, we focus on three of the most promising:

- K-means using LMPs and geographical coordinates;
- Hierarchical using only LMPs;
- K-medoids using electrical distance and geographical coordinates.

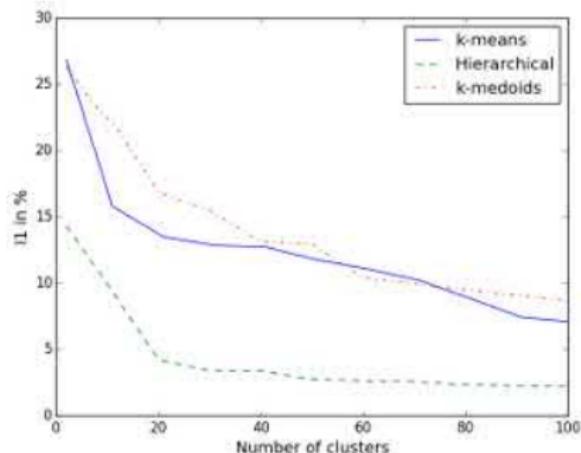
Why Locational Marginal Prices (LMP)?

Economical indicator gives an insight about the network physics.

Which approach suits best our interest?

We propose an **evaluation framework based on the redispatch effort.**

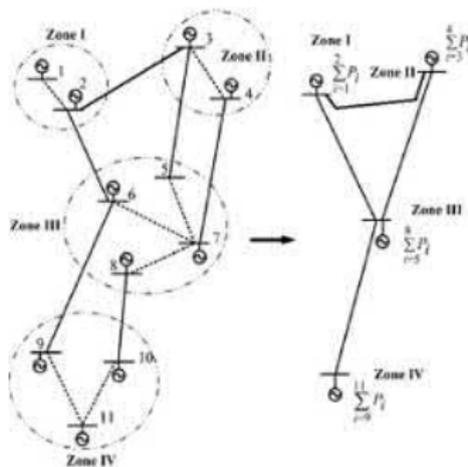
## Clustering network buses



- The algorithms are tested using different scenarios (different load and renewables production);
- Slow progression after the first 50 zones;
- Hierarchical + LMP the most efficient, k-means + LMP + coordinates and k-medoids + electrical distance + coordinates show the same trend.

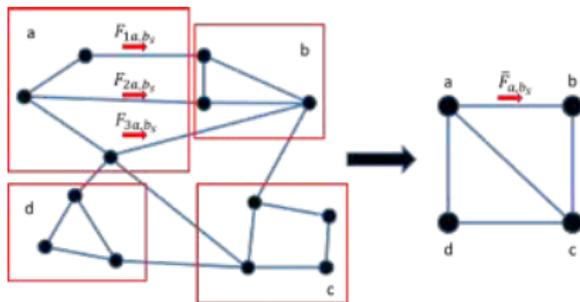


## Representing power flows



- After the clustering, the same level of injected power should correspond to the same branches' power flows;
- Frequently in the literature, a representation using **PTDF matrix** is preferred.

## Representing power flows



$$\min\{\Psi_r, f^0\} (F_{l,s} - \bar{F}_{\bar{l},s})^2$$

s.t.

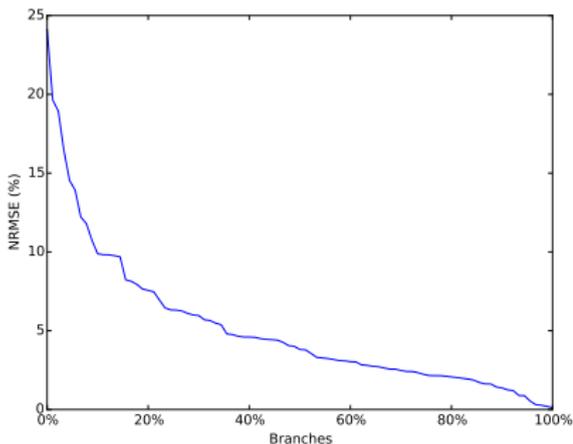
$$\forall s \in S_T, \forall \bar{l} \in \bar{L} \quad \bar{F}_{\bar{l},s} = \sum_{\bar{n}=1}^{\bar{N}} \Psi_{\bar{l},\bar{n}} \times P_{\bar{n},s}^{inj} + f_{\bar{l}}^0$$

$$\forall \bar{n} \in \bar{N}, \forall \bar{l} \in \bar{L} \quad |\Psi_{\bar{l},\bar{n}}| \leq 1$$

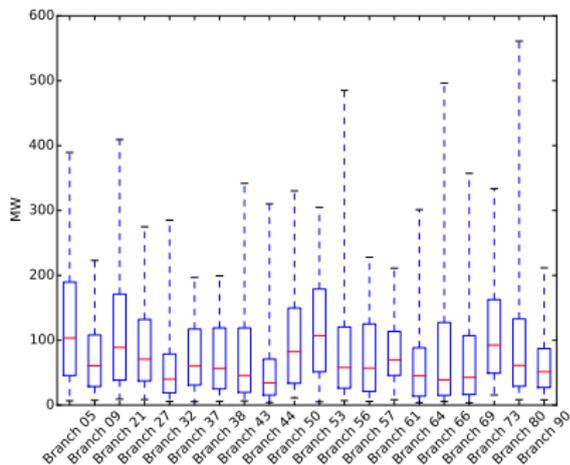
### Variables

- $\Psi_r$  is the PTDF matrix of dimension  $\bar{L} \times \bar{N}$ ;
- $\bar{F}_{\bar{l},s}$  is the estimated power flow in branch  $\bar{l}$  for scenario  $s$ ;
- $f_{\bar{l}}^0$  is the power flow's estimated error in branch  $\bar{l}$  due to the aggregation of generation, denominated loop flows.

# Representing power flows



$$NRMSE_{\bar{I}} = \frac{RMSE_{\bar{I}}}{\text{avg } \bar{I}} \times 100$$

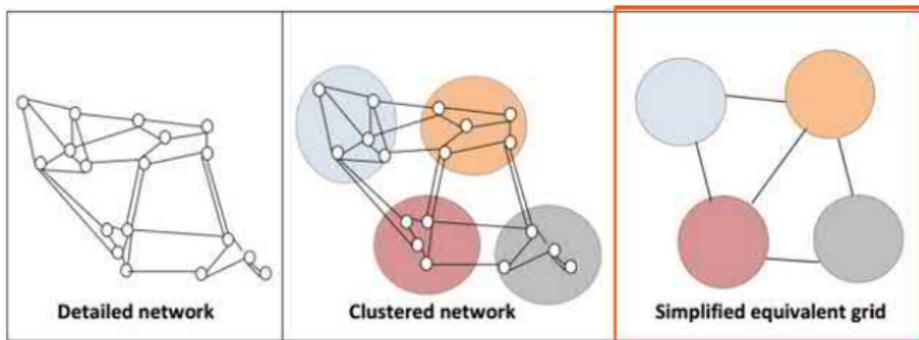


$$e_{I,s}^{abs} = |F_{I,s} - \bar{F}_{I,s}|$$

Filter  $RMSE \geq 100\text{MW}$

## Setting operational limits

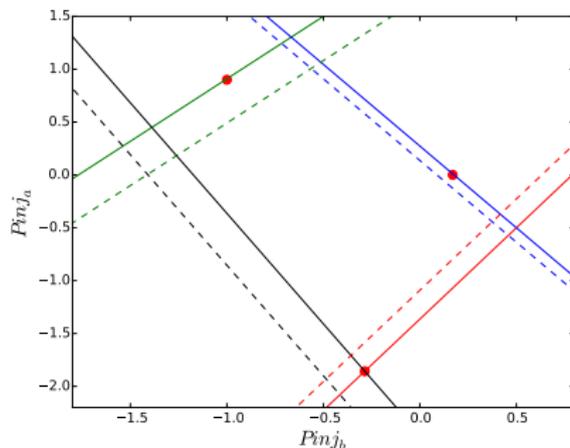
How can clusters' links be constrained?



Source: e-Highway2050 report D 2.2

Were we the first ones? No, but most approaches were way too simplistic...

## Setting operational limits

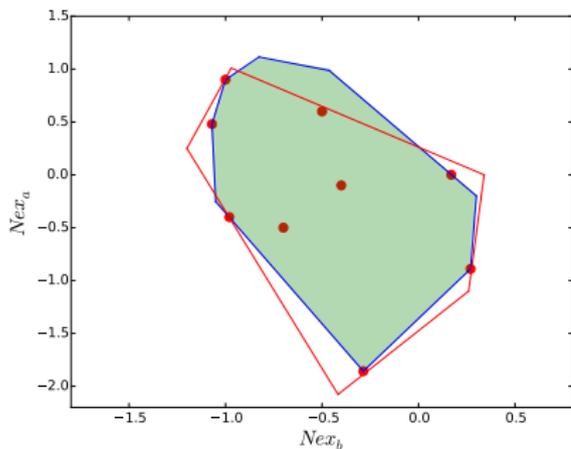


Adjust the original domain (dotted lines) so all the historical operating points (red dots) are inside the adjusted domain (solid lines)

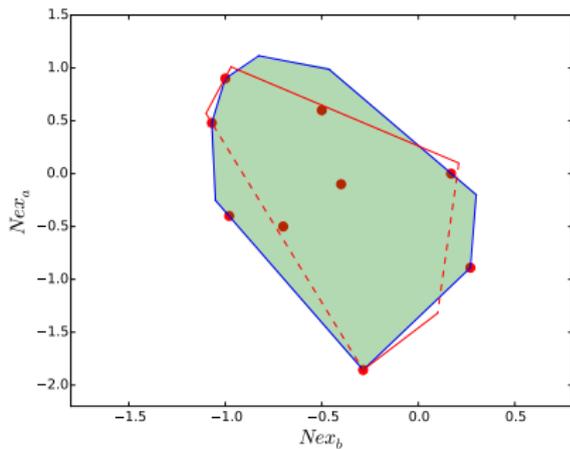
$$\|P_a^{inj} \times \Psi_l^a + P_b^{inj} \times \Psi_l^b + P_c^{inj} \times \Psi_l^c\| \leq F_l^{max}$$

## Setting operational limits

In a (bit) more complex system



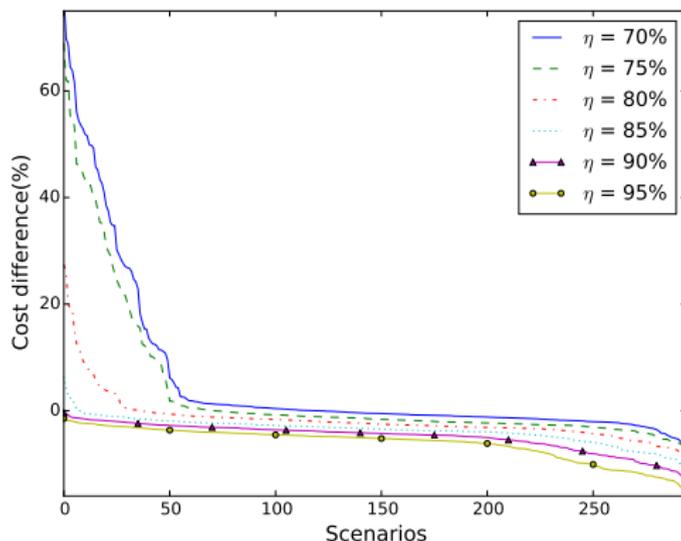
Reduced model domain in red



Reduced model domain excluding  
some operating points

$\eta$ : only a given percentile of operating set-points are taken by the reduced model domain.

## Setting operational limits



$$\text{Cost difference} = \frac{\text{Cost}_{\text{reduced}} - \text{Cost}_{\text{full}}}{\text{Cost}_{\text{full}}} \times 100$$

Cost difference  $\geq 0$  : Reduced system more expensive

## Conclusions

- Hierarchical clustering (using LMP as metrics) outperforms k-means (using LMPs and geographic coordinates) and k-medoids (using electrical distance and geographic coordinates) in a multi-scenario analysis and also that after 50 clusters, the trade-off between accuracy and model simplification is less interesting;
- PTDF matrix optimized using different operating scenarios improves its robustness;
- Approaching the full system's domain one can characterize the connection between clusters and estimate their maximum transmission capacity;
- The proposed methodology allows to define a reduced system that can represent the full system's main features.

## Contributions

- A framework to rank clustering methodologies. This approach can also be used in a market environment to assess the adequacy of the bidding zone definition;
- A methodology to estimate a multi-scenario fitted PTDF matrix improving its robustness for different operating conditions;
- A methodology to represent the full system's steady-state constraints that allows to estimate their maximum transmission capacity;
- A methodology to assess the robustness of static reduced network models to the optimization of PSTs;
- A methodology to determine generation variable costs based on publicly available data.

## List of publications

- N. Marinho, Y. Phulpin, D. Folliot, and M. Hennebel, "Redispatch index for assessing bidding zone delineation," in IET Generation Transmission and Distribution, 2017.
- N. Marinho, Y. Phulpin, A. Atayi, and M. Hennebel, "Modeling Phase Shifters in Power System Simulations Based on Reduced Networks," in Energies, 2019
- N. Marinho, Y. Phulpin, A. Atayi, and M. Hennebel, "Equivalent transmission capacity in reduced network models," to be submitted
- N. Marinho, Y. Phulpin, D. Folliot, and M. Hennebel, "Approaching generation variable costs from publicly available data," in 2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM), June 2016.
- N. Marinho, Y. Phulpin, D. Folliot, and M. Hennebel, "Network reduction based on multiple scenarios," in 2017 IEEE Manchester PowerTech, June 2017, pp. 1-6.

Context  
○○○○○○

Cluster  
○○

Connect  
○○○○

Limit  
○○○○

Conclusions  
○○○●

Thank you for your attention!