

# Stabilité des réseaux électriques de distribution en présence d'énergies renouvelables

Arshpreet SINGH

Encadrants G2ELab : Vincent DEBUSSCHERE, Nouredine HADJSAID

Encadrants Enedis : Benoit BOUZIGON, Xavier LEGRAND

# Contexte et objectifs

Qu'est-ce que la stabilité d'un réseau électrique en présence de ressources interfacées par des convertisseurs (**RIC**) ?

« capacité d'un réseau électrique, pour une **condition initiale donnée**, à retrouver un état d'équilibre après avoir subi des perturbations physiques »

De plus en plus de RIC

synchronisation, tension, fréquence → catégories **classiques** de stabilité

- Réduction de l'inertie totale
- Réduction des contributions aux courants de court-circuit
- Multiplication des commandes, dans plusieurs échelles de temps

Conséquences

- Impact sur la stabilité en fréquence (Rocof), impact sur la stabilité en tension, impact sur la synchronisation (PLL) etc.
- De nouveaux problèmes, pas encore maîtrisés... → nouvelle catégorie : **stabilité liée aux convertisseurs**



# Contexte et objectifs

## Stabilité liée aux convertisseurs

« problèmes de stabilité à l'échelle du **système** dus à des **interactions dynamiques** entre les commandes des convertisseurs et d'autres composants du réseau électrique (y compris d'autres convertisseurs) »

$f < 10$  Hz (ou jusqu'à environ 30 Hz)

## Stabilité liée aux convertisseurs à interactions lentes (SCIL)

Des événements observés :



- Texas, États-Unis (2012) - oscillations basse fréquence déclenchées par la perte d'une ligne HT
- Xinjiang, Chine (2014) - oscillations 20-40 Hz persistantes pendant des années
- Australie – phénomène observé souvent dans les zones de réseau faible ; oscillations 7-10 Hz suite à des défauts
- Écosse, Royaume-Uni (2020) - oscillations basse fréquence à court terme

généralement associés à des **éoliennes** raccordées à des **réseaux faibles**



# Contexte et objectifs

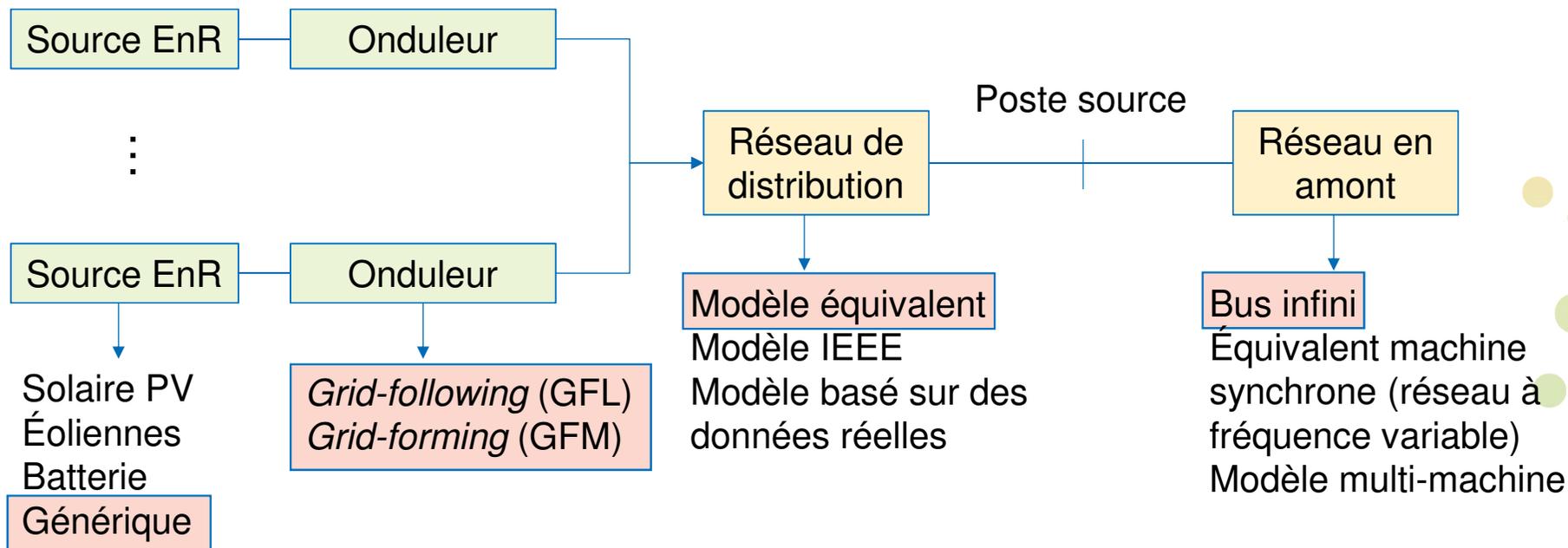
Objectif de la thèse : faire un étude de la stabilité **SCIL** sur les réseaux de distribution

Questions à traiter :

1. Les instabilités type SCIL observées sur des réseaux de transport peuvent-elles également se produire sur des réseaux de distribution ?
2. Dans quelles situations les onduleurs préalablement stables deviennent-ils instables suite au raccordement d'un autre onduleur ?
3. Comment éviter et/ou traiter ces interactions ?
4. Comment le GRD peut il agir face à ces phénomènes ?



# La problématique de la modélisation

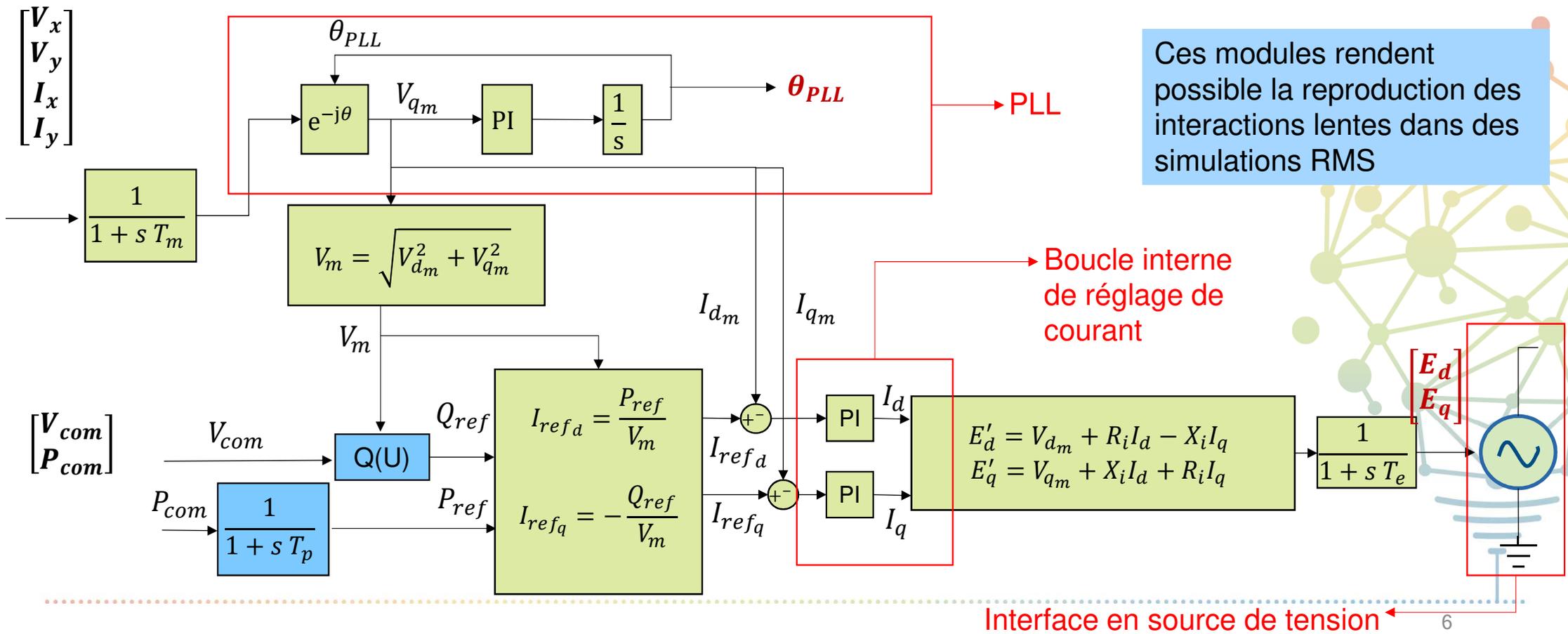


**RMS vs EMT ?** →

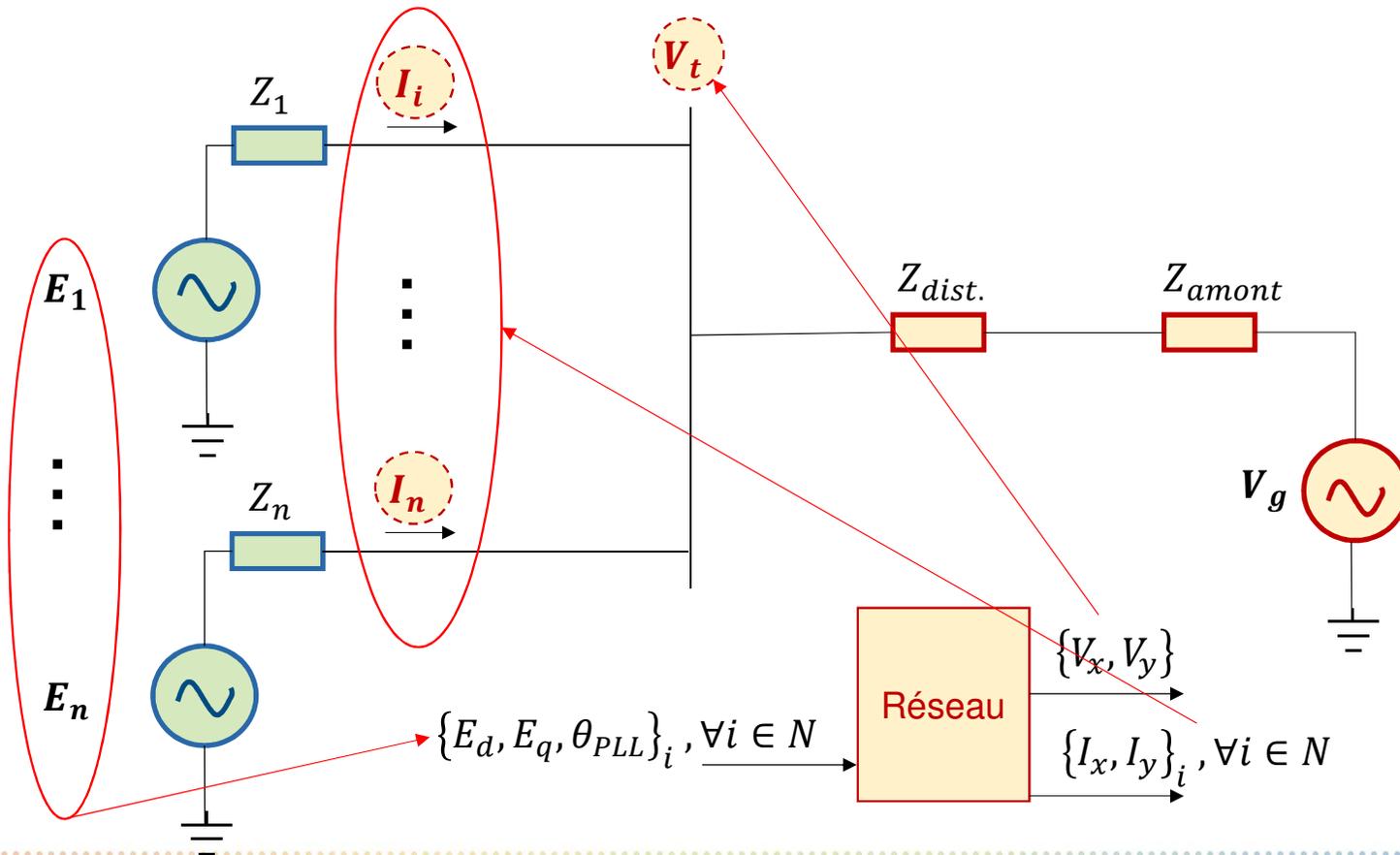
Simulations en RMS (phaseurs, quasi-statique) pour des études préliminaires  
 Simulations en EMT + réduction d'ordre pour la suite



# Etudes préliminaires : modèle RMS



# Etudes préliminaires : modèle RMS



# Stabilité petits signaux

$$\begin{aligned}
 x_i = \begin{bmatrix} V_{x_m} \\ V_{y_m} \\ I_{x_m} \\ I_{y_m} \\ \omega_{PLL} \\ P_{ref} \\ Q_{ref} \\ I_d \\ I_q \\ \theta_{PLL} \\ E_d \\ E_q \end{bmatrix}_i &= \begin{bmatrix} x_{int} \\ x_{ext} \end{bmatrix}_i \\
 y_{I_i} &= \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix}_i \\
 y_v &= \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_i \\
 u_i &= \begin{bmatrix} P_{com} \\ V_{com} \end{bmatrix}_i
 \end{aligned}$$

linéarisation

$$\begin{cases}
 \Delta \dot{x}_i = A_i \Delta x_i + M_{v_i} \Delta y_v + M_{I_i} \Delta y_{I_i} + B_i \Delta u_i \\
 \Delta y_v = N_v \begin{bmatrix} \Delta x_{ext_1} \\ \vdots \\ \Delta x_{ext_n} \end{bmatrix} \\
 \Delta y_{I_i} = N_{I_i} \begin{bmatrix} \Delta x_{ext_1} \\ \vdots \\ \Delta x_{ext_n} \end{bmatrix}
 \end{cases}$$

en regroupant  
les onduleurs

$$\Delta \dot{x} = \mathbf{A} \Delta x$$

Les **valeurs propres** de la matrice **A** nous donnent la **stabilité en petits signaux**

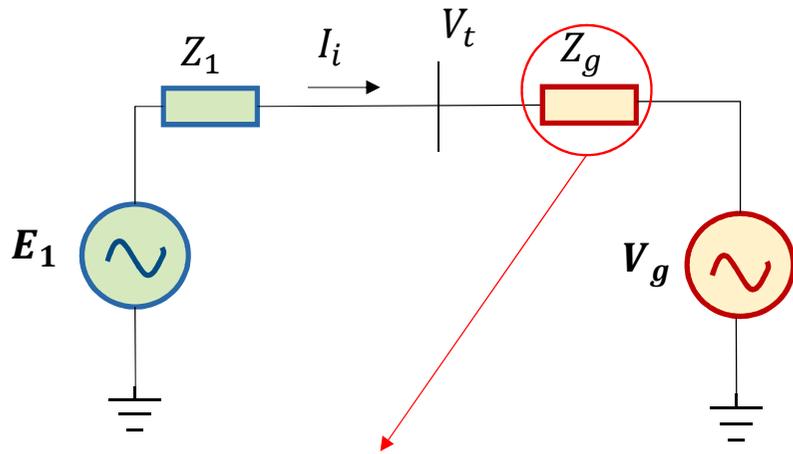
chaque onduleur

$$\Delta \dot{x}_i = A_i \begin{bmatrix} \Delta x_{int_1} \\ \Delta x_{ext_1} \\ \vdots \\ \Delta x_{int_n} \\ \Delta x_{ext_n} \end{bmatrix} + MS_i \begin{bmatrix} \Delta x_{ext_1} \\ \vdots \\ \Delta x_{ext_n} \end{bmatrix}$$

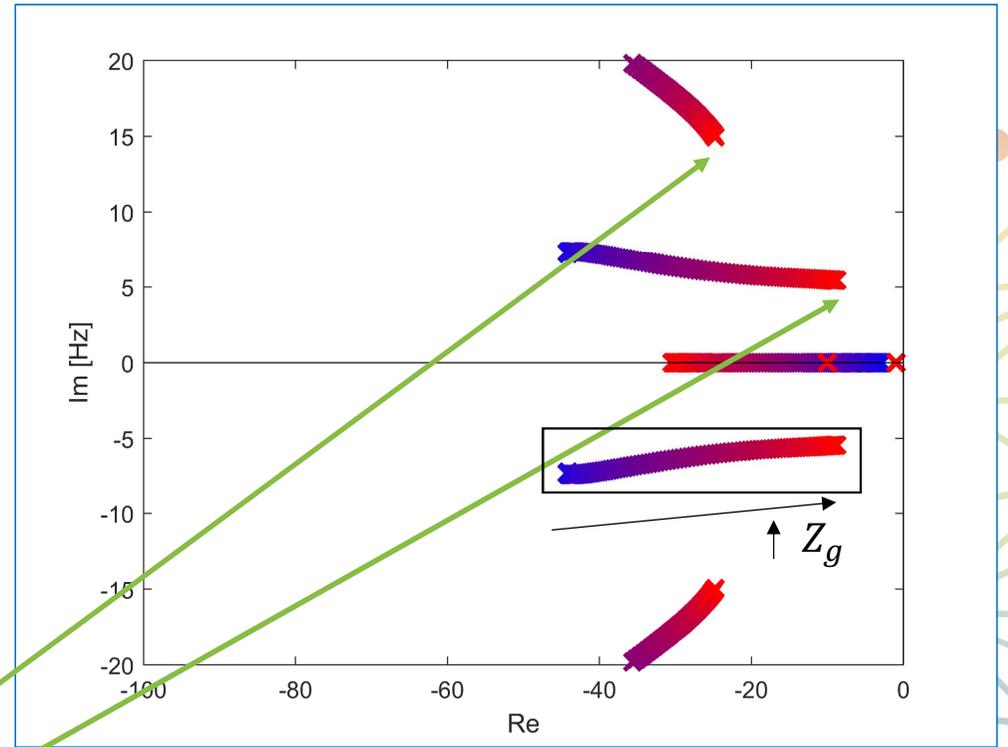
$$MS_{i(12 \times 3n)} = M_{v_i} N_v + M_{I_i} N_{I_i}$$

# Résultats

## 1 onduleur raccordé à un bus infini



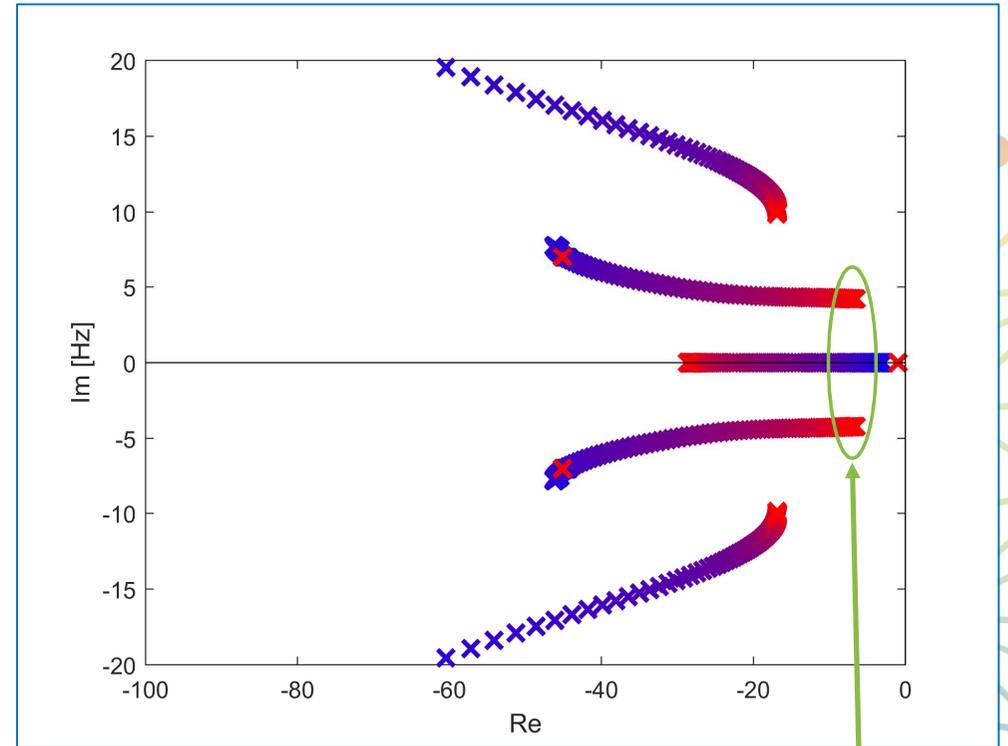
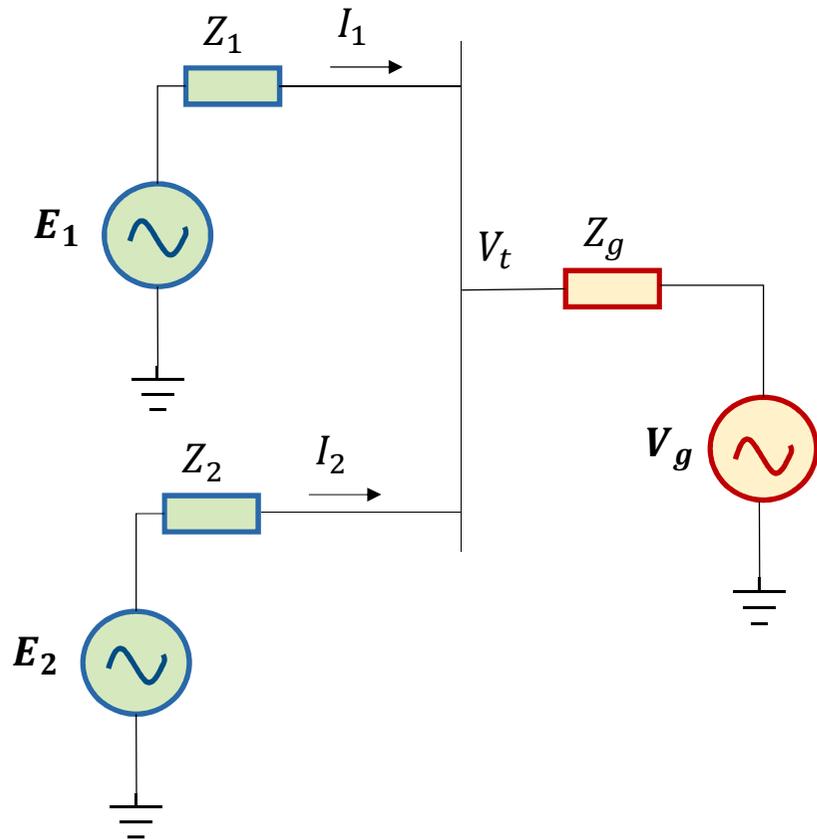
On peut jouer sur  $Z_g$  pour affaiblir le point de raccordement (réduire le rapport de court-circuit)



**Deux paires de valeurs-propres s'approchent de l'instabilité** lorsque le point de raccordement est affaibli

# Résultats

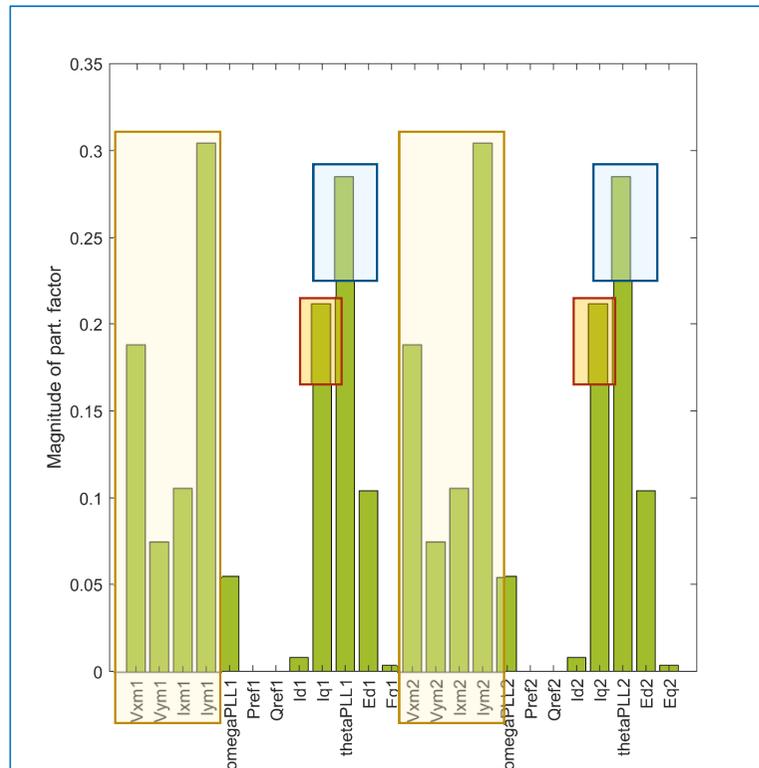
2 onduleurs raccordés à un bus infini



Comportement similaire au cas précédent, mais **un des paires s'approche plus rapidement de l'instabilité**

# Résultats

2 onduleurs raccordés à un bus infini : facteurs de participation pour la valeur propre la plus instable

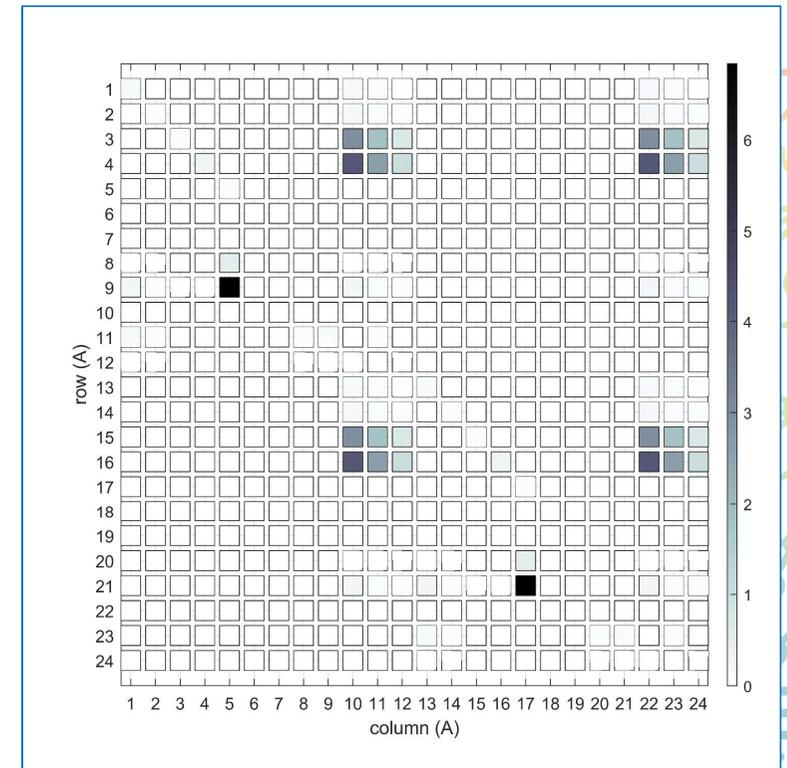


Les états les plus participatifs :

- PLL
- Mesures
- Réglage de courant

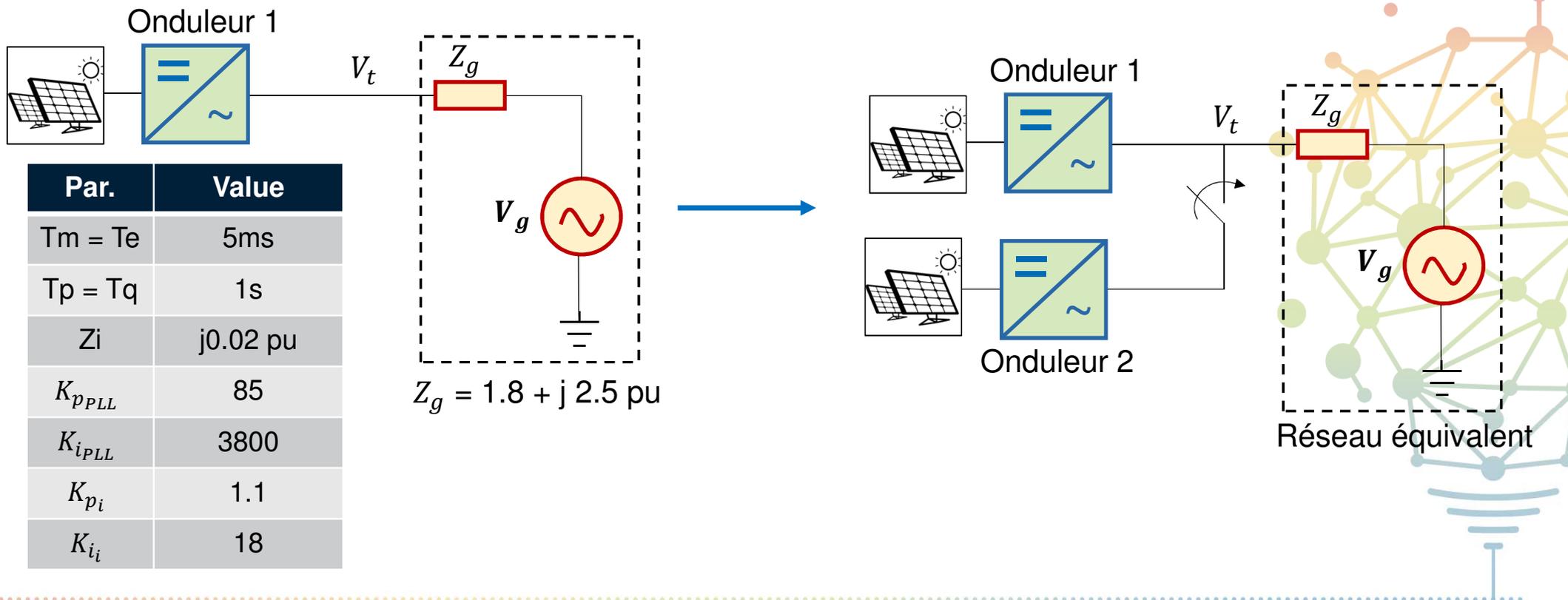
Les paramètres les plus pertinents :

- Gains de réglage
- Impédances de liaison
- Impédance du réseau



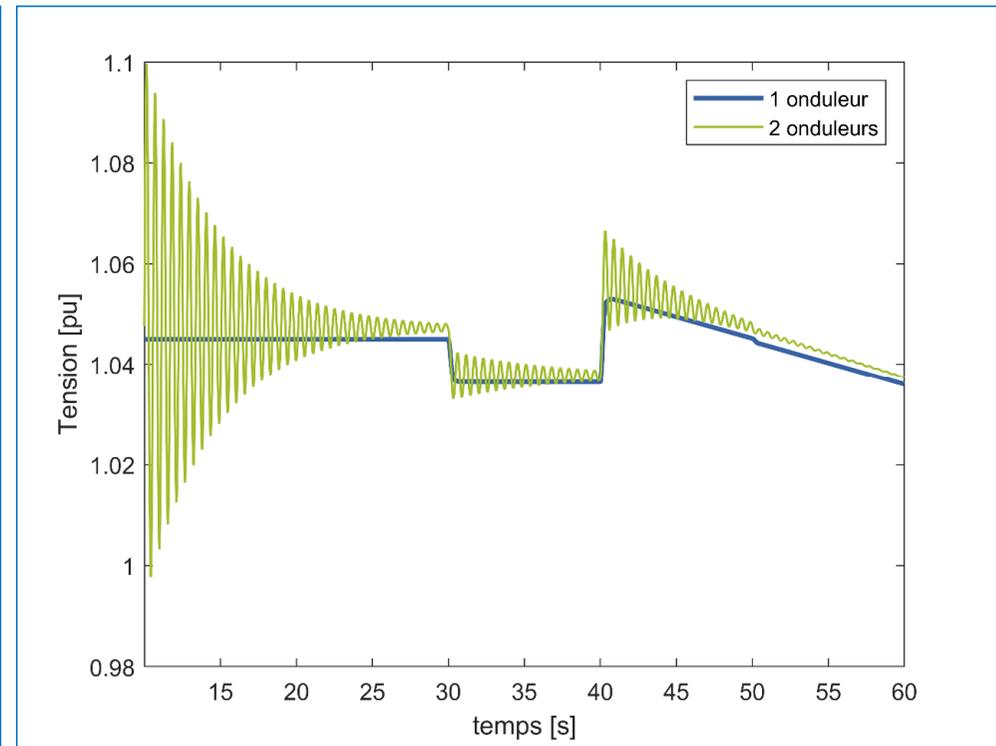
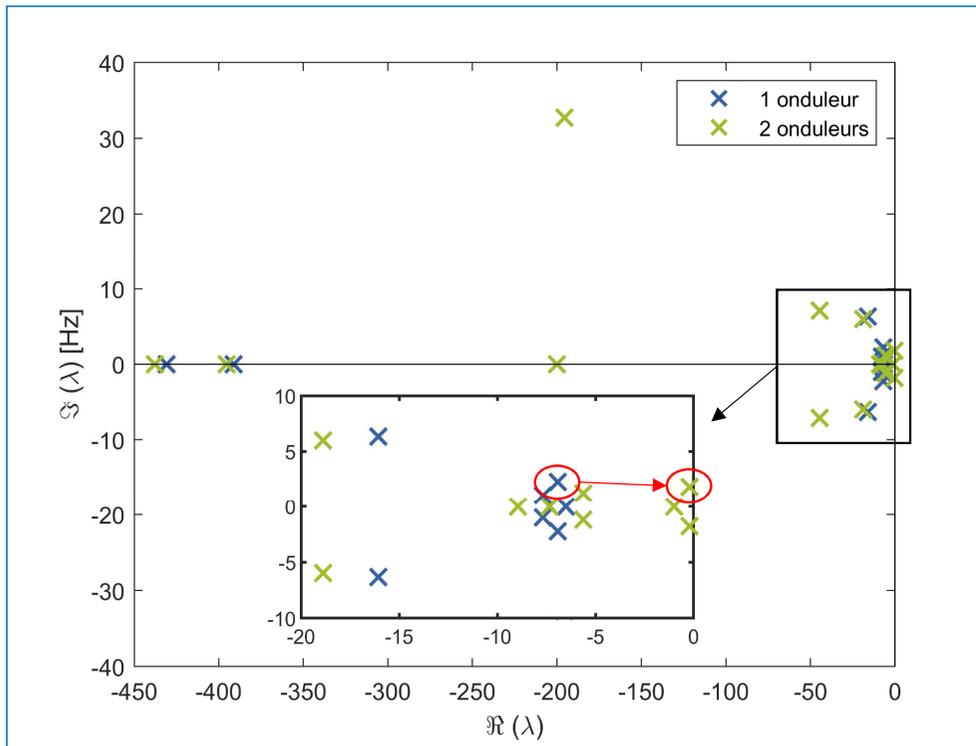
# Résultats

Deux onduleurs raccordés à un bus infinie : des oscillations non prévues



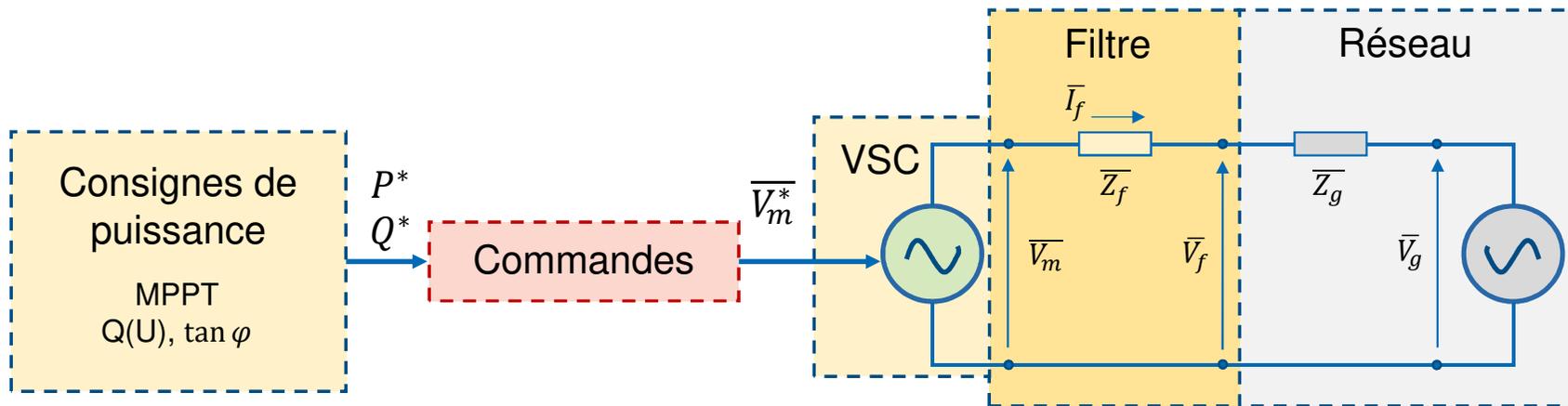
# Résultats

Deux onduleurs raccordés à un bus infini : des oscillations non prévues



Lorsqu'on rajoute un deuxième onduleur, sans modifier aucun paramètre, le même système se rapproche de l'instabilité, entraînant des **oscillations**.

# Vers un onduleur « *grid forming* »



Question : comment commander l'onduleur pour injecter  $P^*$  ?

$$P = V_f I_f \cos(\varphi_i - \delta_f)$$

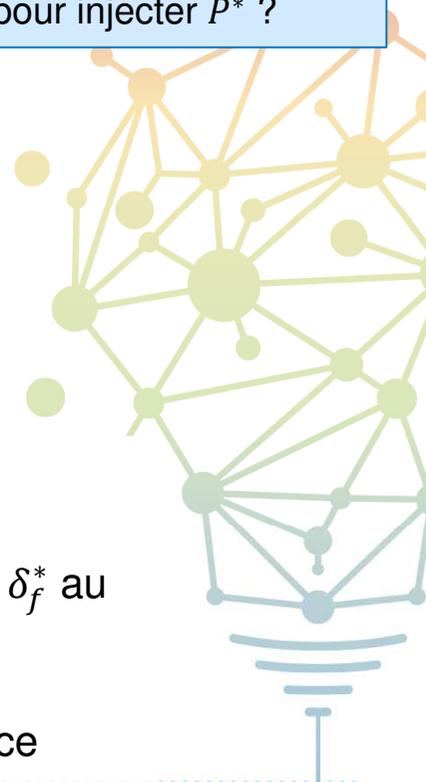
**1<sup>er</sup> choix :**

1. Mesurer  $\bar{V}_f$  et décider  $\bar{I}_f^*$  à injecter
2. Imposer  $\bar{V}_m^*$  pour injecter  $\bar{I}_f^*$
3. Assurer la synchronisation en mesurant l'angle de  $\bar{V}_f$

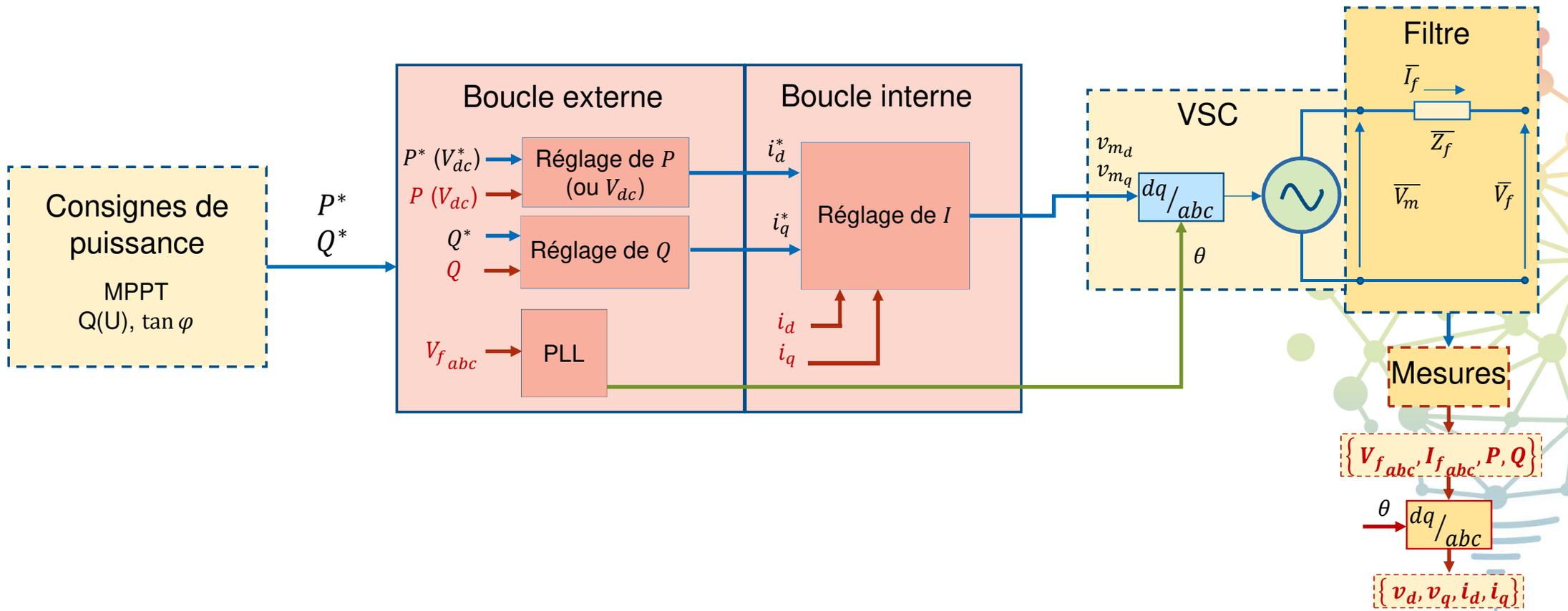
$$P = \frac{V_f V_g}{X_g} \sin(\delta_f)$$

**2<sup>ème</sup> choix :**

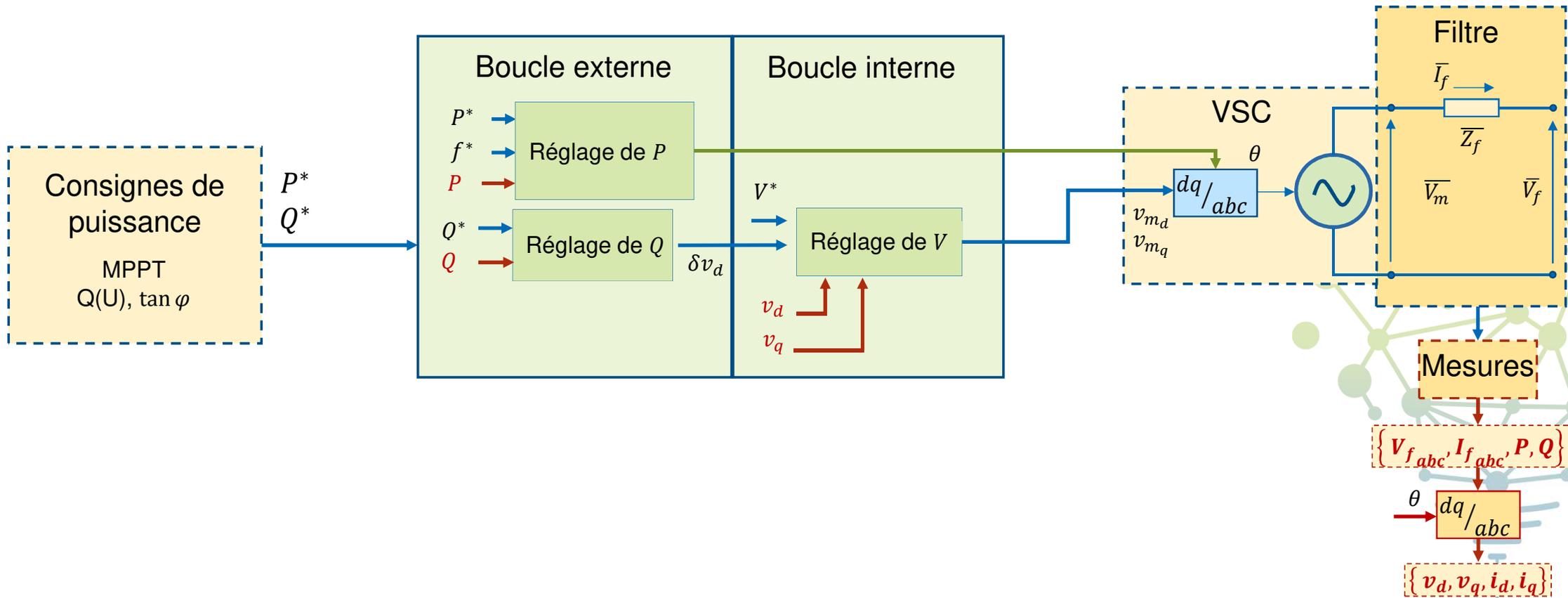
1. Décider  $\bar{V}_f^*$  à imposer
2. Imposer  $\bar{V}_m^*$  pour en avoir  $V_f^*$  et  $\delta_f^*$  au point de raccordement
3. Assurer la synchronisation en mesurant l'injection de puissance



# Les onduleurs GFL vs GFM



# Les onduleurs GFL vs GFM



# Les onduleurs GFL vs GFM



Onduleur **GFL** : « *grid following* »

1. Source de **courant**
2. Synchronisation **via PLL** (exposé à la problématique de réseau faible)
3. Capable de régler la tension DC
4. Ne fait pas de « *black-start* »
5. N'est pas adapté aux réseaux à faible inertie



Onduleur **GFM** : « *grid forming* »

1. Source de **tension**
2. Synchronisation via boucle de puissance active (**sans PLL**, l'onduleur n'est pas exposé à la problématique de réseau faible)
3. A priori, la tension DC est réglée par un autre convertisseur
4. Capable de faire le « *black-start* »
5. Adapté aux réseaux à faible inertie



**Questions** à se poser sur l'onduleur GFM :

1. Quel est l'impact d'un onduleur GFM en termes d'instabilités type SCIL ?
2. Un modèle RMS est-il capable de reproduire ces interactions ?
3. L'onduleur GFM est-il capable de solutionner les problèmes de stabilité SCIL observés pour les onduleurs GFL ?

# Conclusions et perspectives

Les instabilités type SCIL observées sur des réseaux de transport peuvent-elles également se produire sur des réseaux de distribution ?

**Selon les études préliminaires : oui !**

Dans quelles situations les onduleurs préalablement stables deviennent-ils instables suite au raccordement d'un autre onduleur ?

**Des cas de figure ont été identifiés**



Il faut encore...

1. Valider les résultats préliminaires en les comparant aux **simulations en EMT**.
2. Développer davantage l'analyse pour inclure les **onduleurs GFM**.
3. Analyser des différentes configurations du réseau de distribution.
4. Essayer d'identifier des configurations « fragiles », à savoir des situations qui peuvent entraîner des oscillations **non prévues**.
5. Si possible, inclure **d'autres méthodes** pour évaluer la stabilité.





# NOS PARTENAIRES

MÉCÈNE



LABORATOIRES ASSOCIÉS



ECOLES ASSOCIÉES



# Evolution du mécanisme de délestage fréquence-métrique

Barnabé POTEL

Encadrants G2ELab: Vincent DEBUSSCHERE & Florent CADOUX

Encadrants Enedis: Laëtitia de ALVARO-GARCIA & Sébastien GRENARD puis  
Guillaume PELTON

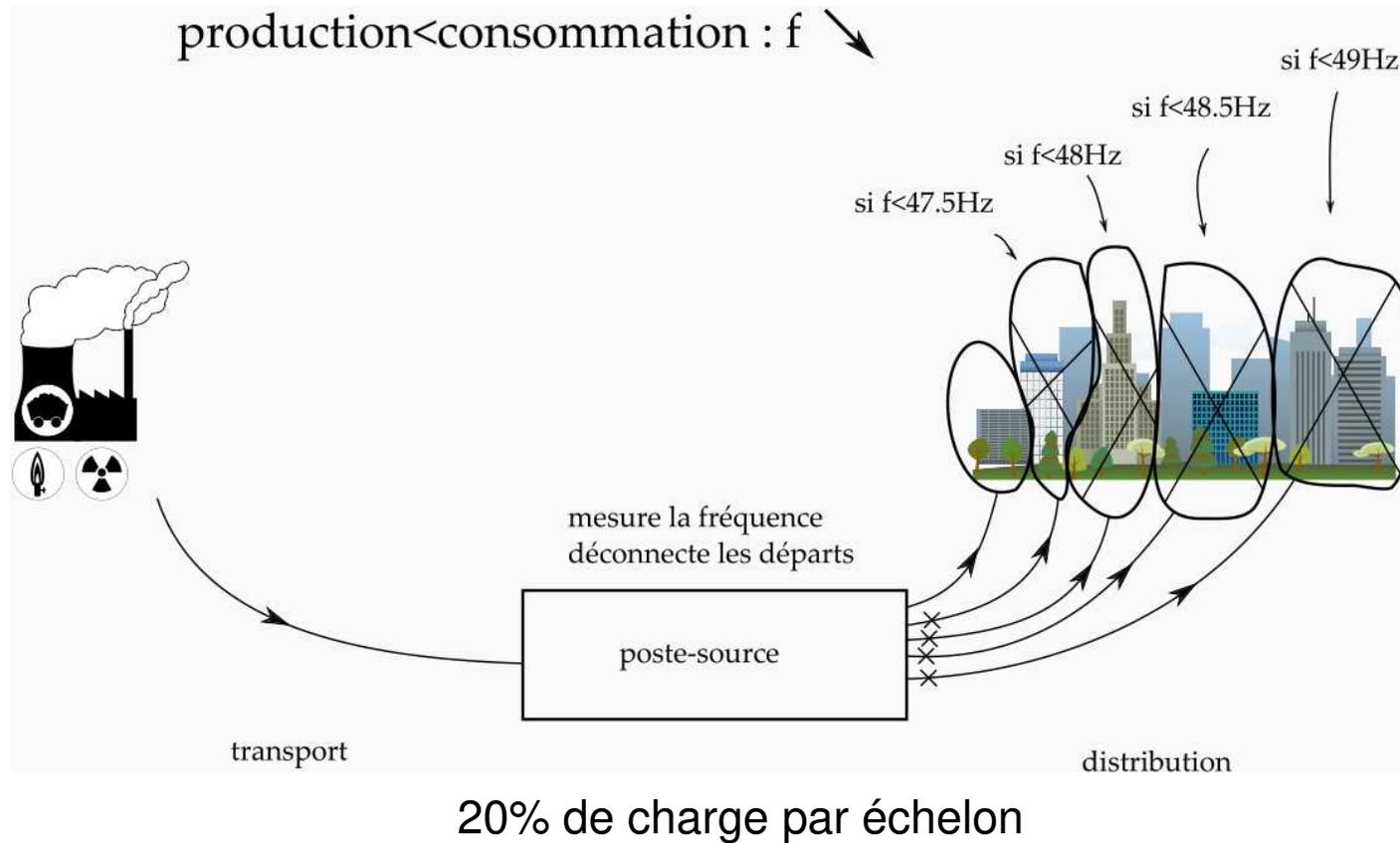
# Contexte

- Relais de protection fréquence-métriques (UFLS): le dernier recours!
- “*Network Code on Emergency & Restoration*” – novembre 2017  
=> Nouvelles contraintes réglementaires pour le délestage de charge
- Thèse (2016 et 2019) dans le cadre de la Chaire Smart Grids sur l’implémentation de ce nouveau schéma UFLS chez Enedis et les études théoriques de l’impact de l’intégration des ENR sur ce schéma
- Force du travail: mise à disposition d’un gros volume de donnée (courbes de charges de plus de 20 000 départs, sur 2 ans, avec un pas de temps de 30 minutes)



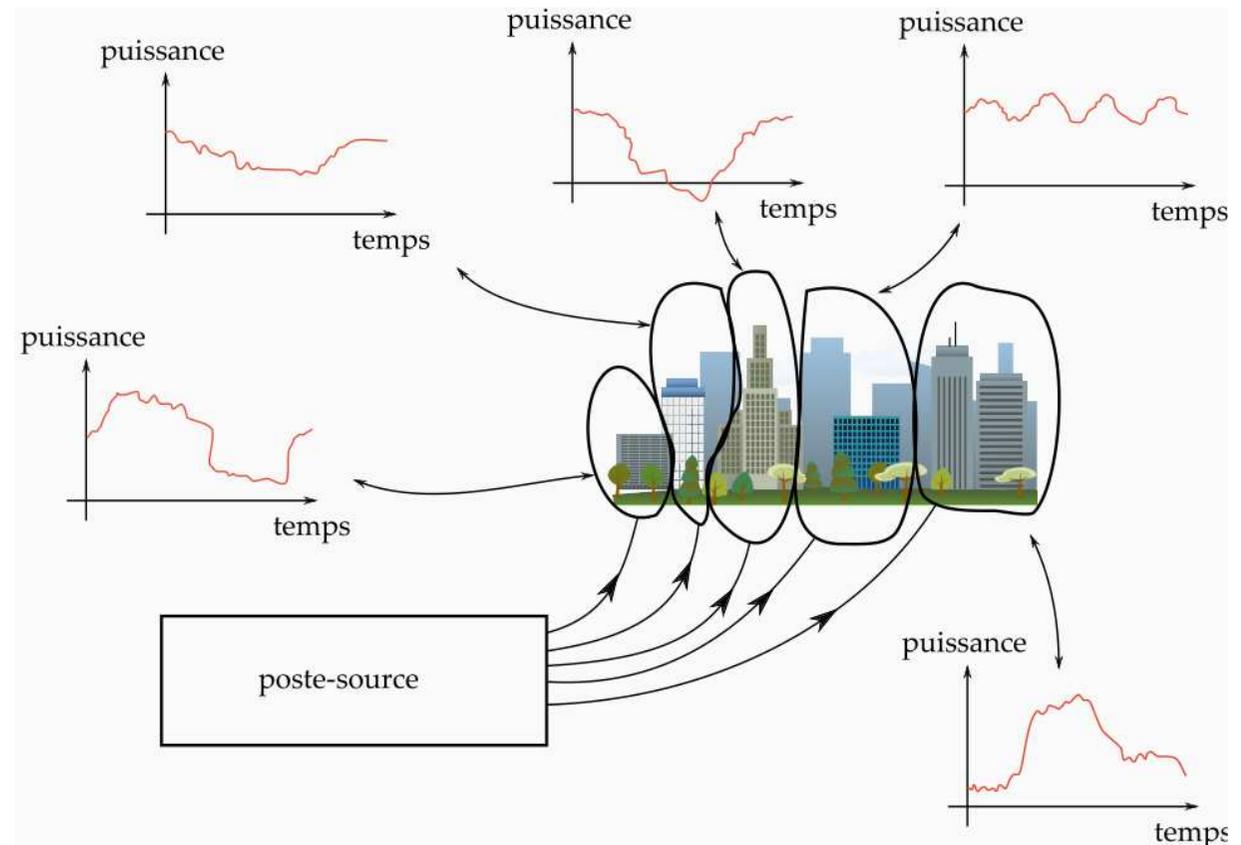
# Plan de délestage historique

Système électrique français:  
2000+ postes-sources  
20 000+ départs

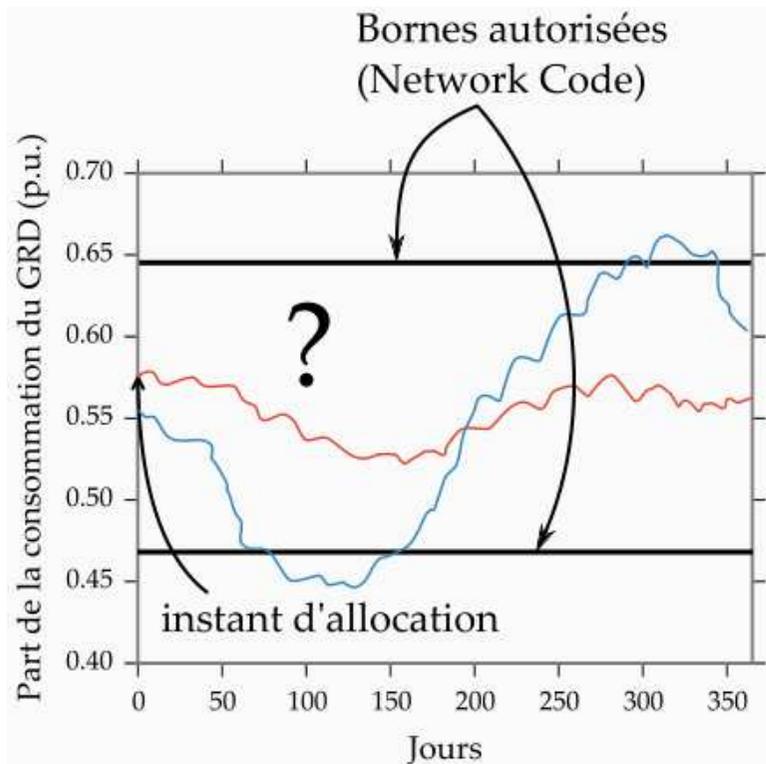


# Problématique

- Quel "mix" pour assurer l'objectif à délester à tout instant ?
- Quelle charge est délestée? (départs mixtes – impact du PV)
- Comment assurer un objectif fixe à délester avec une charge qui varie?

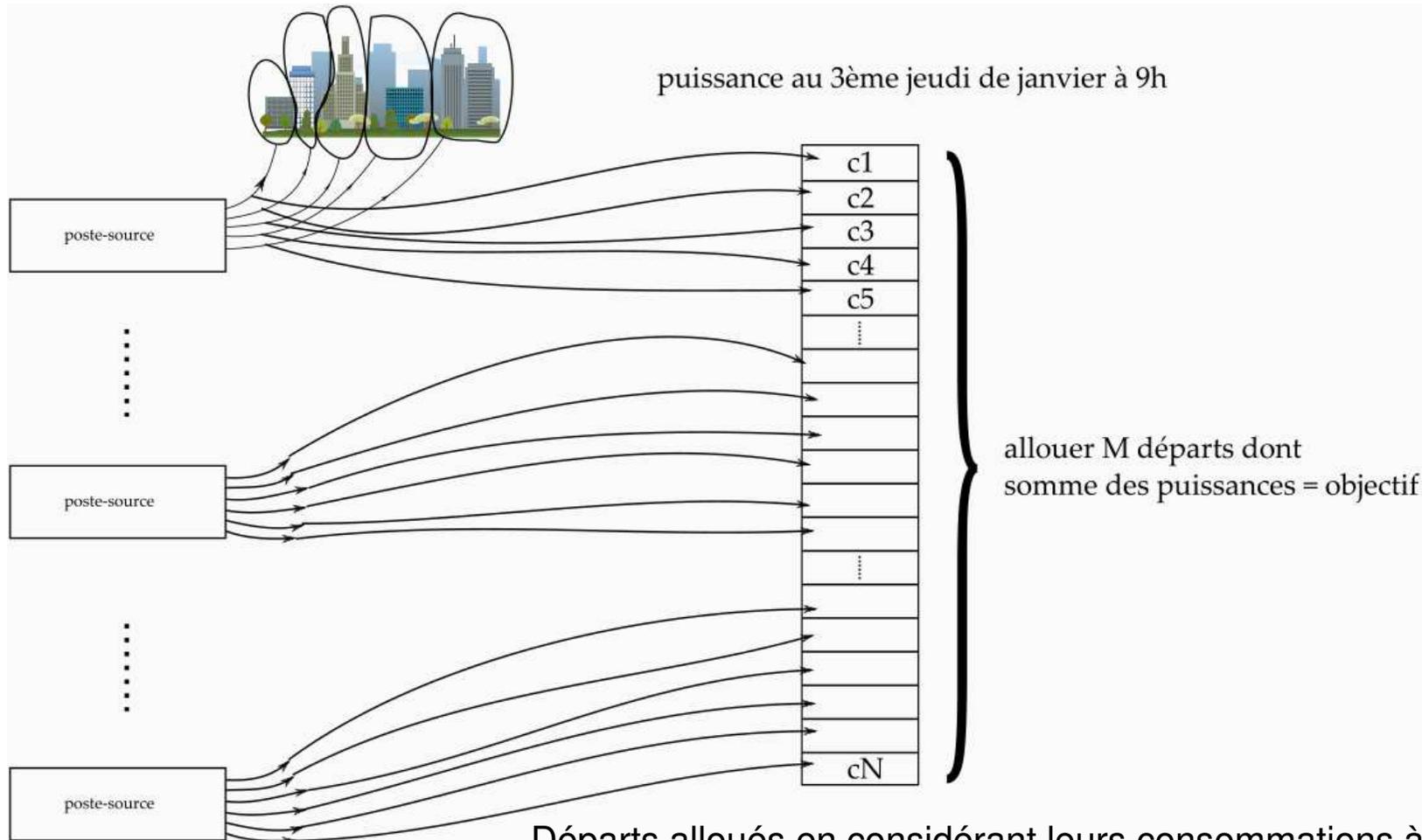


# Objectifs du travail



- Intégrer les obligations réglementaires du NCER avec les contraintes opérationnelles d'Enedis concernant les relais
- Implémenter des plans de délestages permettant les meilleures performances fréquentielles;
- Donner des bornes limites dans lesquelles la charge allouée peut varier.
- Anticiper l'intégration de relais plus évolués (mesurant par exemple le ROCOF ou permettant une allocation à distance et régulière)

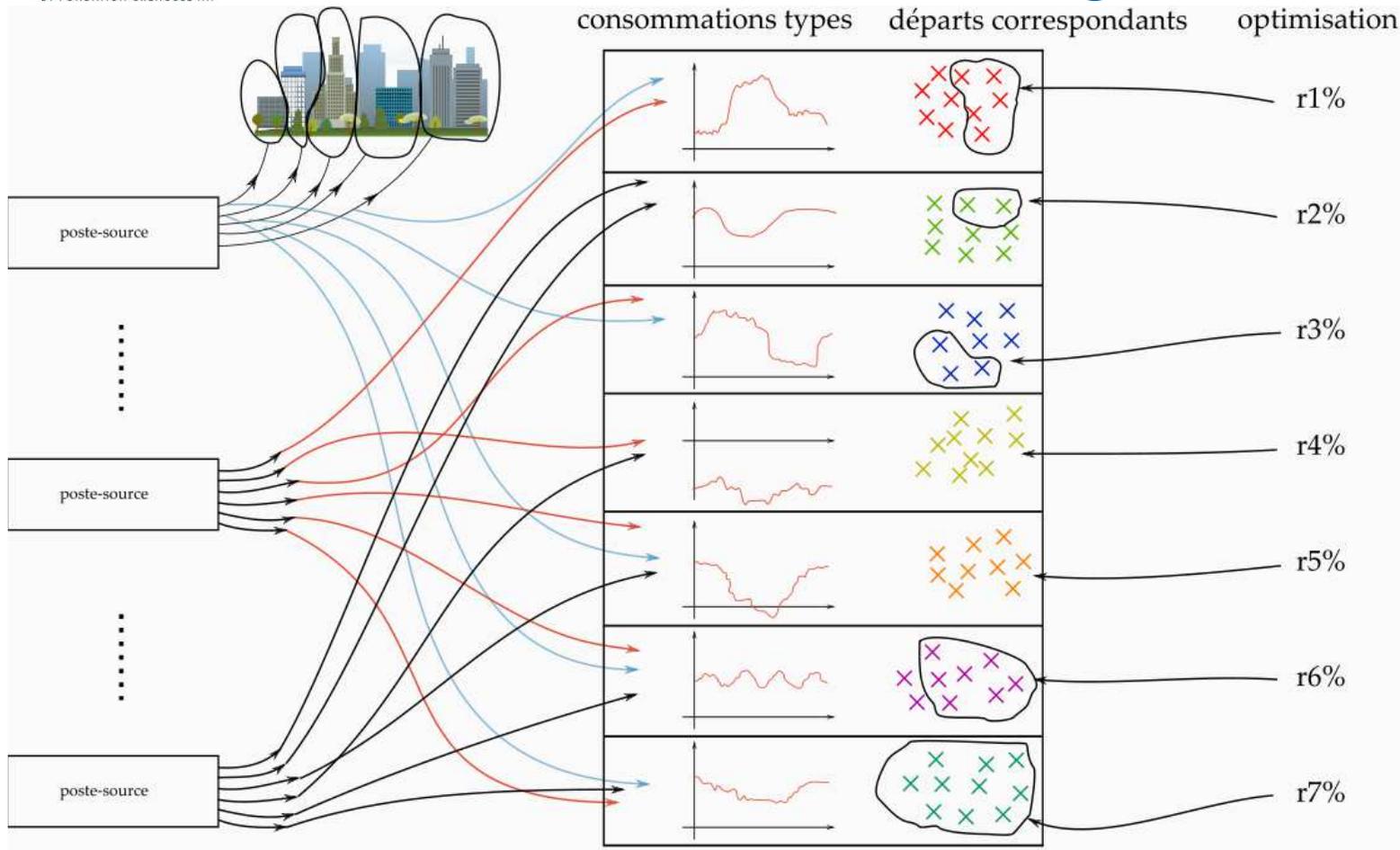
# Allocation « traditionnelle »



Départs alloués en considérant leurs consommations à un instant de l'année



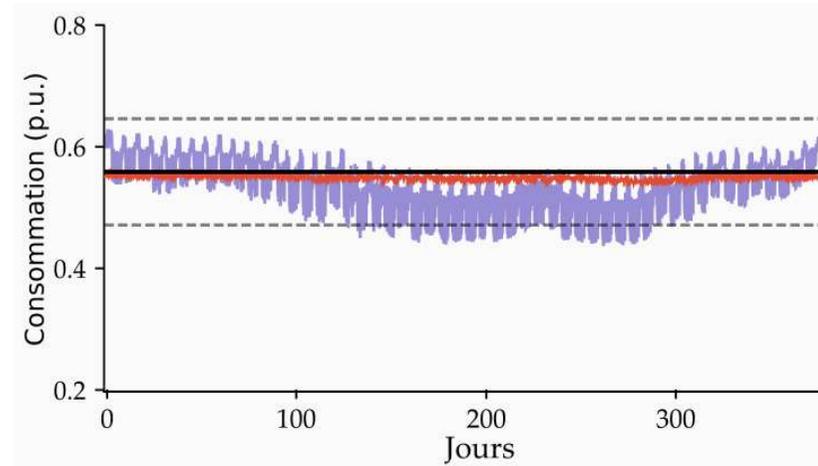
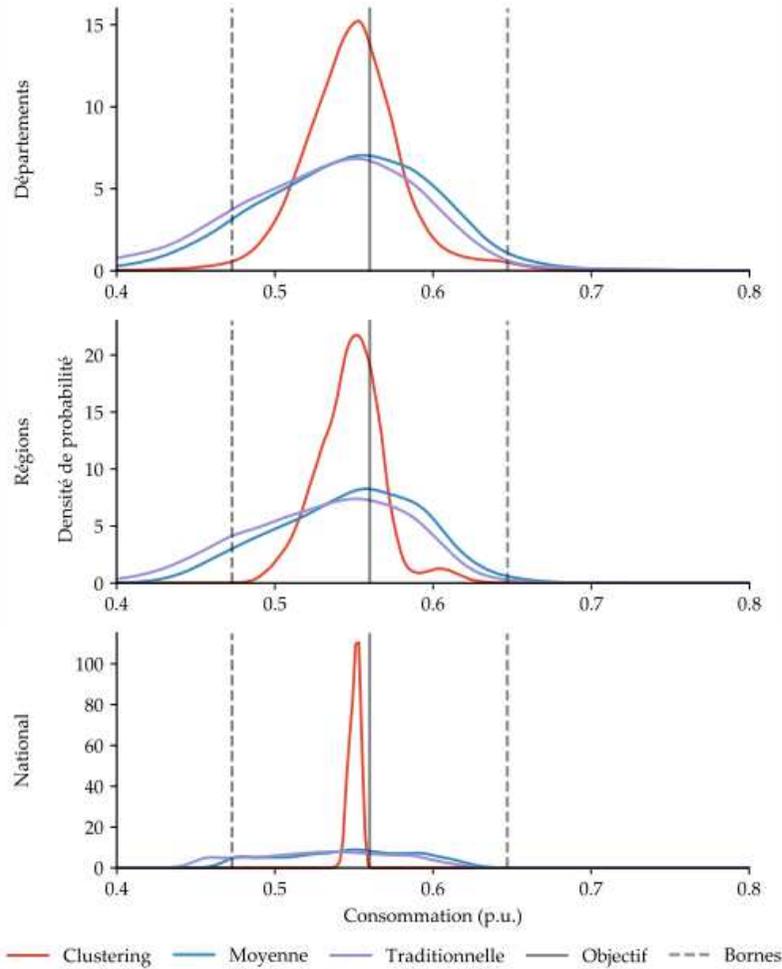
# Allocation clustering



Allocation optimisée en fonction de la courbe de charge de chaque départ



# Résultats marquants



- Méthode traditionnelle, moyenne et clustering
- Allocation à l'échelle nationale, régionale et départementale
- Création des échelons
- Ré-allocation avec différentes périodes
- Délestage multi-critères



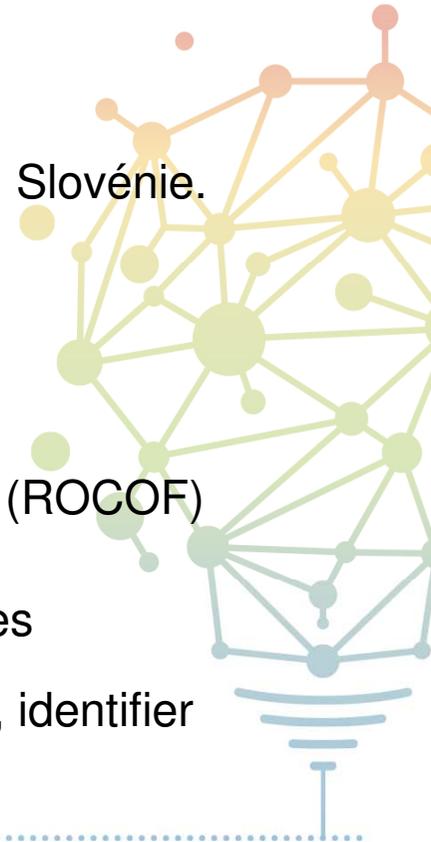
# Transfert de la recherche vers l'industrie

- Court terme
  - Problématique: répondre aux contraintes réglementaires à échéance de 2022
  - Choix du « quinconçage ». Travail effectué sur 2021 et implémenté sur 2022
  - Permet d'utiliser les contrôle/commande existant dans les postes sources en attendant le déploiement complet des contrôle/commande numériques
- Moyen terme
  - S'approprier la méthode d'optimisation pour le classement des départs (elle a été présentée et validée en interne) et la mettre en regard des outils d'Enedis
- Long terme
  - Ré-évaluation des besoins lors du passage complet des ~2500 postes sources en contrôle/commande numériques



# Conclusions

- Un travail de thèse reconnu par :
  - La communauté scientifique → 2 papiers et 3 conférences internationales
  - Le partenaire industriel → appropriation à moyen/long terme par Enedis
  - La communauté Smart Grids → Prix Think Smart Grids
  - Les partenaires académiques → séjour de 3 mois à l'Université de Ljubljana, Slovénie. Collaboration qui continue sur des sujets connexes
- Contributions principales
  - Considérer des contraintes réalistes sur des données réelles volumineuses
  - Méthode de clustering pour une solution efficace et accessible
  - Fréquence de la période d'allocation sur les échelons
  - Etude prospective intégrant des mesures supplémentaires pour le délestage (ROCOF)
- Perspectives
  - Robustesse d'un plan de délestage à un ensemble de perturbations probables (stochastique)
  - Simulations liant réseaux de transport et distribution (jumeaux numériques?), identifier des parties vulnérables du réseau





# NOS PARTENAIRES

MÉCÈNE



LABORATOIRES ASSOCIÉS



ECOLES ASSOCIÉES



# Nouveaux travaux initiés dans la chaire

Marie-Cécile ALVAREZ-HERAULT  
Titulaire de la chaire SmartGrids



# Travaux R&D en basse tension

**Fonctionnement des réseaux BT îlotés:**  
Black-start et fonctionnement stable d'un  
réseau BT isolé en utilisant les productions EnR

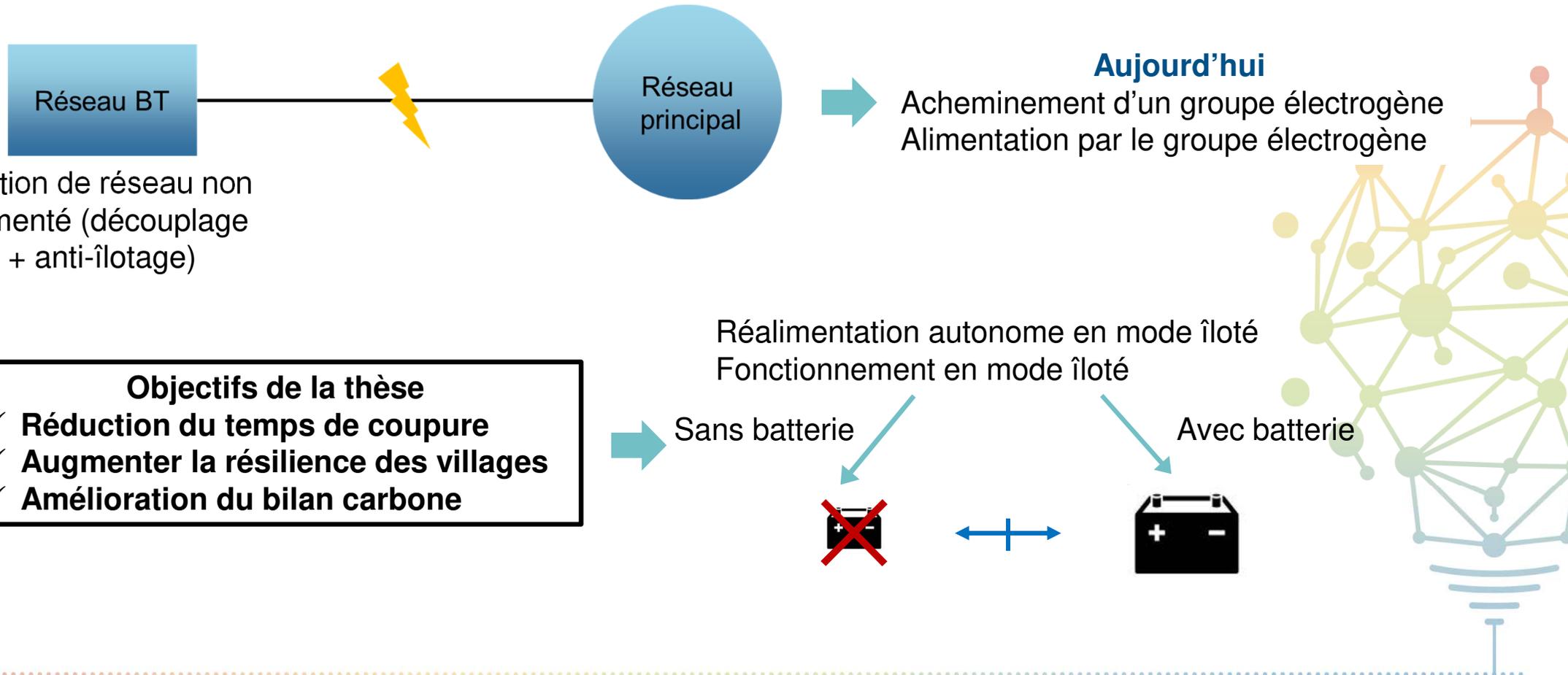


**Jane Marchand**



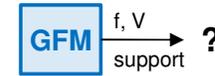
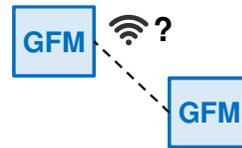
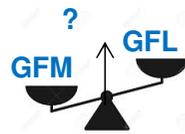
# Fonctionnement des réseaux BT îlotés

## Contexte et objectifs



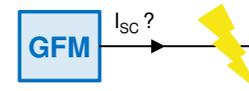
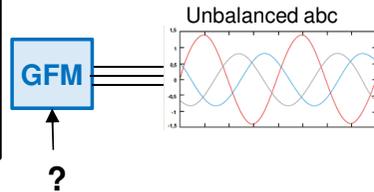
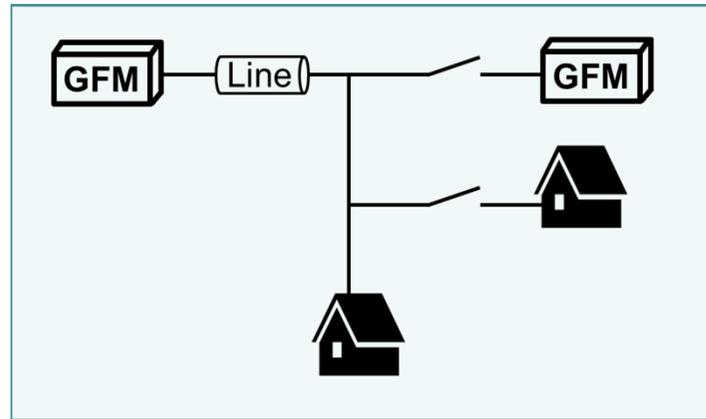
# Fonctionnement des réseaux BT îlotés

## Défis scientifiques et techniques



### Challenges

- Proportion de GFL/GFM
- Coordination
- Fonctions support & black-start
- Réseau déséquilibré
- Equipement de protection
- Protection anti-îlotage
- Facilité d'implémentation sur des onduleurs commerciaux
- Bilan des bénéfices



# Travaux R&D en basse tension

**Dispositifs innovants en électronique de puissance** pour les services réseaux basse tension en présence d'un fort taux d'énergies renouvelables et de véhicules électriques



Sabine Vieira



# Dispositifs innovants en EP

## Contexte et objectifs

- Développement production PV et VE en BT → augmentation des sur/sous-tensions locales et perturbations harmoniques sur le transformateur HTA/BT



### Solution actuelle

- Changement de la prise du régleur hors charge (rare)
- Renforcement



### Solution étudiée

Emulation du fonctionnement d'un régleur en charge grâce à des convertisseurs de puissance



# Dispositifs innovants en EP

## Défis scientifiques et techniques

- Objectif principal : régulation de tension BT
- Respect des normes applicables aux réseaux basse tension
- Compatibles avec le plan de protection
- Versatiles ou configurables pour s'accommoder à diverses situations
- Résilients aux pannes et indisponibilités
- Respectent une contrainte de compacité
- Economiquement compétitifs par rapport aux solutions traditionnelles (approche TOTEX)



# Travaux R&D sur l'IA

**Apports des mesures des compteurs Linky pour une meilleure connaissance des charges du réseau de distribution**



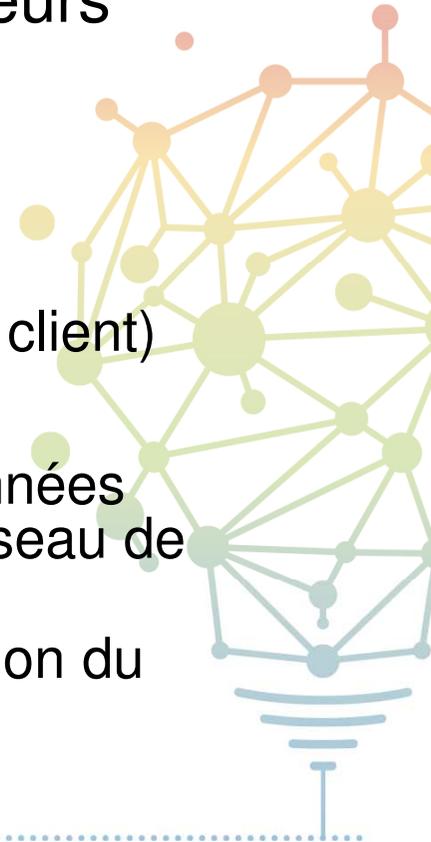
**Guilherme Ramos Milis**



# Apport des données Linky

## Contexte et objectifs

- De nombreuses données disponibles grâce aux compteurs Linky
  - Index journalier de consommation et production
  - Puissance maximale horodatée
  - Événements de (non) qualité de fourniture
  - Courbe de charge au pas de temps 30 minutes (si accord du client)
- Objectifs des travaux de recherche
  - Utilisation de ces nouvelles données couplées à d'autres données publiques pour améliorer la connaissance des charges du réseau de distribution
  - Impacts sur les méthodes de dimensionnement et d'exploitation du réseau



# Apport des données Linky

## Défis scientifiques et techniques

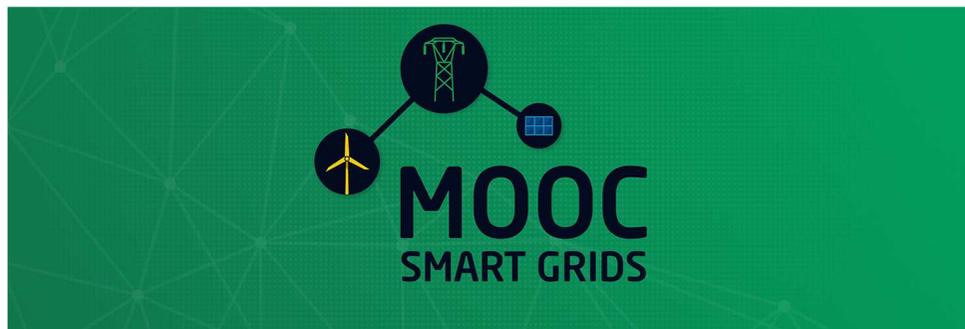
- Identification de cas d'usage pertinents
  - Thermosensibilité
  - Evolution des comportements
  - Scénarios de planification
  - Foisonnement en BT
- Développement d'algorithmes d'analyse de données
  - Traitement d'une quantité de données importantes (« big data »)
  - Nettoyage et sélection des données
- Couplage de modèles théoriques avec des modèles issus des données



# Travaux en lien avec la formation

## MOOC

- Maintenance
- Nouvelles séquences
  - Expérimentales
  - Intelligence artificielle pour la distribution



## ESCAPE GAME

Saurez-vous anticiper l'arrivée massive d'ENR et de VE à horizon 2050?



# Session café-posters

- Présentation des chaires SmartGrids et IA-Energie
- Travaux des doctorants/post-doctorants de la chaire SmartGrids
- Projet aVENir (Khaled Hajar et Antoine Labonne) 
- Posters invités sur des thématiques d'intérêt pour la distribution de l'avenir
  - Courant continu (Heitor Farias De Barros)
  - Système à faible inertie (Fadi Kelada)
  - Microréseaux temporaires sans batterie (Candela Utrilla Bustamante)
  - Intelligence artificielle (Hassan Issa)





# NOS PARTENAIRES

MÉCÈNE



LABORATOIRES ASSOCIÉS



ECOLES ASSOCIÉES



# Applications “smart grids” de l’infrastructure de comptage communicant : Une approche expérimentale

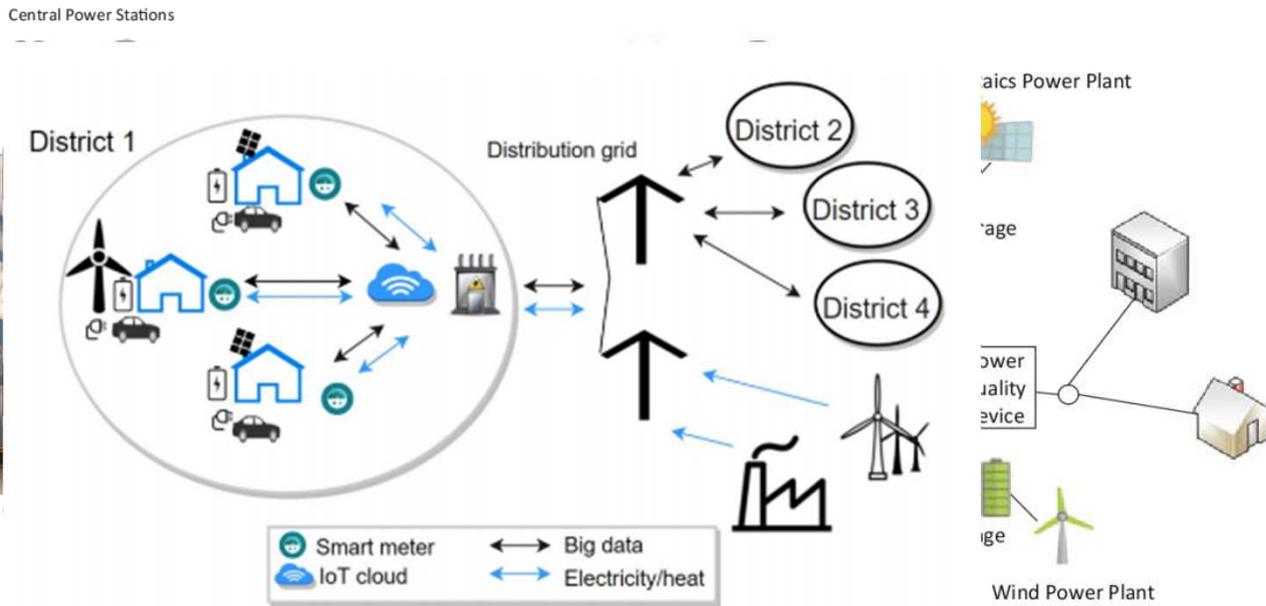
Ali HAMDAN

Encadrants G2ELab/LIG: Florent CADOUX, Christophe BOBINEAU

Encadrants Enedis: Cédric CHAUVENET, Abdallah TOUIL

# Contexte générale

- Décarbonation
- Décentralisation
- Digitalisation



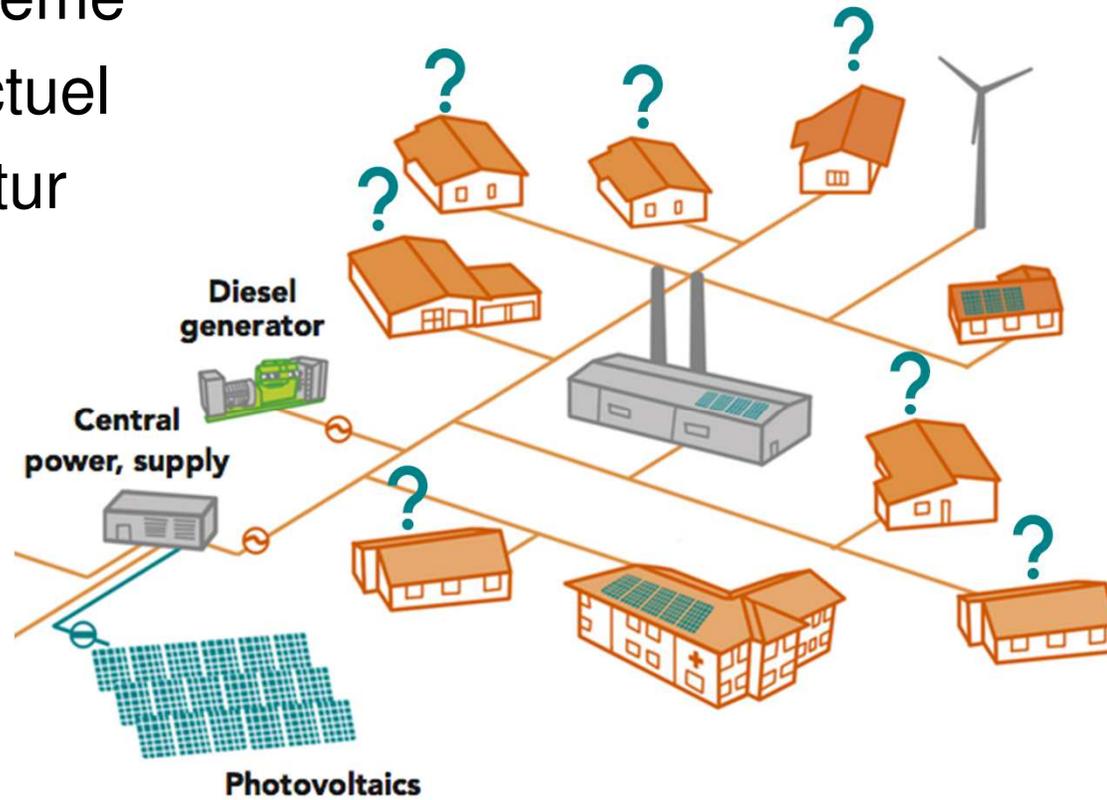
# Objectifs

- Ancien système
- Système actuel
- Système futur

✓ Renforcement



✓ Flexibilité



# Approches utilisées

- Comment?

En utilisant la télérelève en réseau fixe (AMI: Advanced Metering Infrastructure)

L'AMI nous offre:

- Réseau de télécommunication
- Capteurs électriques
- Actionneurs

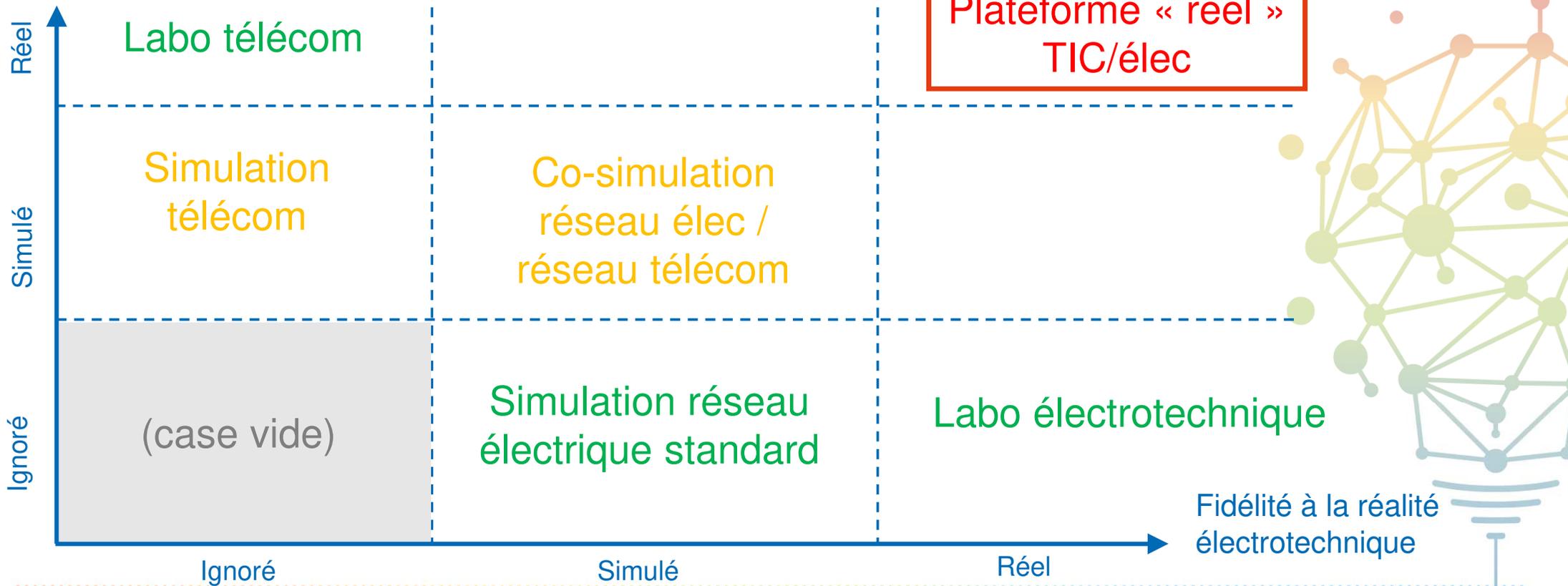
Nouvelles technologies qui

- Augmentent la complexité du système électrique
- Besoin de bien tester et valider



# Exigence cruciale: capturer les effets électrotechniques et les effets "TIC"

Fidélité à la réalité TIC



## En quelques mots...

- Il serait très utile de disposer d'une plateforme expérimentale :
  - dédiée à la modélisation "cyber-physique" des smart grids
  - utilisant au maximum des éléments (composants physiques et logiciels) réels, et non pas des abstractions de ces éléments

... et qui soit suffisamment générique pour rendre possible le prototypage rapide d'une grande diversité d'applications smart grids

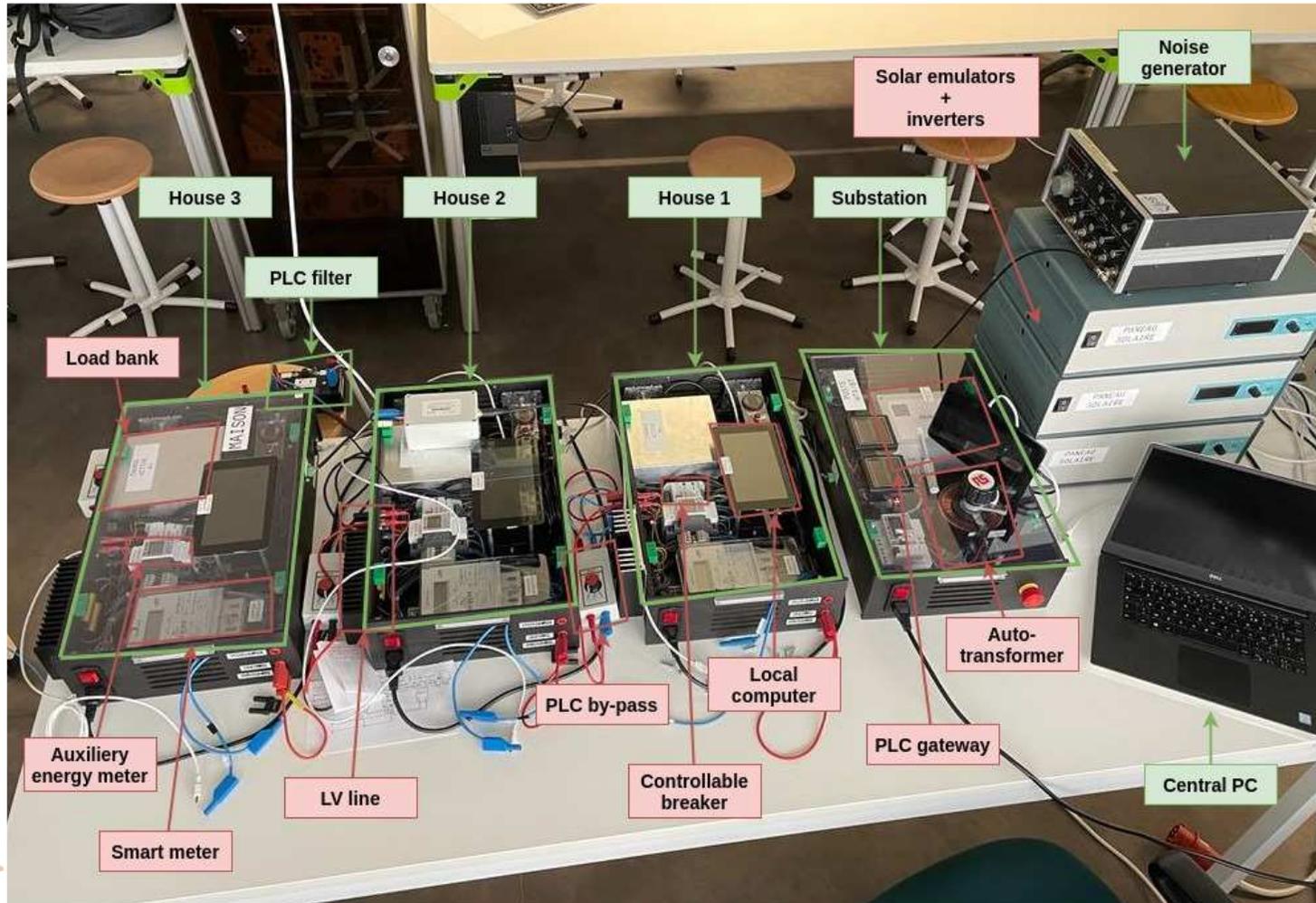


# Plateforme expérimentale

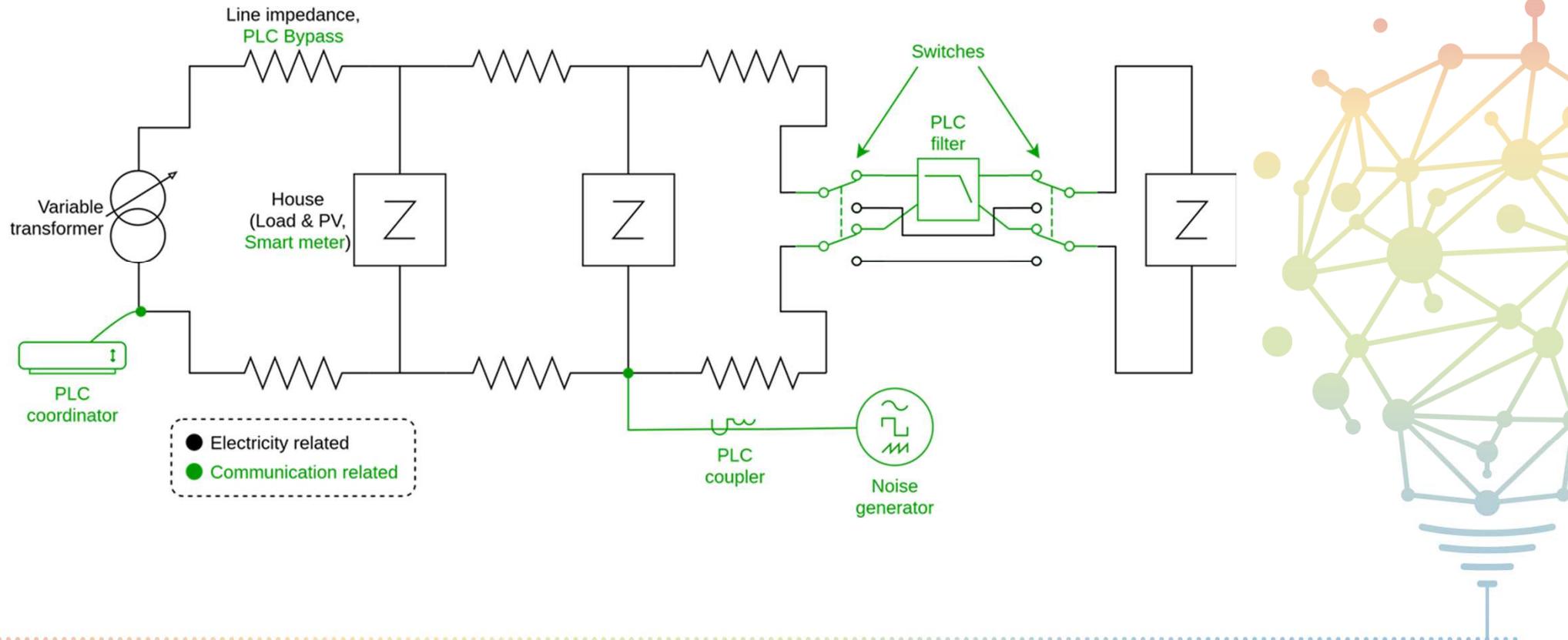
Réseau électrique	Consommation / Production	Usagers	Réseau télécom	Contrôle
Simulé (load-flow)	Simulée (modèles)	Simulés (scénarios prédéfinis)	Simulé (1. Simple: communication parfaite 2. Élaboré: simulation de paquets, trames...)	
En labo (lignes émulées)	En labo (appareils physiques qui consomment / produisent l'électricité)	En labo (Interactif via Interface Homme- Machine IHM)	En labo (CPL, Modbus...)	
Réel	Réelle (installation électrique)	Réel	Réel (AMI, LAN)	Réel



# Plateforme expérimentale: un prototype



# Plateforme expérimentale: schéma simplifié



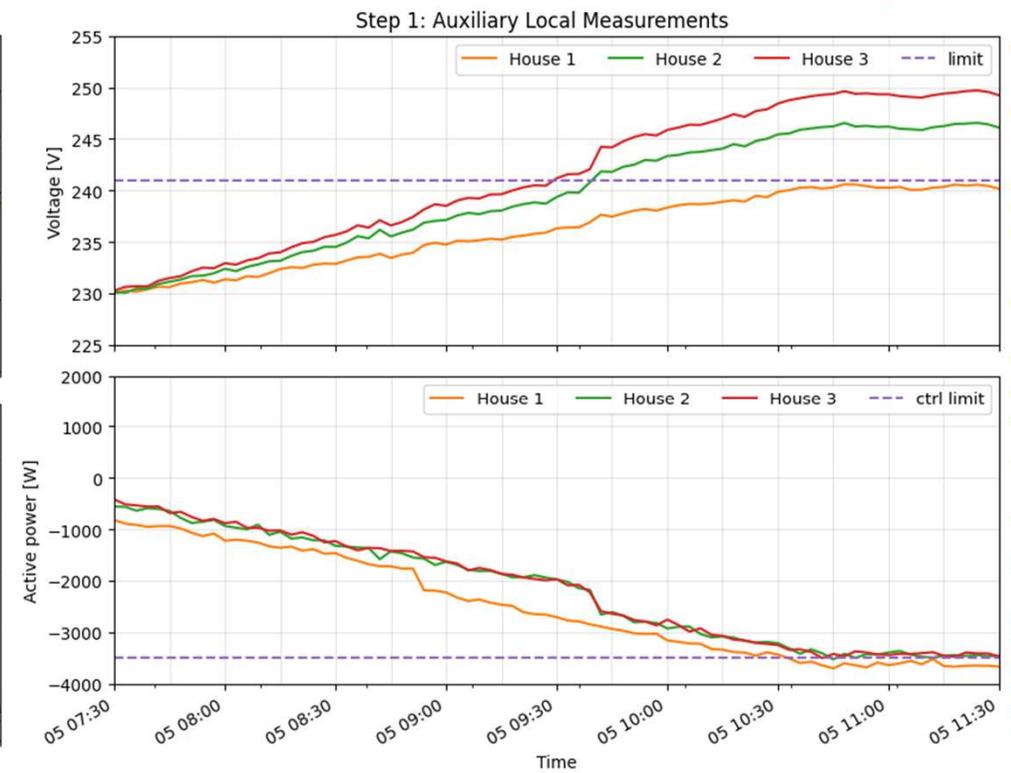
# Cas d'usage

- Application ciblée:  
Gestion coordonnée des congestions en tension en utilisant le réseau CPL d'AMI
- Objectifs:  
Prise en considération, conjointement, des aspects électrotechniques et des aspects télécoms: l'effet des conditions de la communication sur le contrôle
- Scénario:  
Un réseau BT avec une forte pénétration de photovoltaïque  
→ Contrôle de la tension par l'effacement de la puissance produite:  $P(U)$



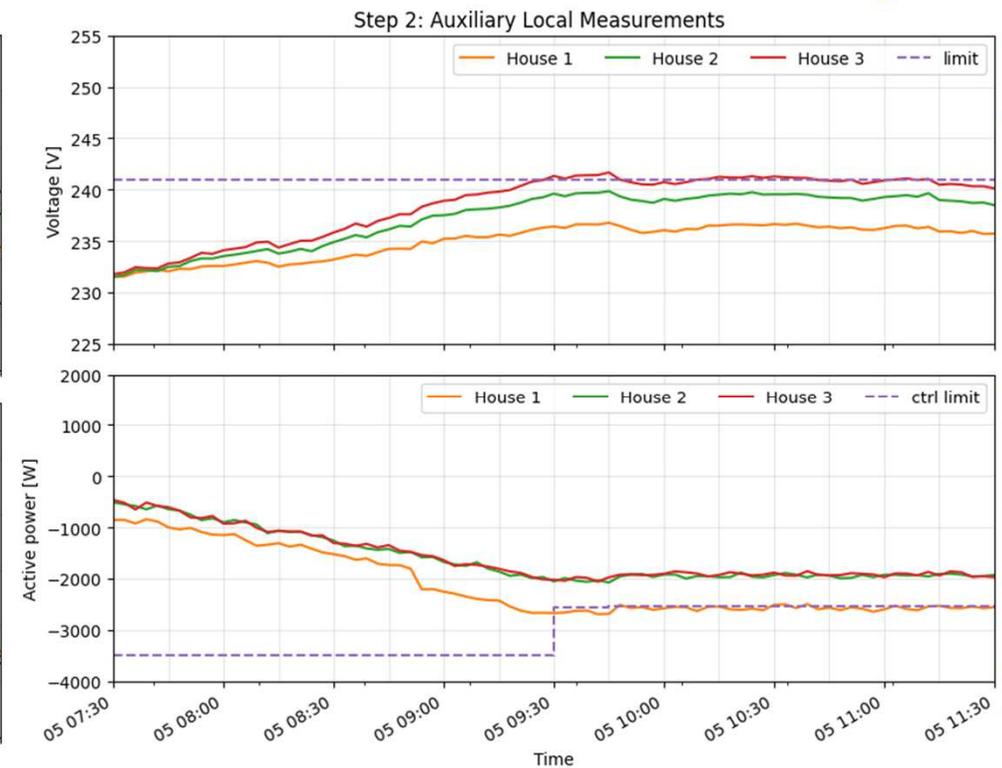
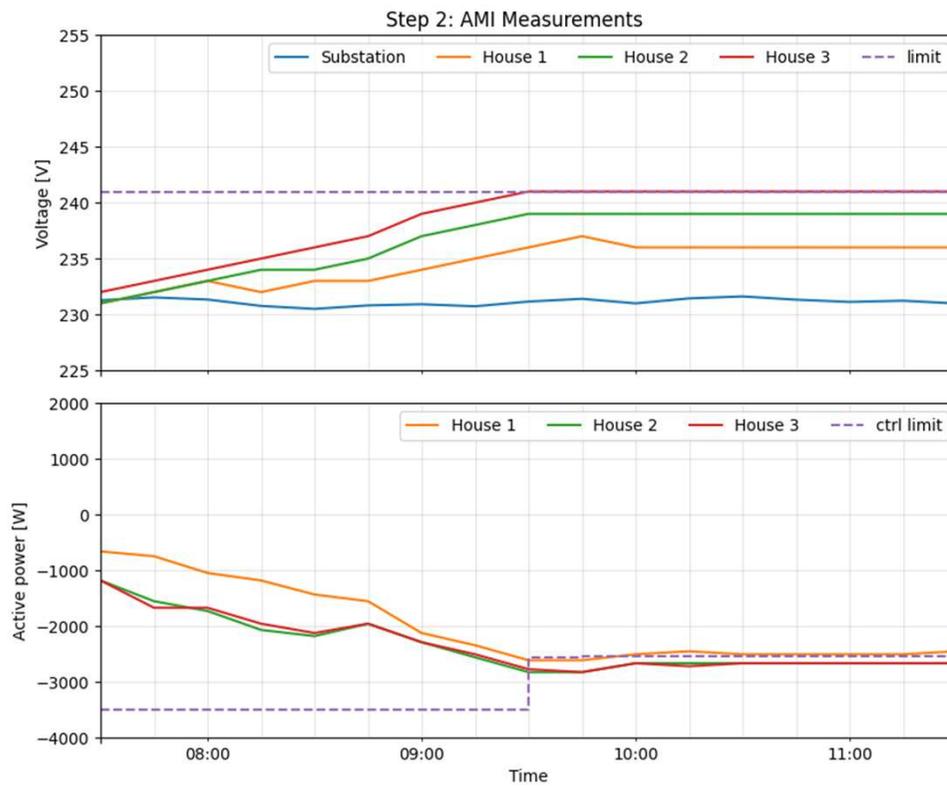
# Scenarior en 4 étapes : Etape I

## Pas de contrôle (scénario de référence)



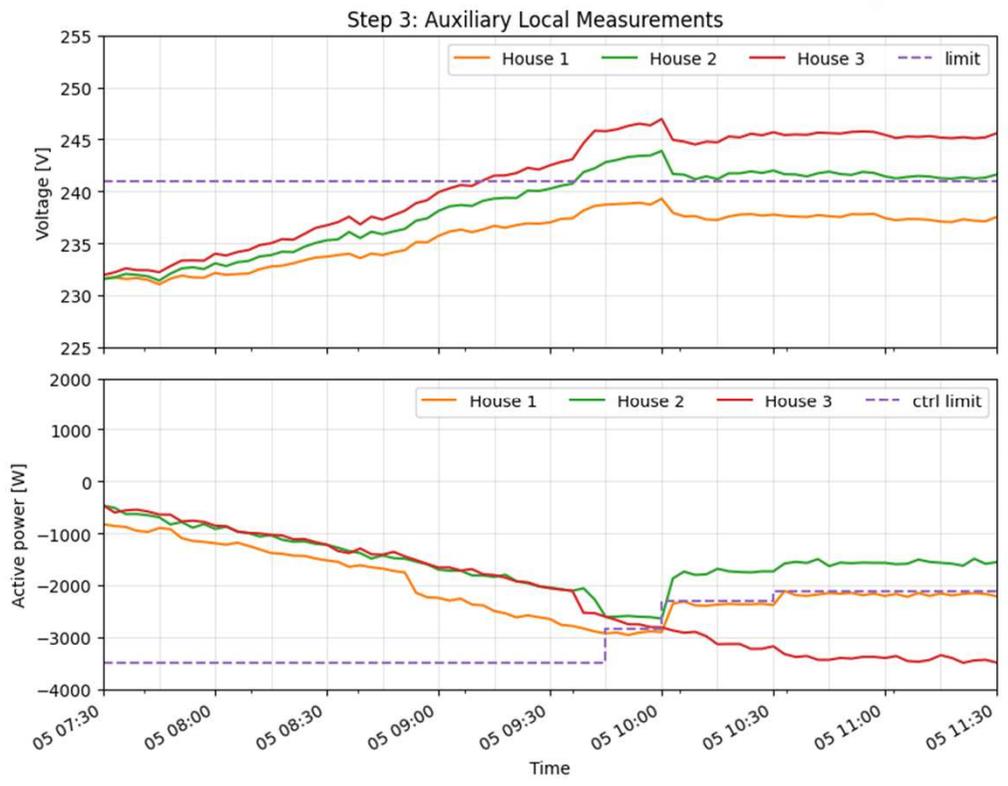
# Scenarion en 4 étapes : Etape II

## Contrôle simple, communication normale



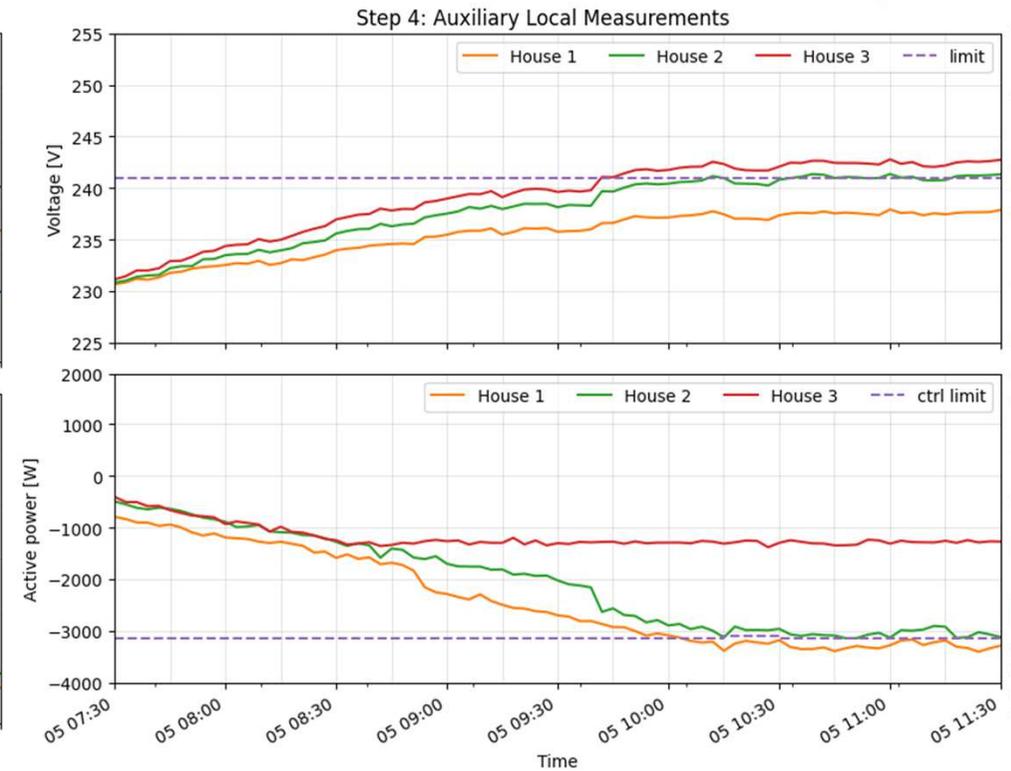
# Scenarior en 4 étapes : Etape III

## Contrôle simple, communication dégradée



# Scenarior en 4 étapes : Etape IV

## Contrôle avancé, communication dégradée



# Conclusions et perspectives

- Conclusion:
  - ✓ Identification de quelques défis futurs des smart grids
  - ✓ Conception et implémentation d'une plateforme expérimentale pour tester des mécanismes de pilotage et de supervision de smart grids
  - ✓ Développement et test d'un contrôle de tension basé sur l'AMI et la flexibilité de production photovoltaïque
- Perspectives possibles
  - Amélioration de la plateforme (réseau triphasé, logiciel standardisé, etc.)
  - Test sur d'autre cas d'usage de pilotage et supervision
  - Test du contrôle proposé dans un réseau réel





# NOS PARTENAIRES

MÉCÈNE



LABORATOIRES ASSOCIÉS



ECOLES ASSOCIÉES



# Résilience théorique et pratique du CPL-G3

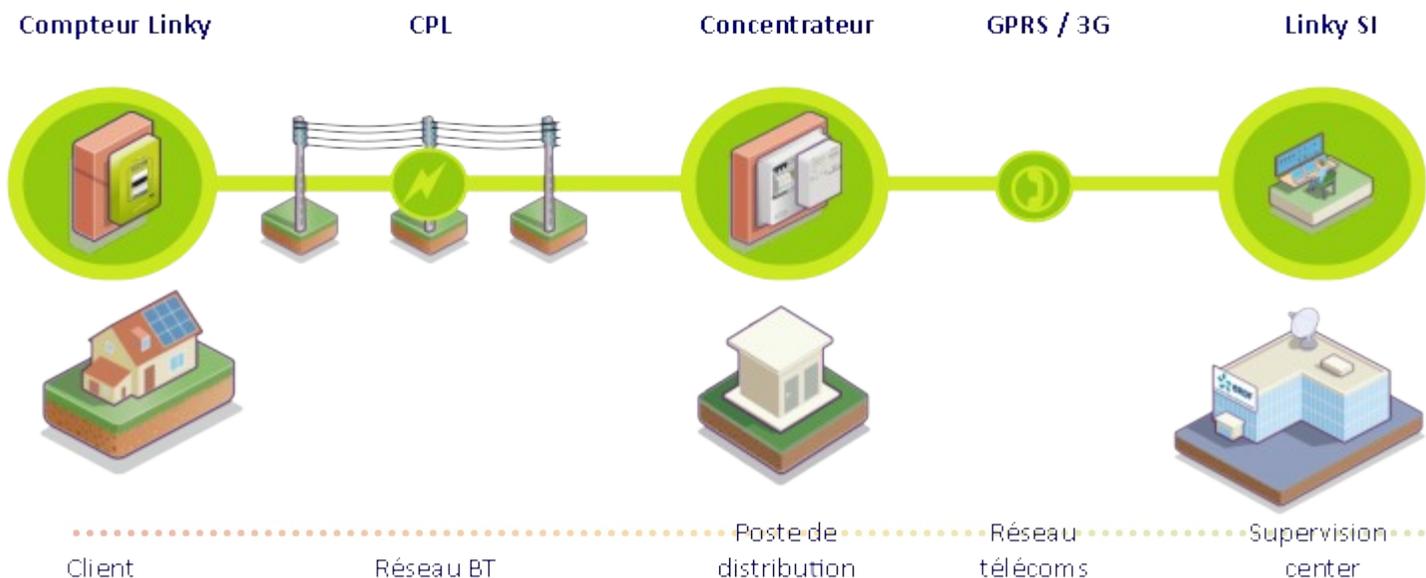
en situation dense et face à de nouveaux usages

**Henry-Joseph AUDÉOUD**  
Nicolas GAST (LIG)  
Abdallah TOUIL (Enedis)

Mai 2022



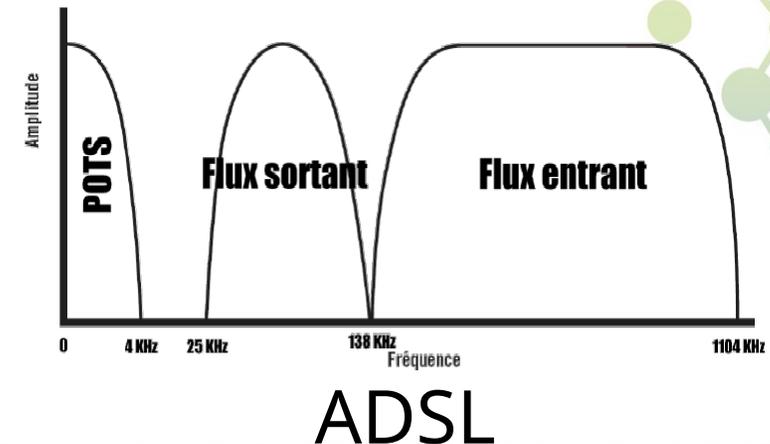
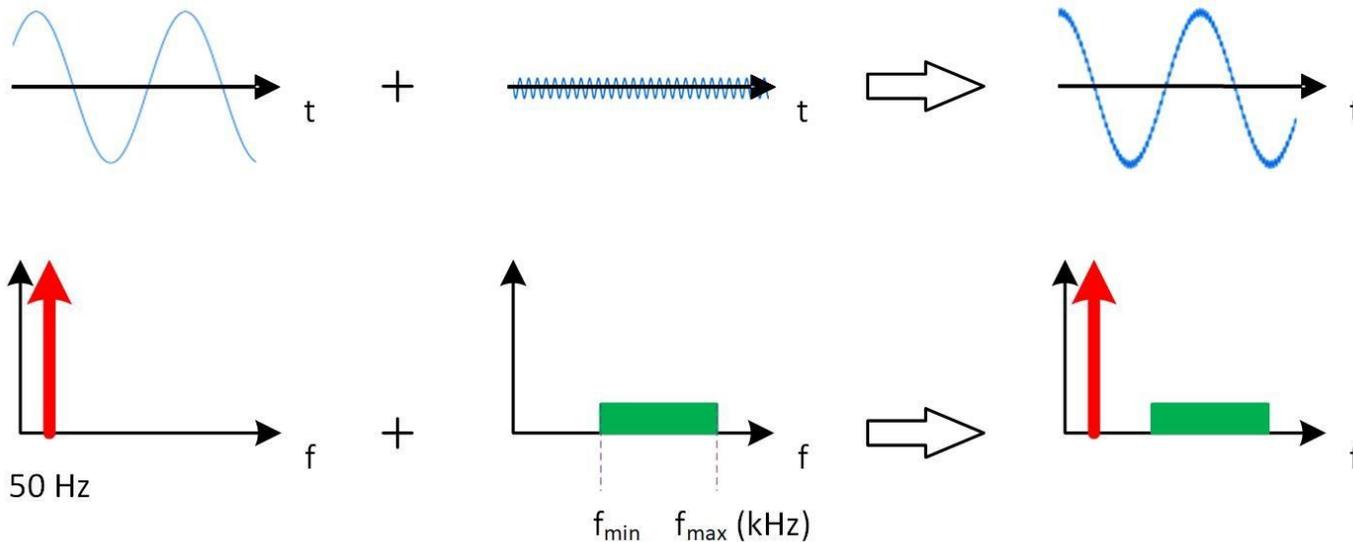
# Contexte et objectifs



# Contexte et objectifs — CPL

## *Courants Porteurs en Ligne*

- Signal transporté sur le câble de distribution d'électricité
  - même câble, mais pas la même fréquence (10–100 kHz)
- Pareil que l'ADSL, mais sur un canal bien plus difficile



# Contexte et objectifs — CPL-G3

## G3-PLC Alliance

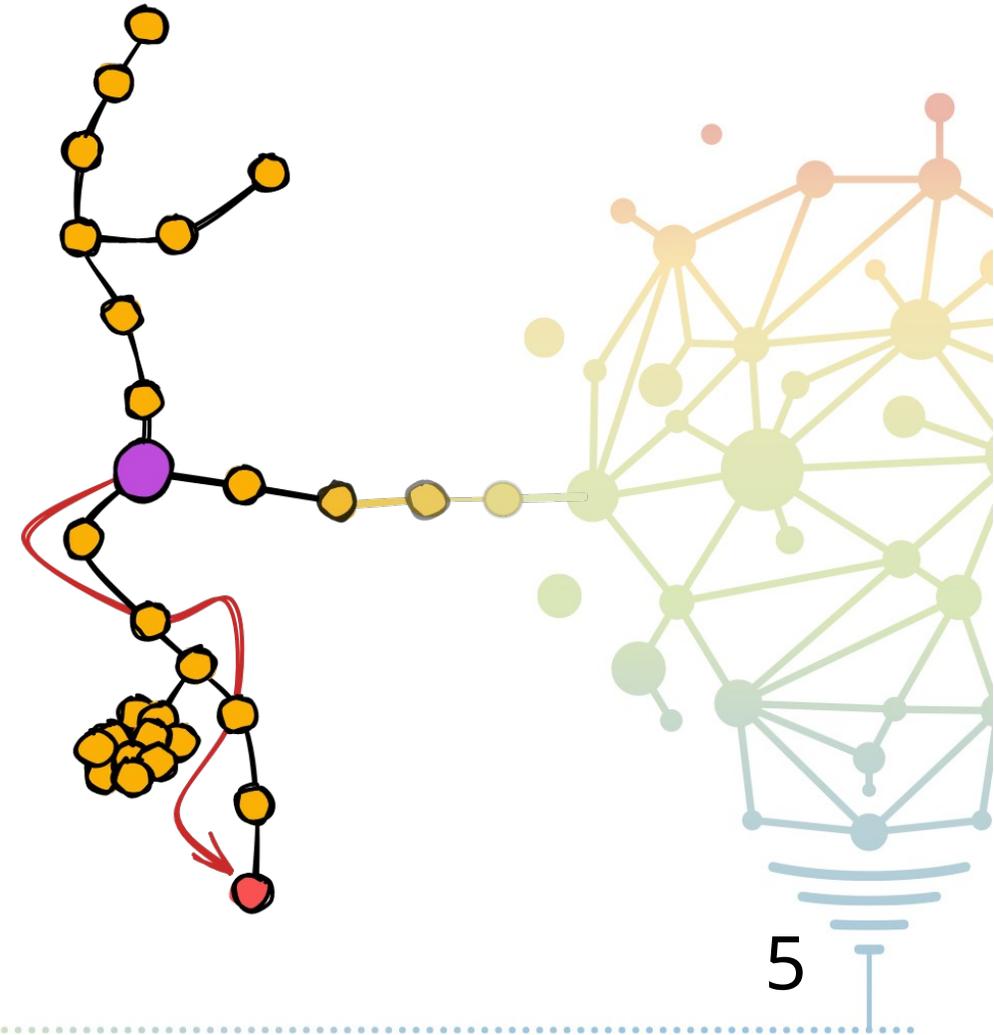
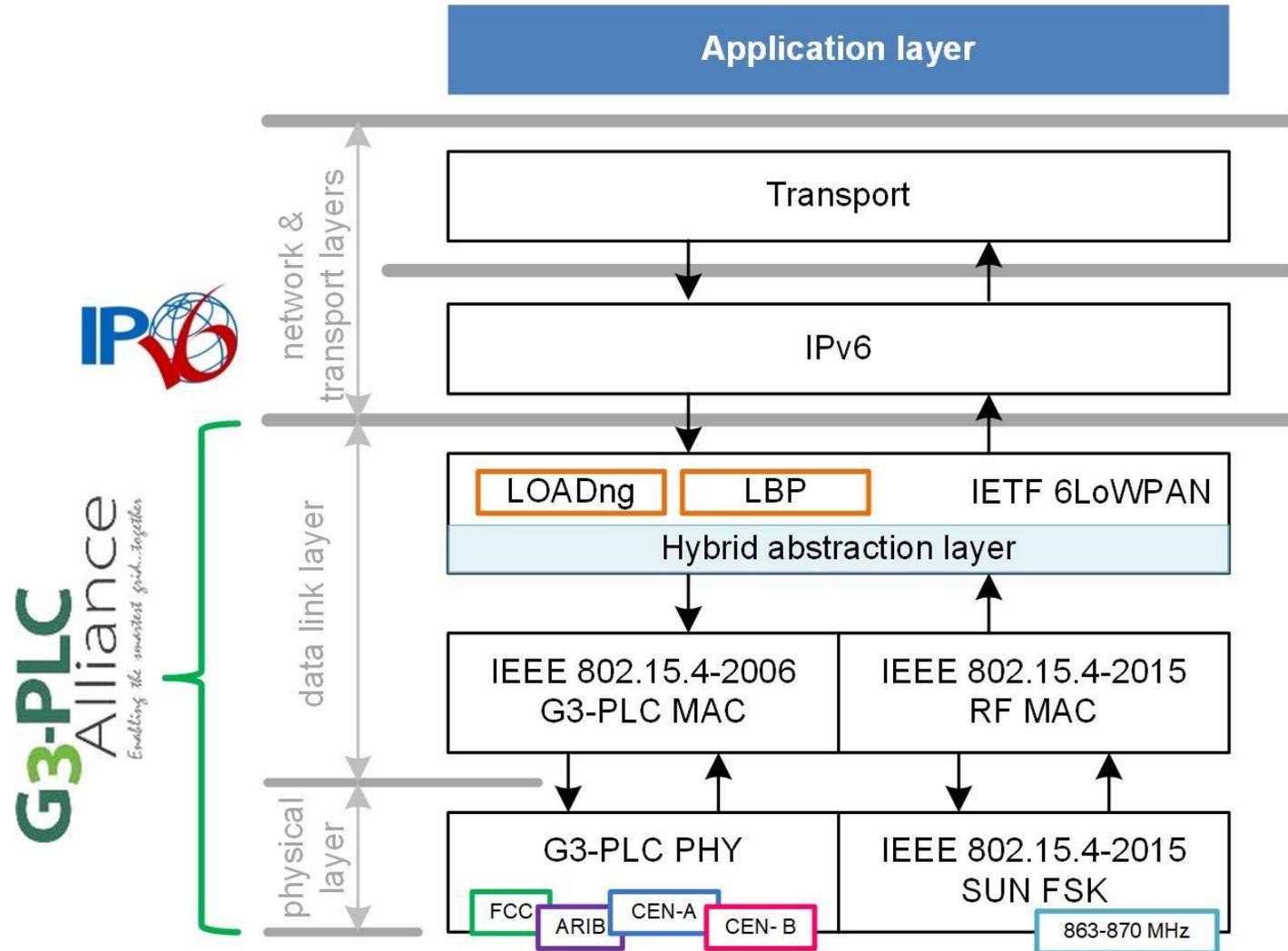
*Enabling the smartest grid...together*



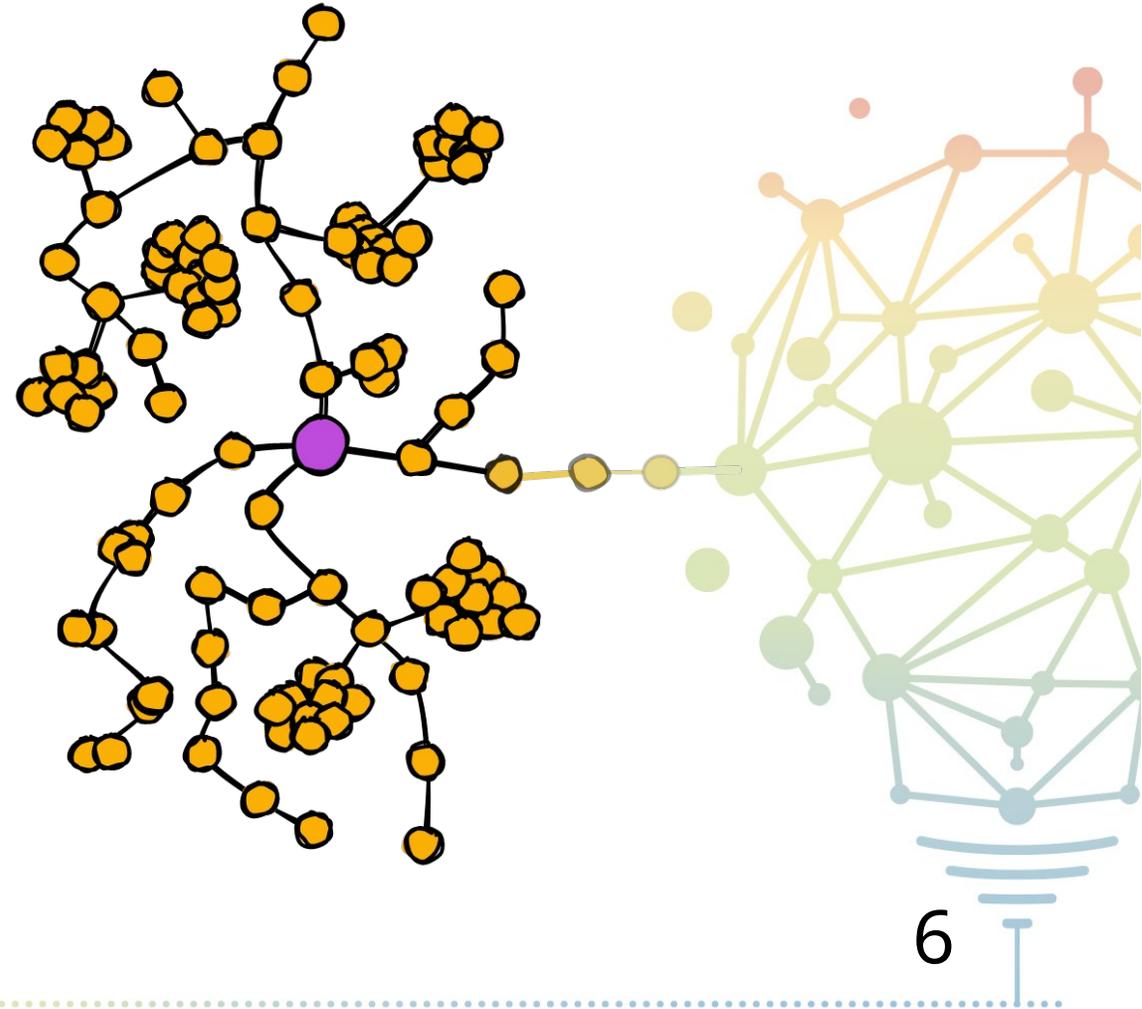
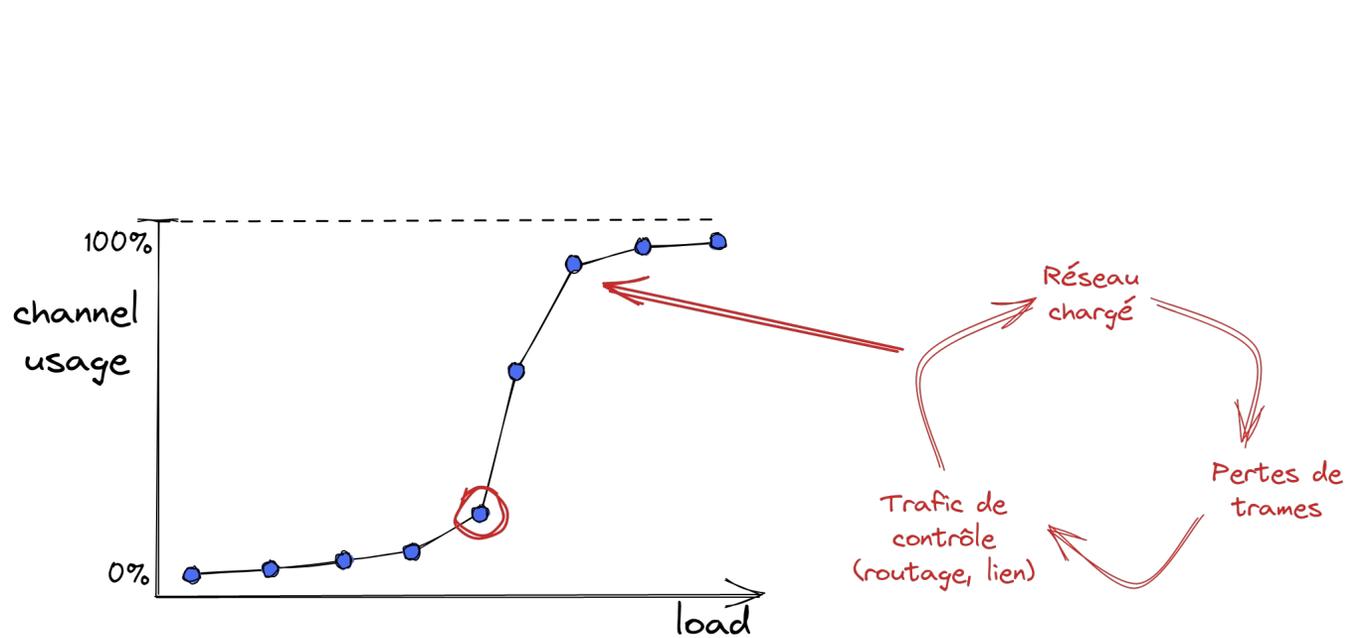
**ITU-T G.9903**



# Contexte et objectifs — CPL-G3



# Contexte et objectifs



# Contexte et objectifs

- Quelles limites actuelles à l'utilisation du réseau télécom ?
  - Limites à l'échelle du réseau entier
  - Contraintes à l'échelle d'un transmetteur
- Décongestion des grandes grappes ?
- Stabilité du réseau avec de nouveaux usages ?
- Validité de l'outil d'étude ?



# Approche utilisée

Théorie

Modèle théorique

Étude en simulateur

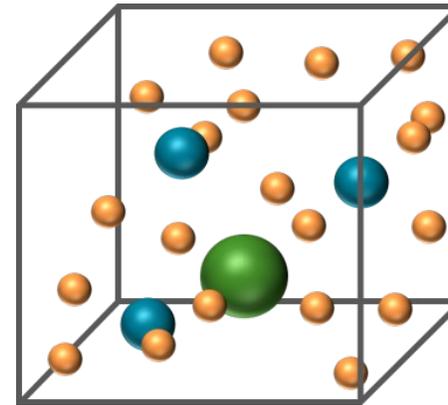
Étude en laboratoire

Expérimentations terrain

Déploiement en production

Pratique

**neuron**  
enabling networks



nSim

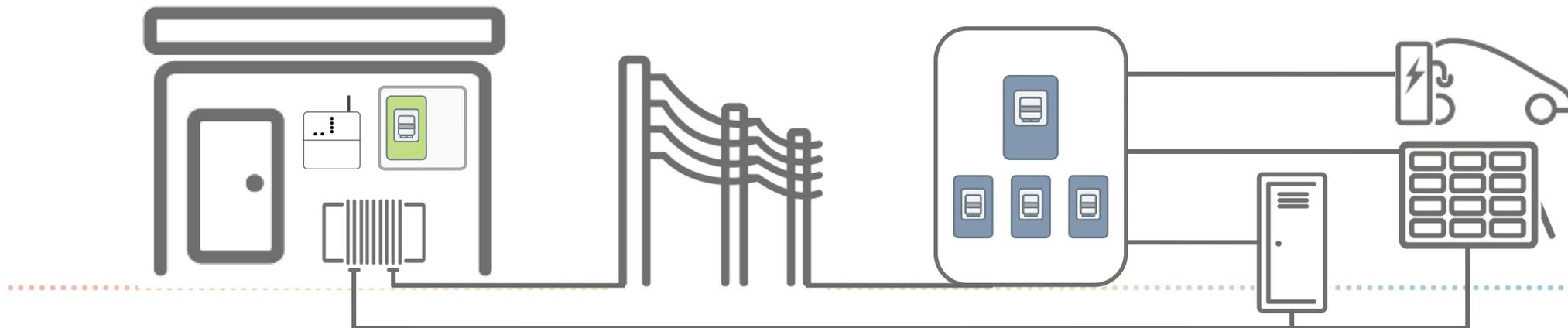


8

# Approche utilisée — en laboratoire

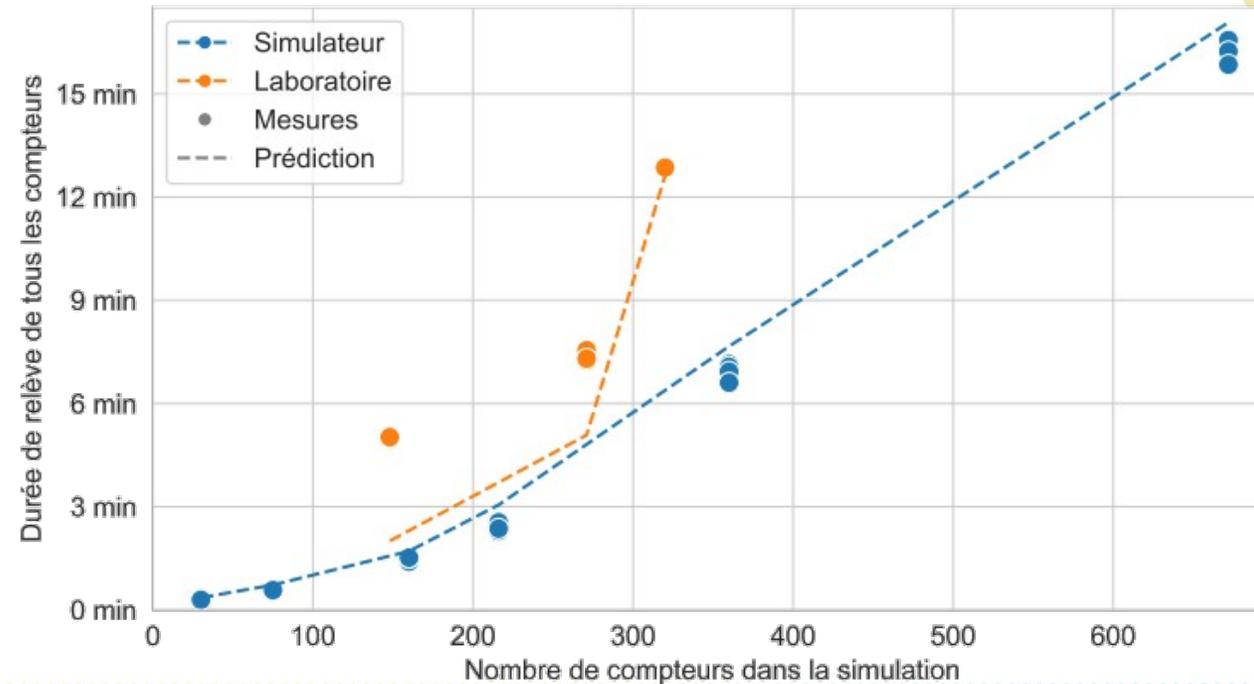


**SmartLab**  
**ENEDIS**



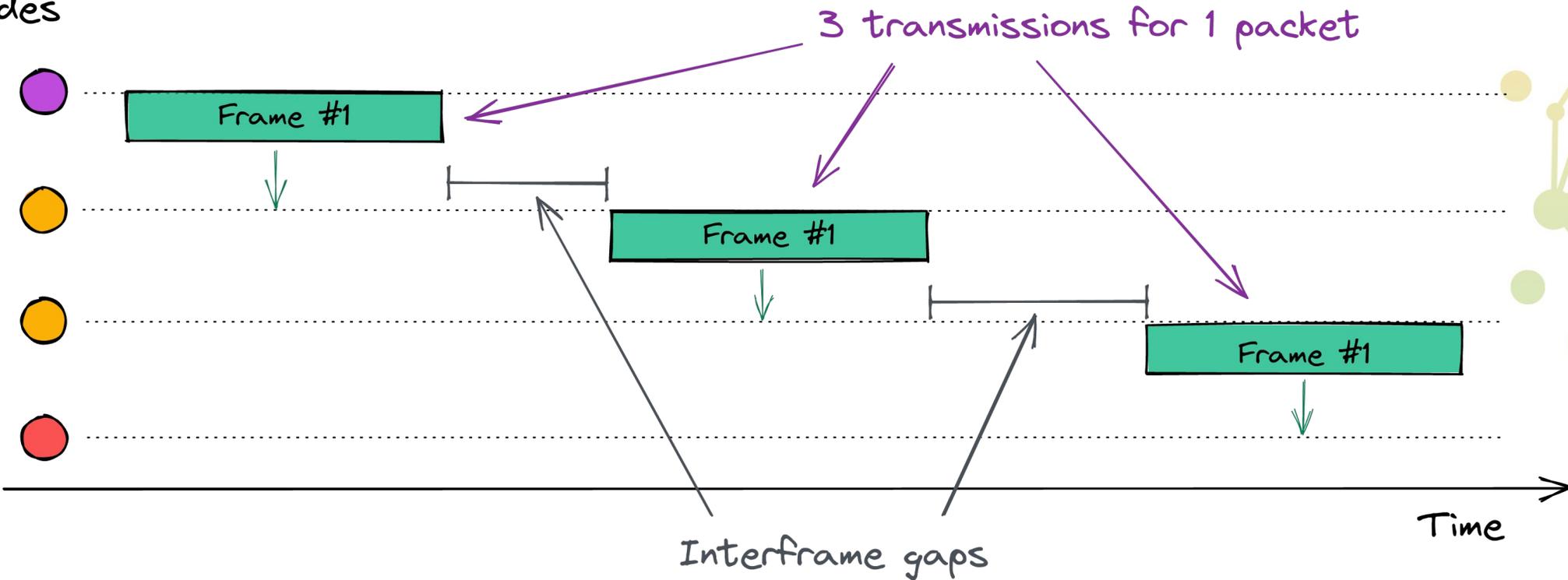
# Résultats marquants

- a) Simulation & expérimentation
- b) 4 facteurs explicatifs de la durée de collecte
- c) Prédiction possible



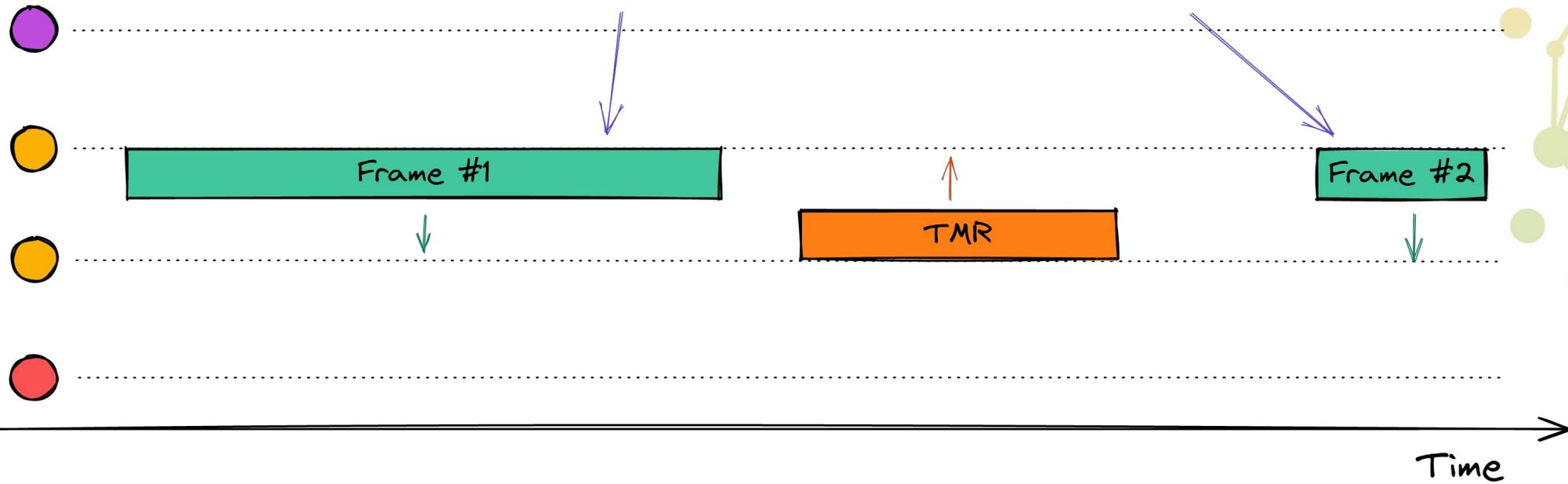
# Résultats marquants — durée de collecte, cause 1

Nodes



# Résultats marquants — durée de collecte, cause 2

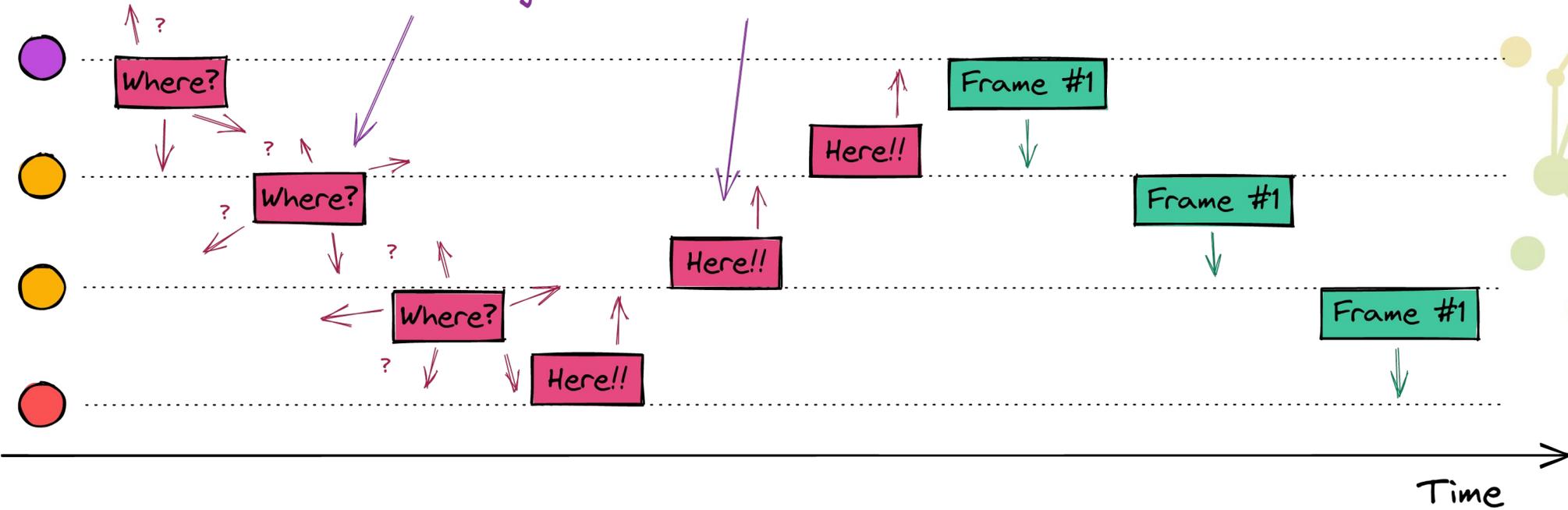
Nodes



# Résultats marquants — durée de collecte, cause 3

Nodes

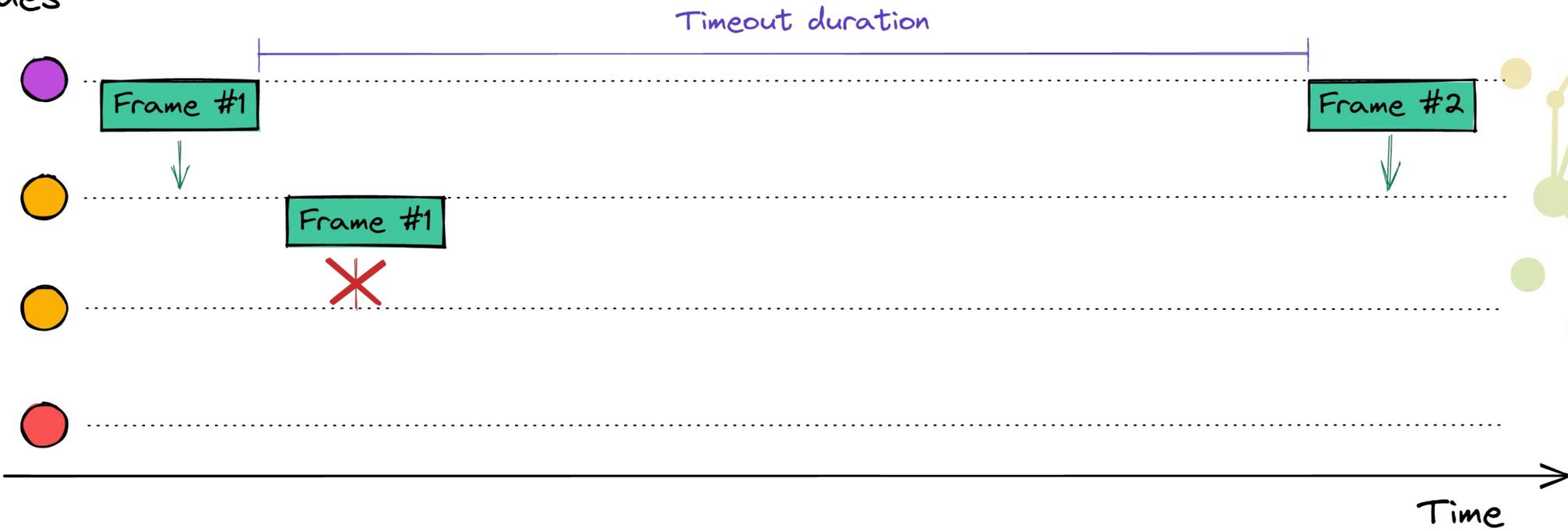
Route discovering and establishment



13

# Résultats marquants — durée de collecte, cause 4

Nodes



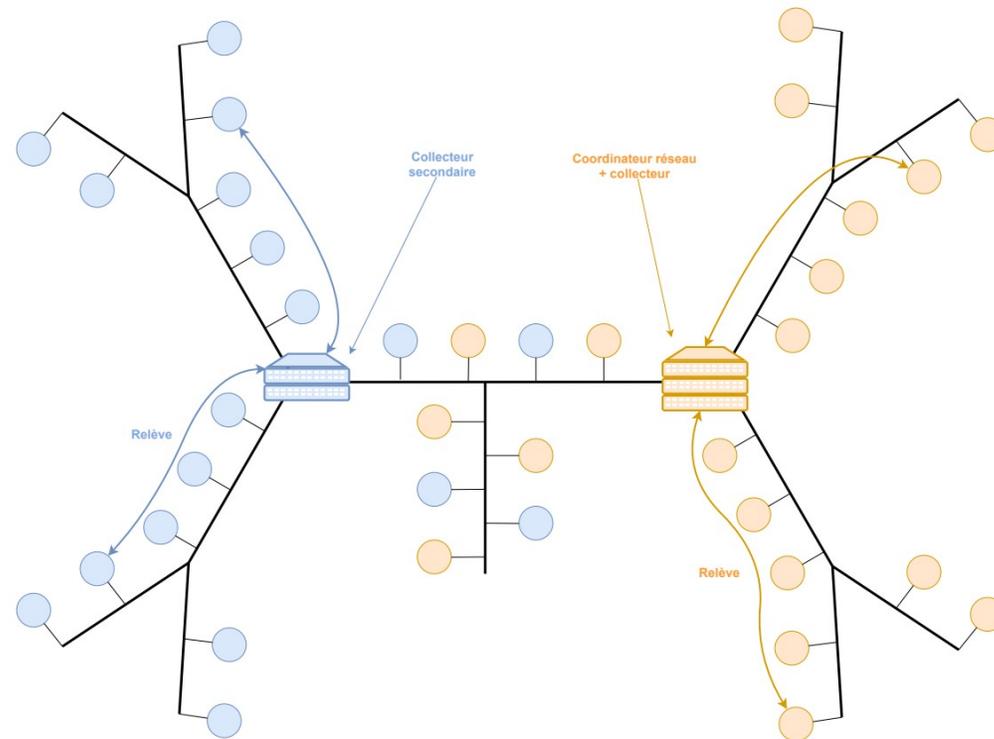
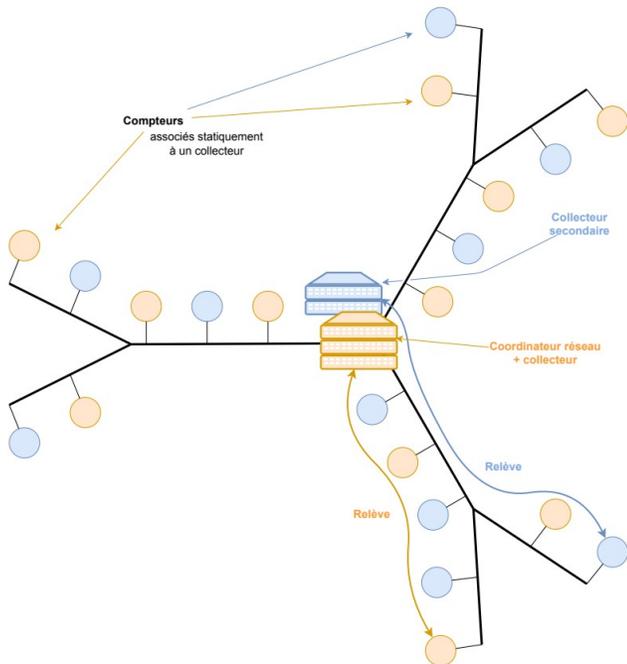
# Conclusion et prochaines étapes

- Le CPL-G3, un réseau télécom sur le réseau de distribution,
  - pour gérer la grille grâce à la grille
  - déployé à grande échelle
  - mais soumis à un environnement difficile
- La simulation et l'expérimentation en laboratoire
  - deux outils complémentaires
  - mécanismes expliquant la durée de la collecte des compteurs



# Conclusion et prochaines étapes

Comment gérer de façon fiable les grappes les plus difficiles et chargés?  
*Diviser pour mieux régner?*



# Résilience théorique et pratique du CPL-G3

en situation dense et face à de nouveaux usages

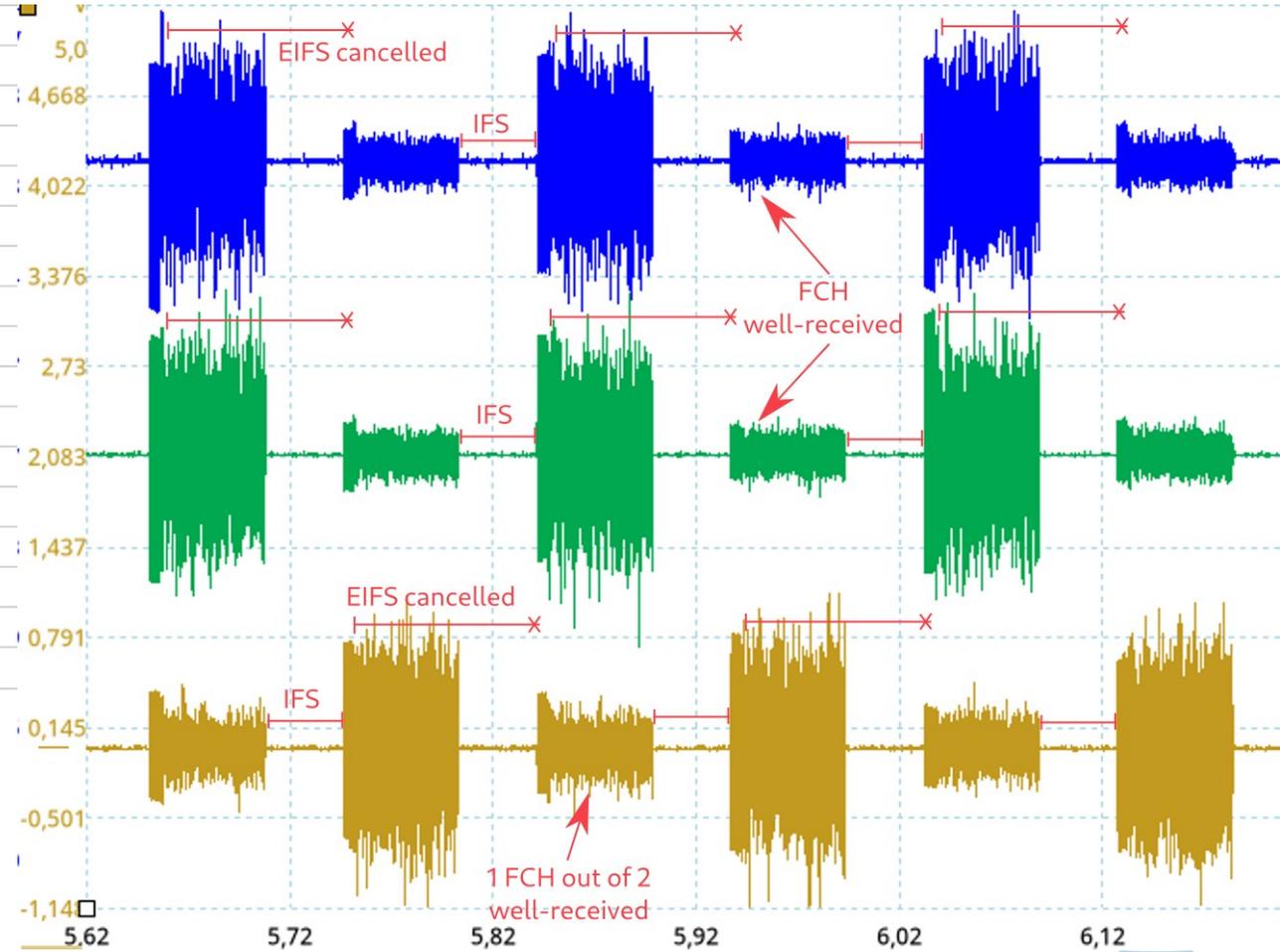
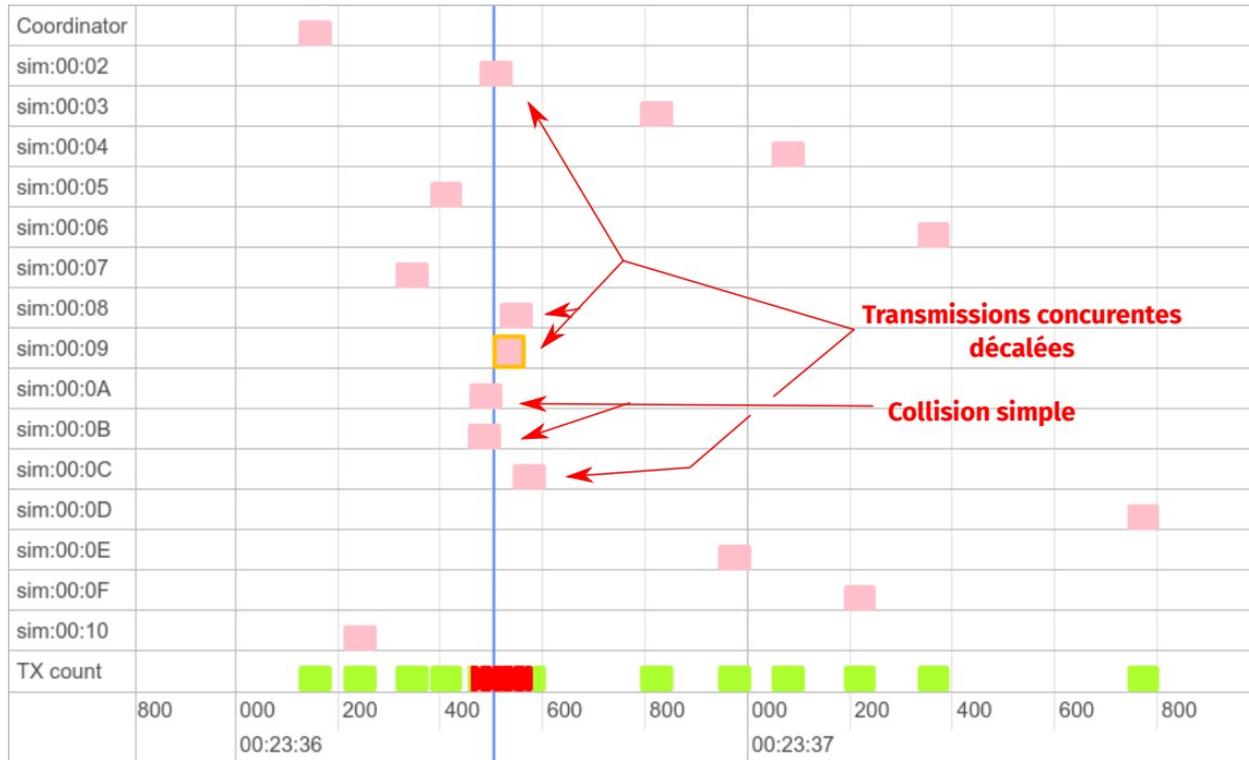
**Henry-Joseph AUDÉOUD**  
Nicolas GAST (LIG)  
Abdallah TOUIL (Enedis)

Mai 2022

# Merci !

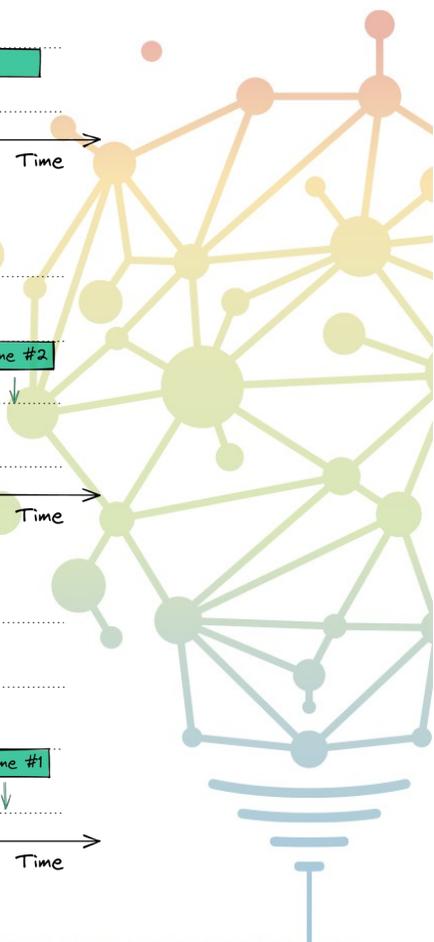
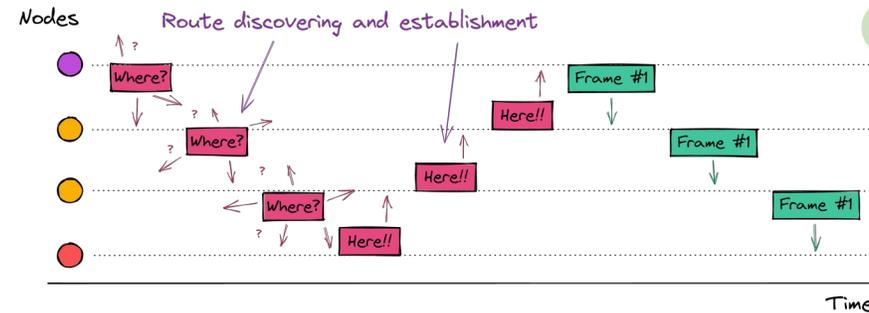
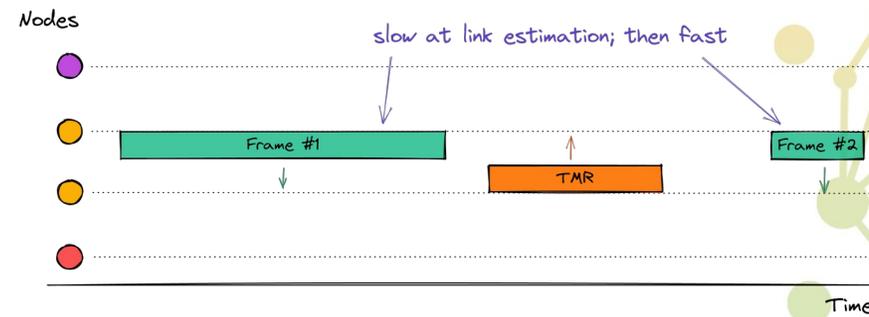
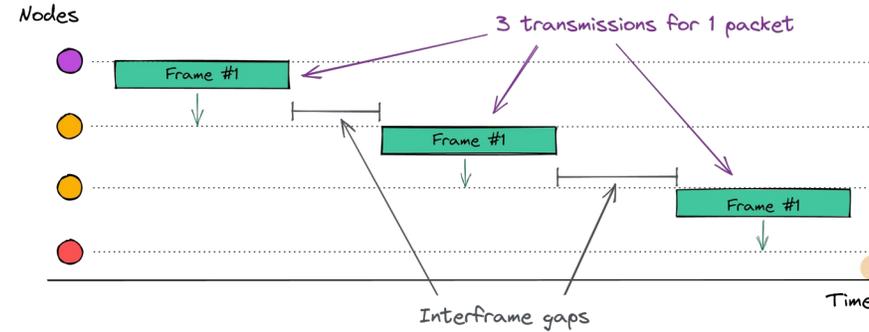
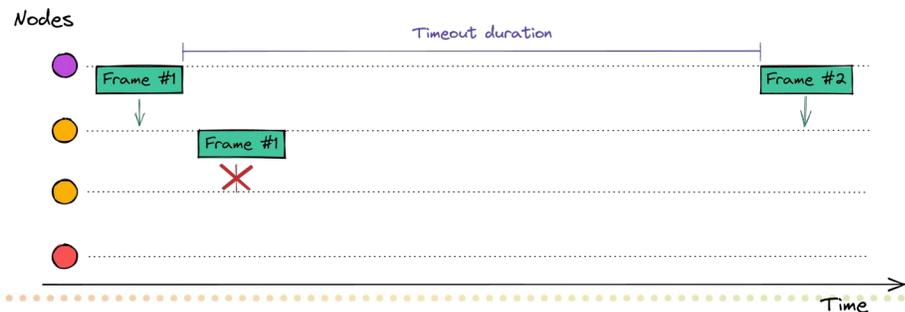


# Annexe : collisions groupées



# Annexe : formule de prédiction

$$\begin{aligned}
 D = & \underbrace{N_{\text{hops}} \times \left( D_{(\text{data})}^{8\text{PSK}} \right)}_{\text{Trames de données}} \\
 & + \underbrace{N_{\text{TMR}} \times \left( -D_{(\text{data})}^{8\text{PSK}} + D_{(\text{data})}^{\text{robuste}} + D_{(\text{TMR})} \right)}_{\text{Gestion des liens}} \\
 & + \underbrace{N_{\text{RREQ}} \times \left( D_{(\text{RREQ})} + \text{adpRREPWait} + D_{(\text{RREP})} \right)}_{\text{Établissement des routes}} \\
 & + \underbrace{N_{\text{FAIL}} \times \left( \text{adpNetTraversalTime} \right)}_{\text{Échecs de relève}}
 \end{aligned}$$



# Dynamic profile estimation with AI



Production - demand  $\approx 0$

Chaire SmartGrids: Amr ALYAFI

Encadrants G2ELab: Benoit DELINCHANT

Enedis: Pierre CAUCHOIS, Alain BERGES, Jérémie MERIGEALT



# Context and objectives

Prevision - Real consumption at 13h

$$58200 - 57208 \approx 1000 \text{ MW}$$

About 1 GWh of energy is wasted in one hour

Price of 1MWh is 143 € from RTE

Lost is: 143 k€ in one hour

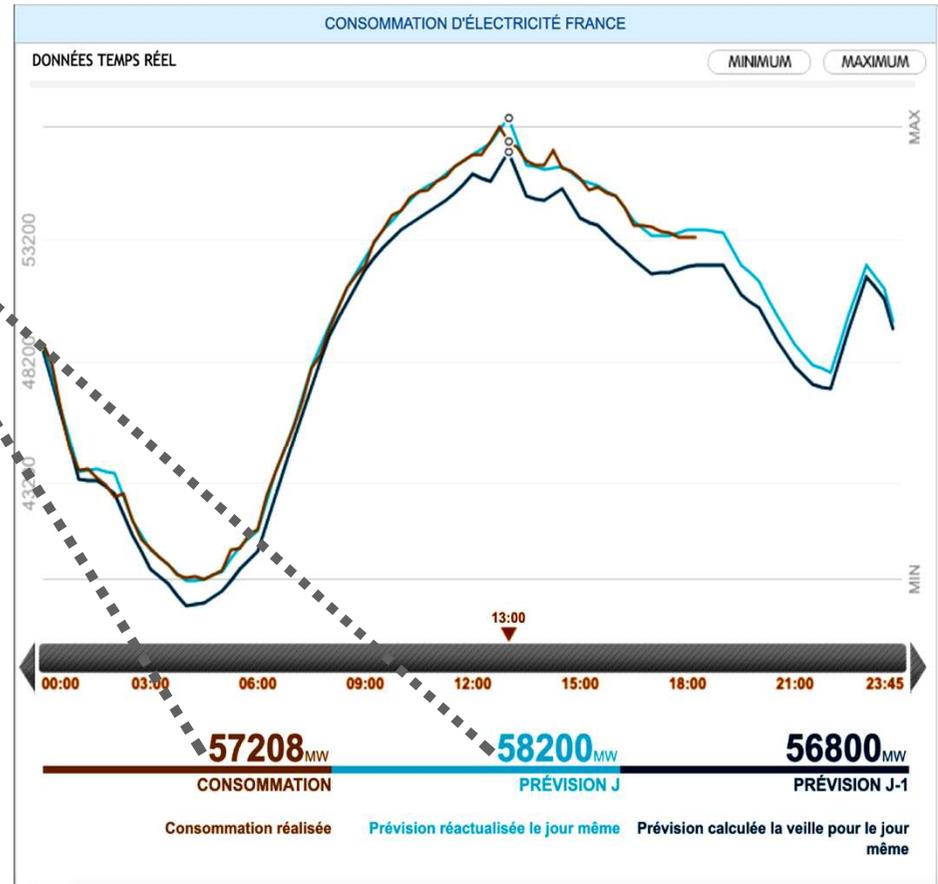
3 432 k€ a Day

0.34 kg CO<sub>2</sub>/kWh from coal \*\*

340 tons of CO<sub>2</sub> in one hour

8160 tons of CO<sub>2</sub> a Day

≈ 8000 planes round trip Paris / NewYork



Data from RTE (Electricity transmission system in France)

\*\* [https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-spez/index\\_e.php](https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-spez/index_e.php)

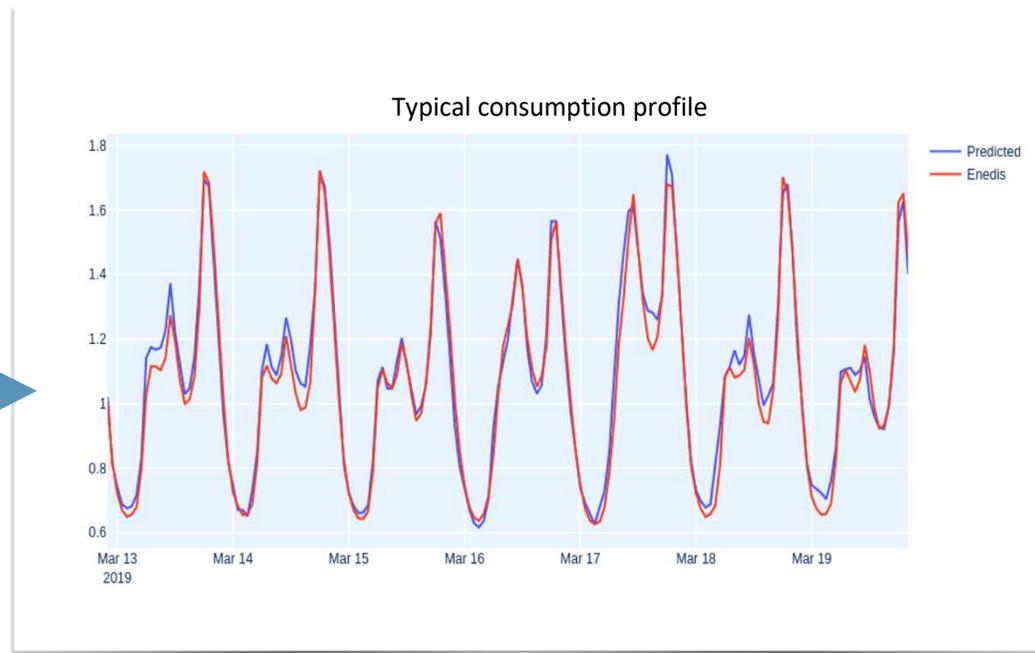
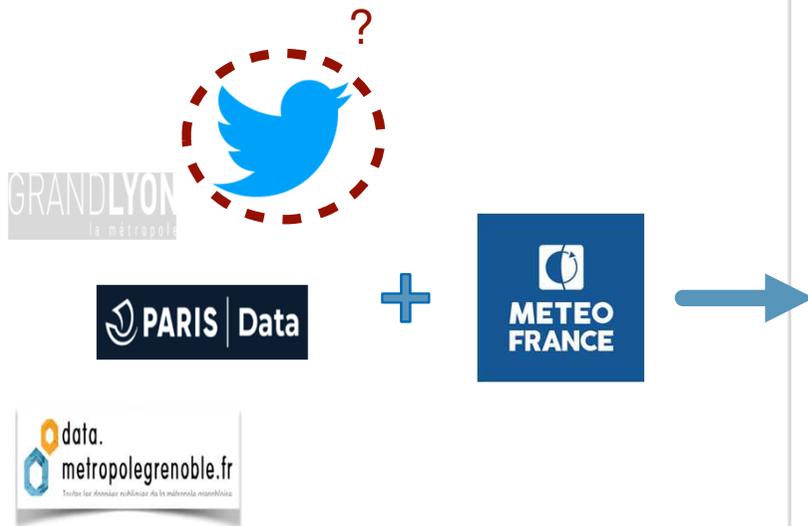
# Context and objectives

- Being able to estimate the cost consumption is very important to:
  - Prevent the blackout by matching the energy production/consumption.
  - Reduce the waste of energy.
  - Optimize the production mix to reduce the CO<sub>2</sub> emission
- Understanding that the consumption estimation is hard because it depends on the weather forecast **and on humans' activities and interests.**
- Our solution will use the AI technics in addition to social data to enhance the energy consumption estimation on the national level.



# Proposed Approach

- Collecting relatively important data from the social media and public data (like major events) to improve our models' prediction.
- These data are added to the weather forecast data to improve the estimation



# Acquiring social data

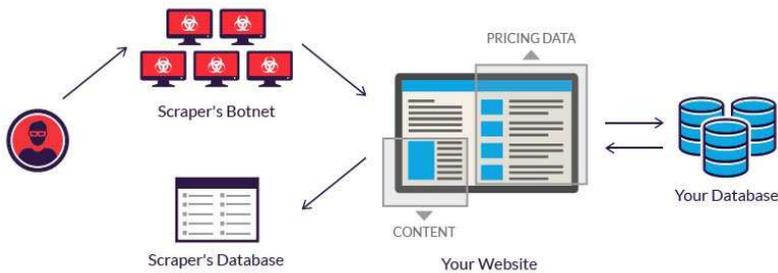
- Around **12 million french users** of Twitter and around **50 million Tweets per day**.
- In the period between 2014 and 2019 (our data set) we need to collect more than **608 TB of data**.
- No direct access to social data because of RGPD and other reasons.

How & When & which?

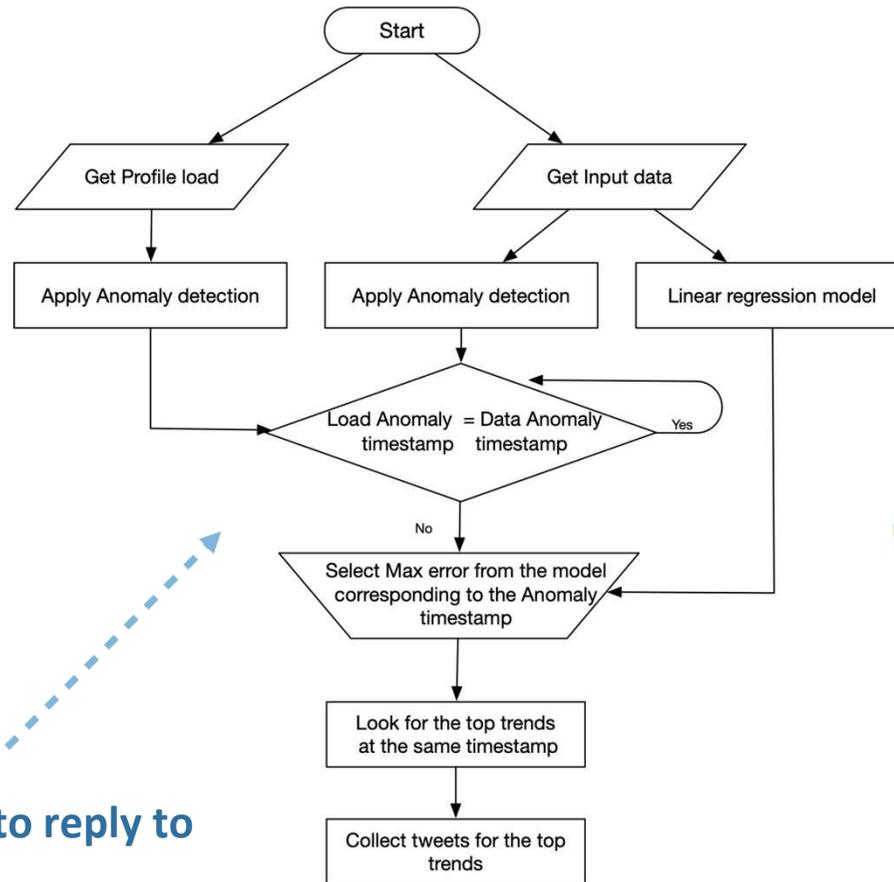


# Acquiring social data

- Scrapping tool to collect the data (to answer **How to get data**).

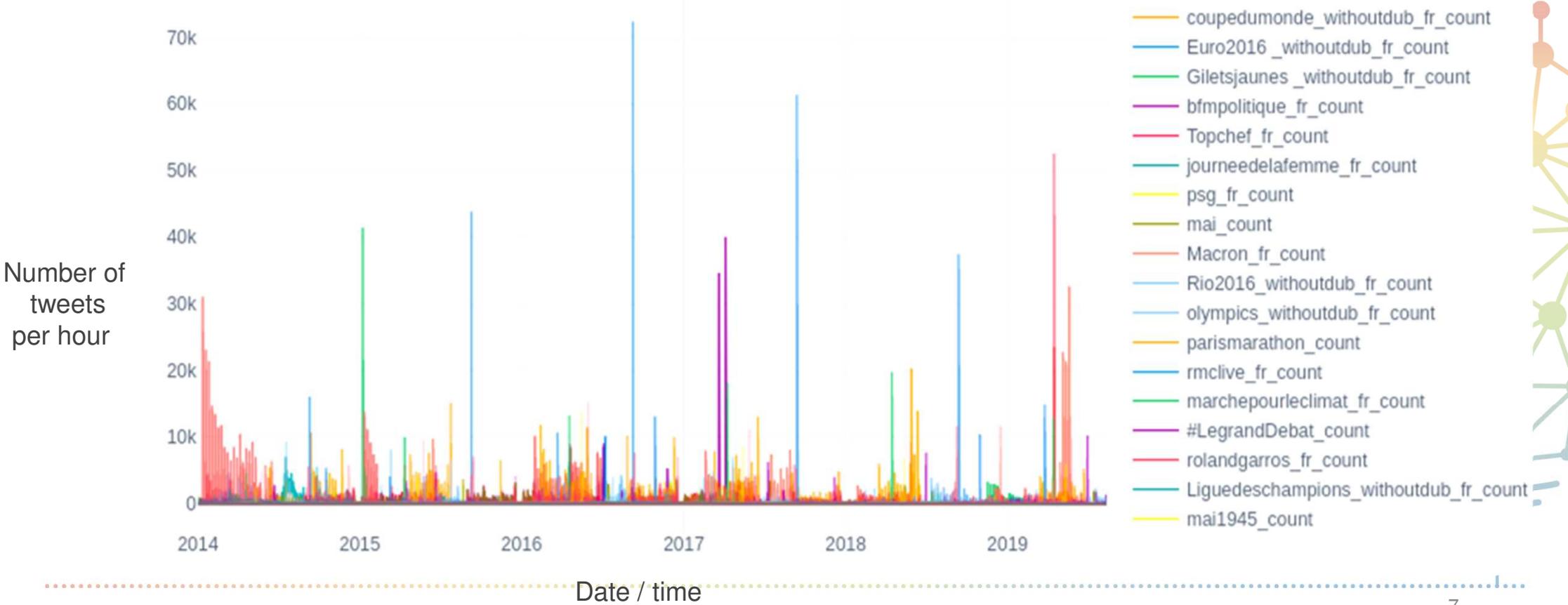


- Deploying different tools and algorithms to reply to **when and what data to collect**.

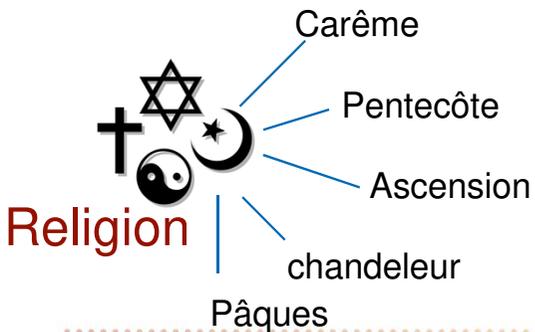
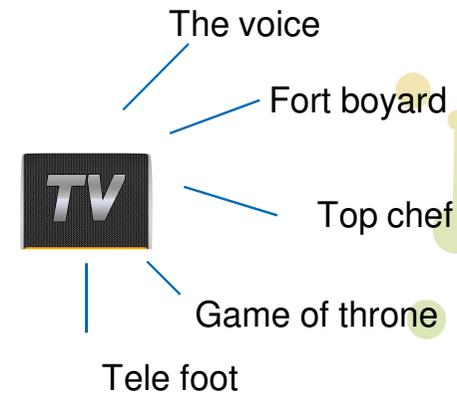
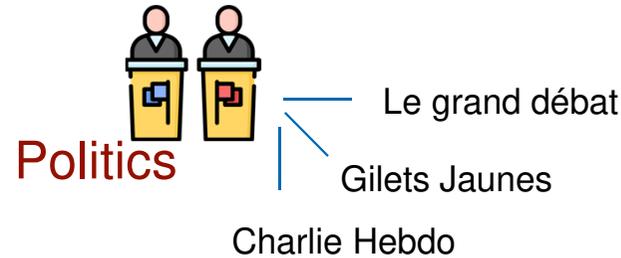


# Collected data

more than **100 million** of tweets were collected

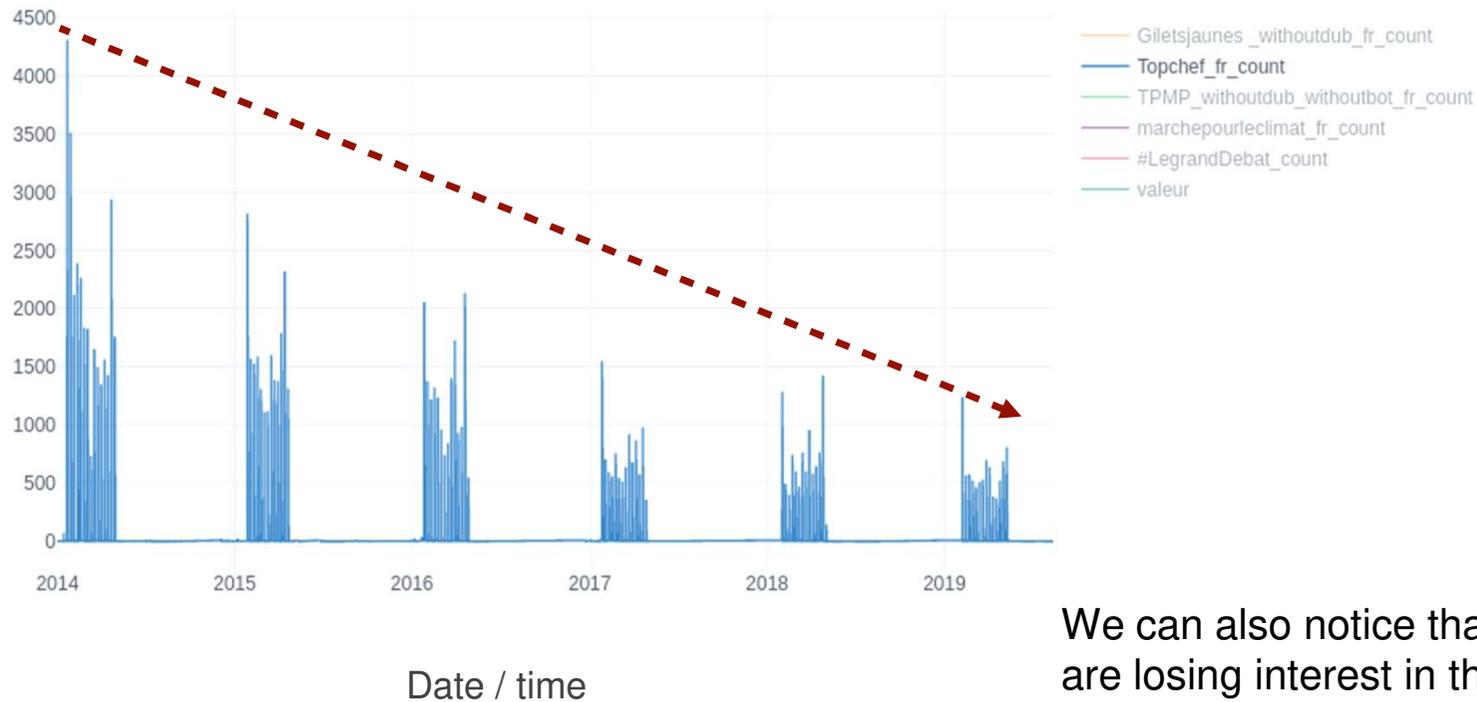


## 182 Events were detected and labeled



# Example of collected data

Event : Top chef



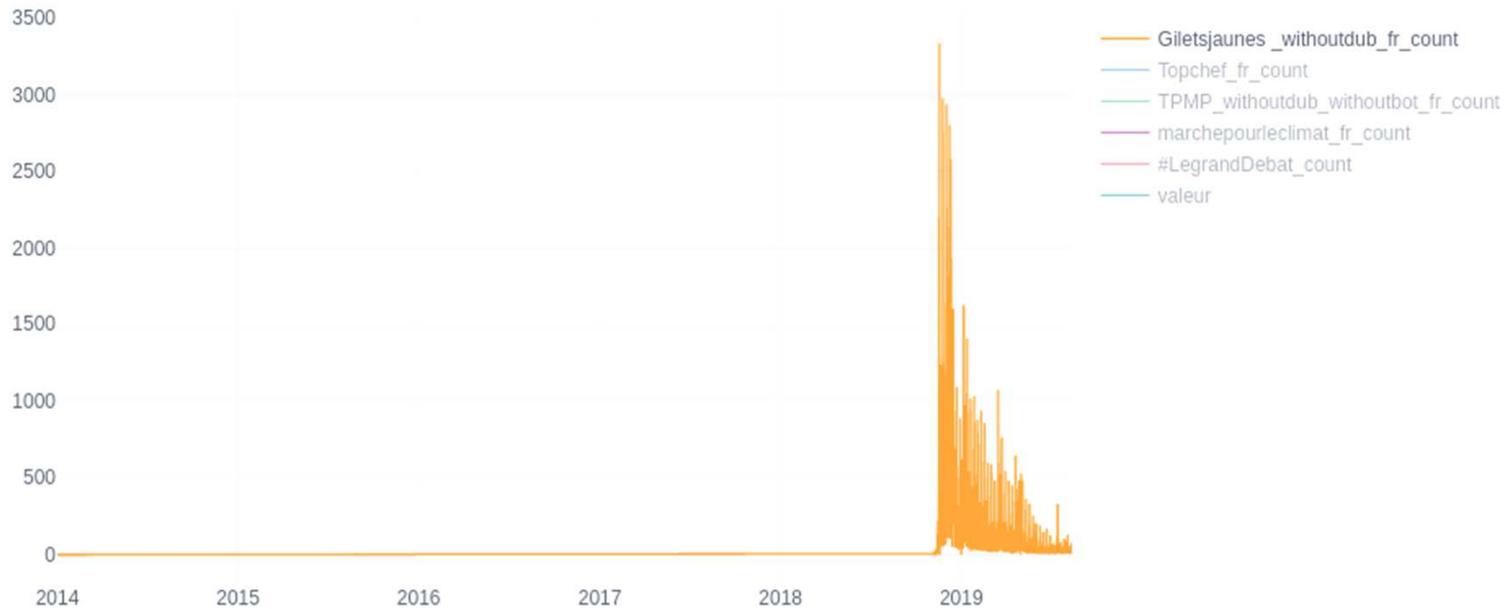
We can also notice that people are losing interest in this event.



# Example of collected data

Event : Gilets Jaunes

Number of  
tweets  
per hour

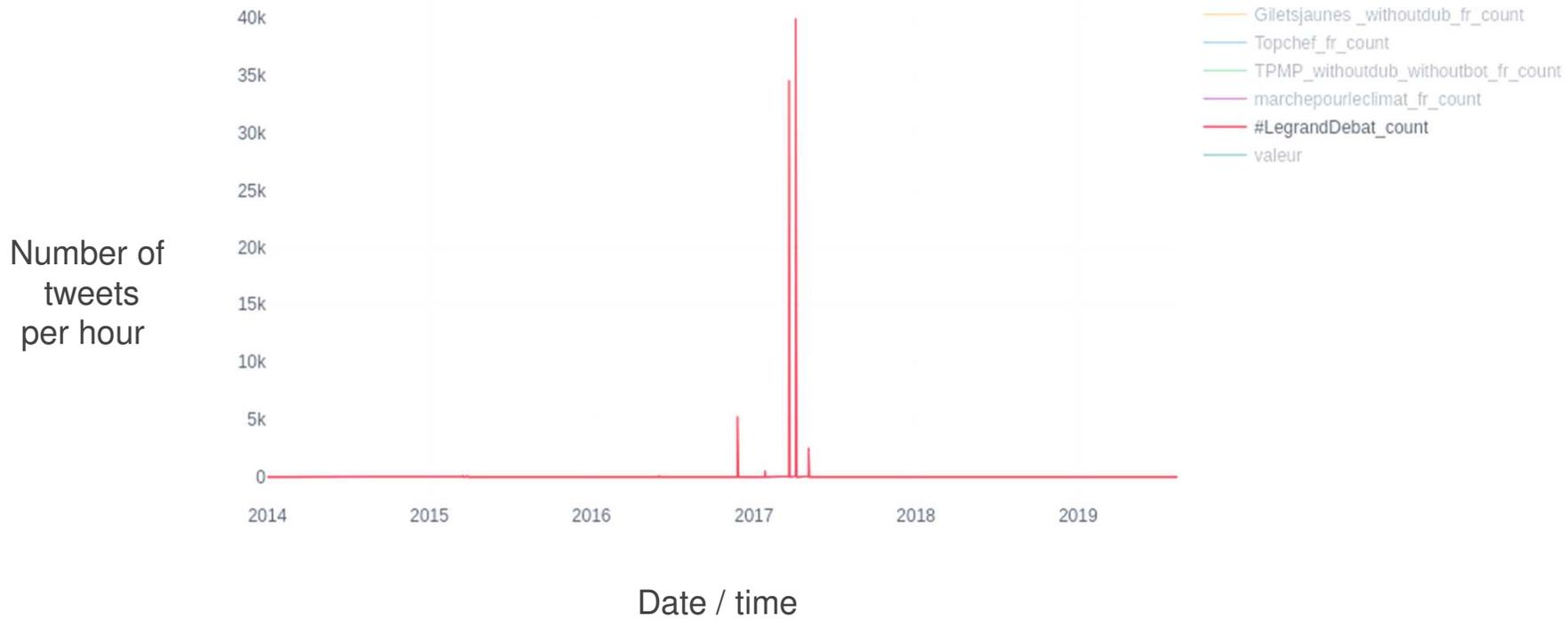


Date / time



# Example of collected data

Event : Le Grand Débat



# Important results

Training set : From 2014 to 2018  
Validation set : Whole 2019

	Max ERROR	RMSE
Linear Regression	40.3 %	0.9 %
XGBoost	37.4 %	0.9 %
LSTM	31.0 %	0.1%



Improve the max error by 25%  
Improve the RMSE by 88%



	Max ERROR	RMSE
Linear Regression	27.9 %	0.8 %
XGBoost	34.2 %	0.8 %
LSTM	27.1 %	0.1%

Improve the max error by 33 %  
Improve the RMSE by 88%

RMSE : Root Mean Square Error



# Conclusion and future work

Development of algorithms based on artificial intelligence techniques to :

- Identify the social events that have the greatest impact on electricity consumption.
- Improve the accuracy of the national consumption profile forecast (up to 88%)

Upcoming work :

- Continue to detect new events.
- Optimise the proposed method to improve the estimation.
- Apply the proposed solution at the regional and city levels.





# NOS PARTENAIRES

MÉCÈNE



LABORATOIRES ASSOCIÉS



ECOLES ASSOCIÉES



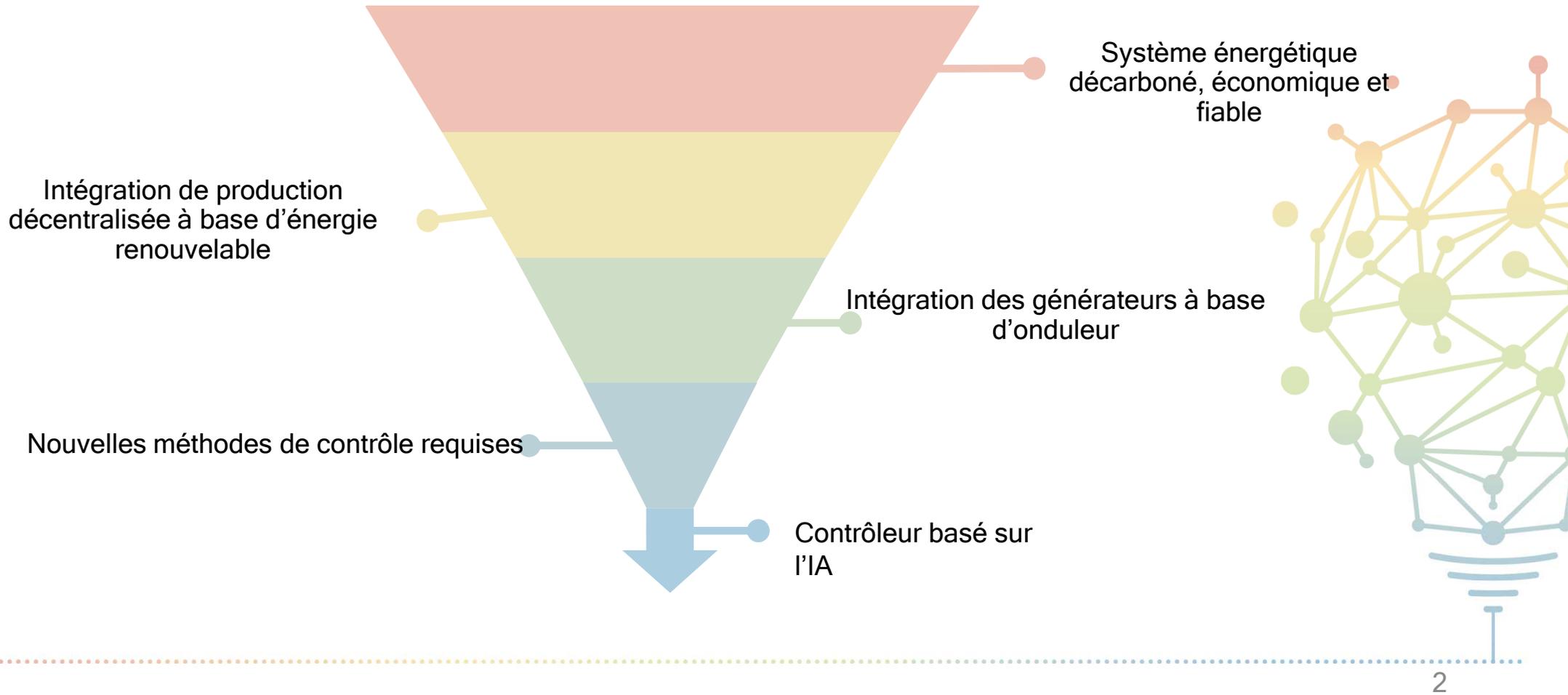
# Contrôleur basé sur l'intelligence artificielle pour les générateurs à base d'onduleur de type Grid-Forming

Hassan ISSA

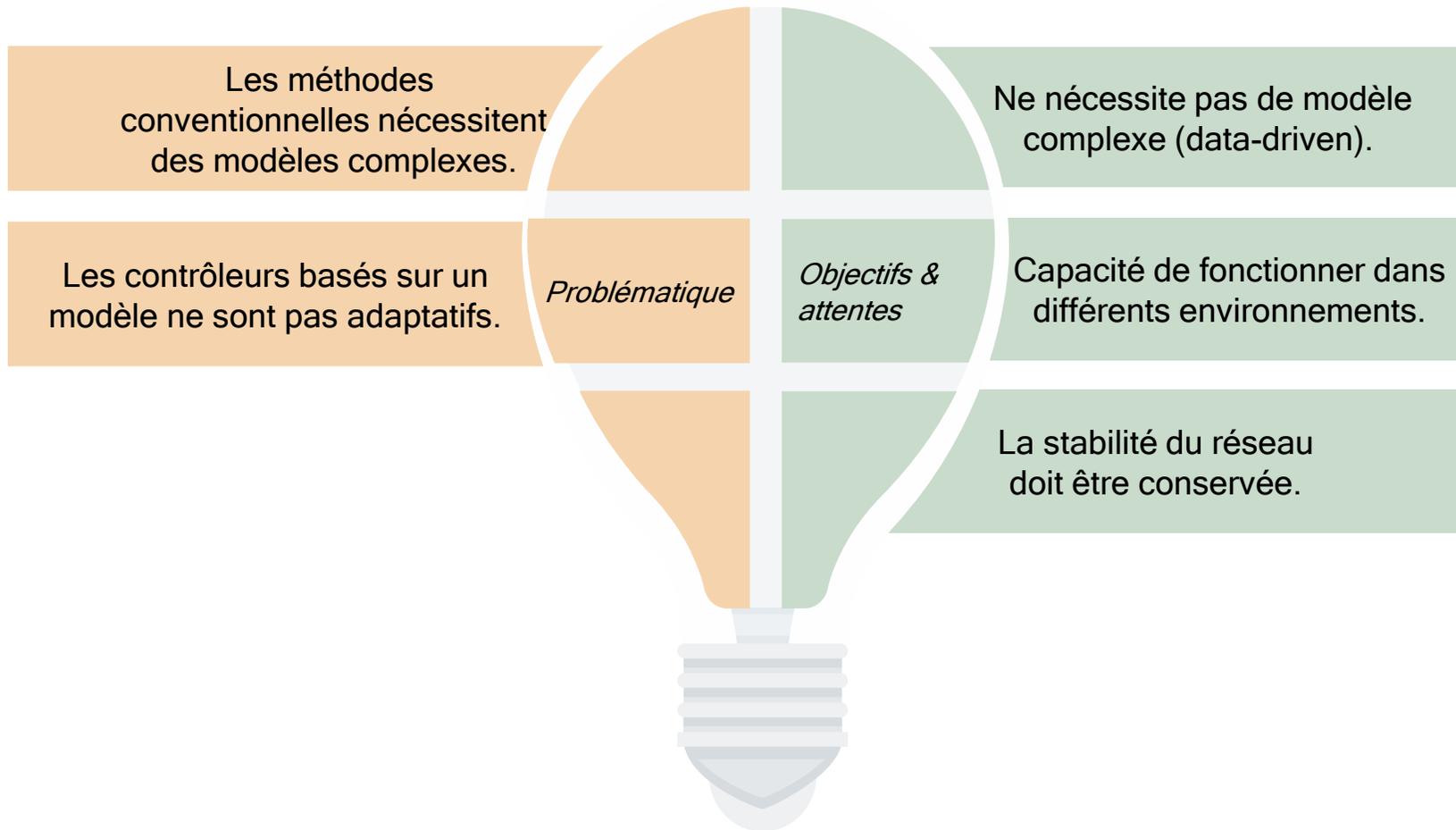
Encadrants G2ELab: Vincent DEBUSSCHERE, Lauric GARBUIO,  
Nouredine HADJSAID

Encadrant LIG : Philippe LALANDA

# Contexte



# Problématique et objectifs

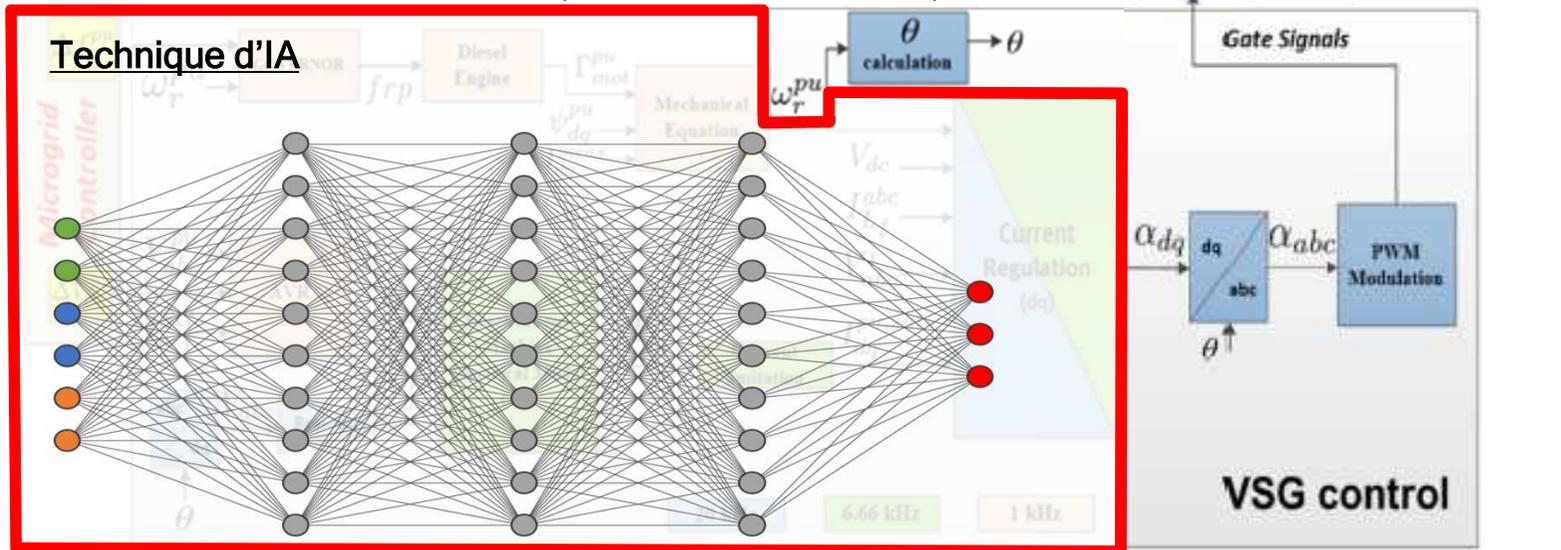


## Pourquoi générer des données?

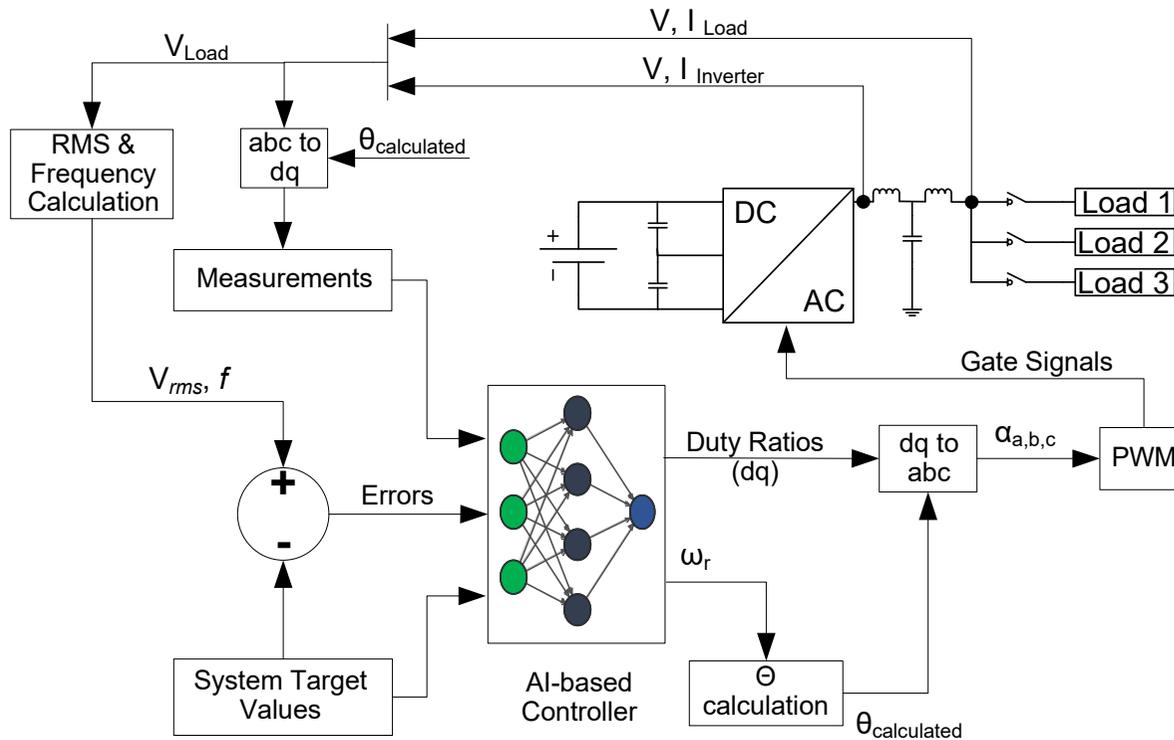
Approche de l'IA => Apprentissage supervisé => Données d'entraînement sont nécessaires

## Générateur synchrone virtuel

(Moulichon et al., 2021)



# Cas d'application

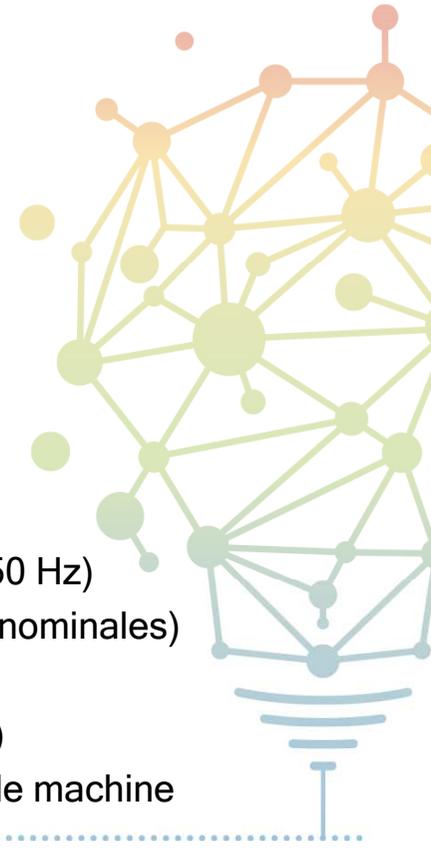


## Entrées

-  Mesures du système
-  Valeurs nominales (230V, 50 Hz)
-  Erreurs (mesures - valeurs nominales)

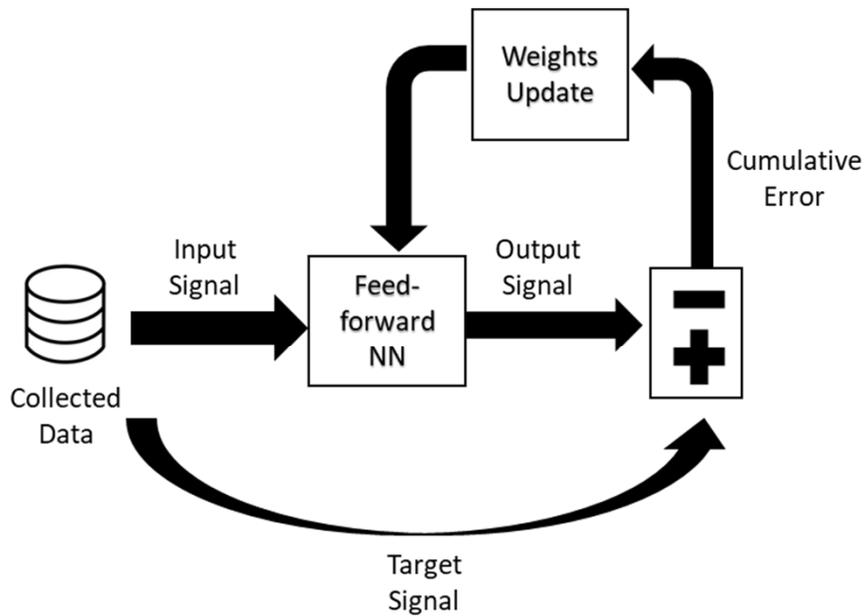
## Sorties

-  Rapports cycliques (en DQ)
-  Vitesse angulaire du rotor de machine virtuelle

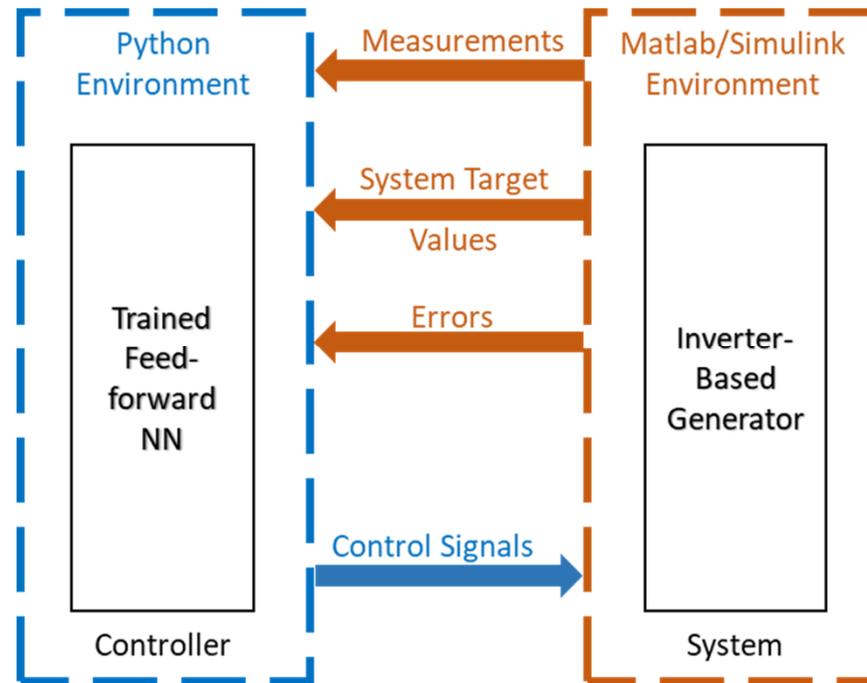


# Entrainement et implémentation

## Entrainement

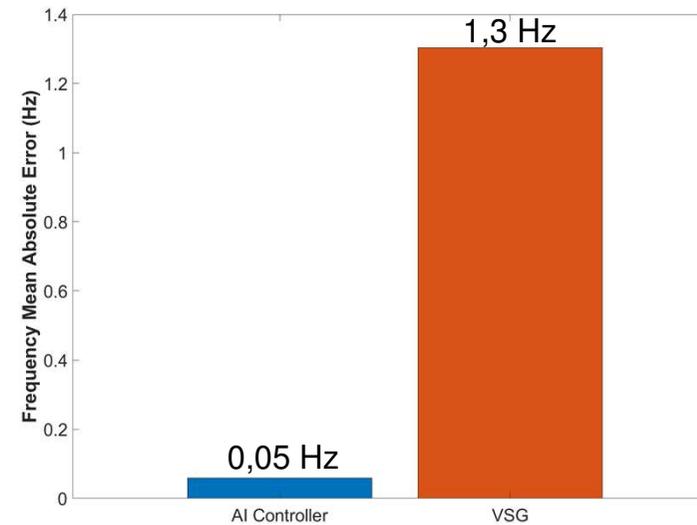
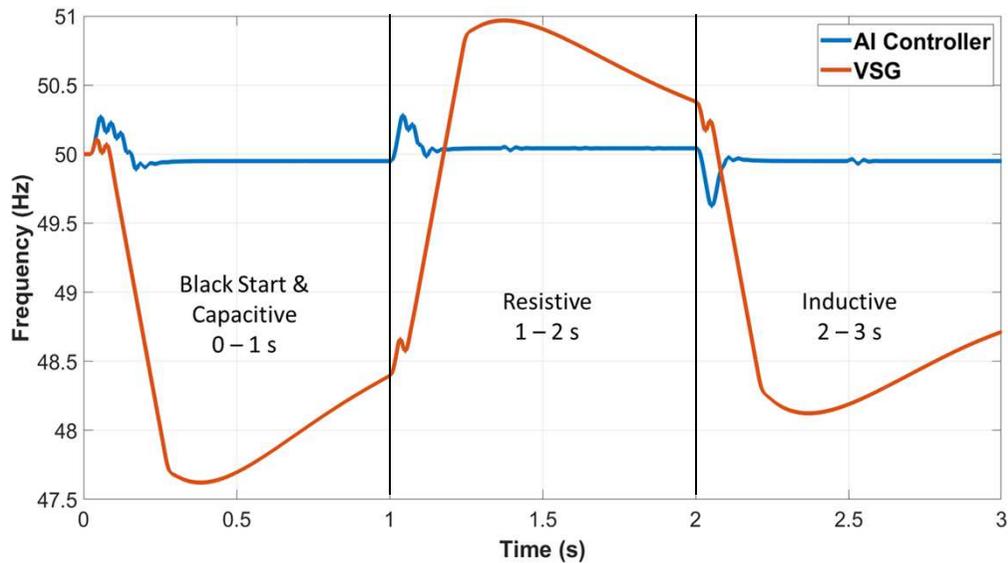


## Implémentation



# Résultats et observations

## Déviations de Fréquence (IA vs VSG)

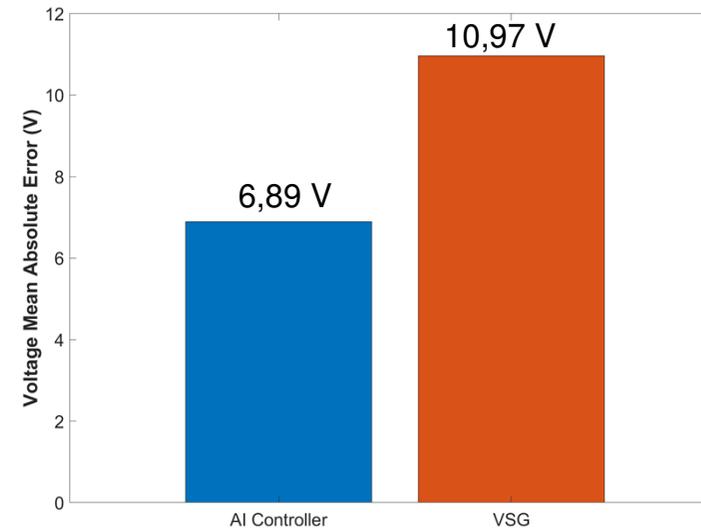
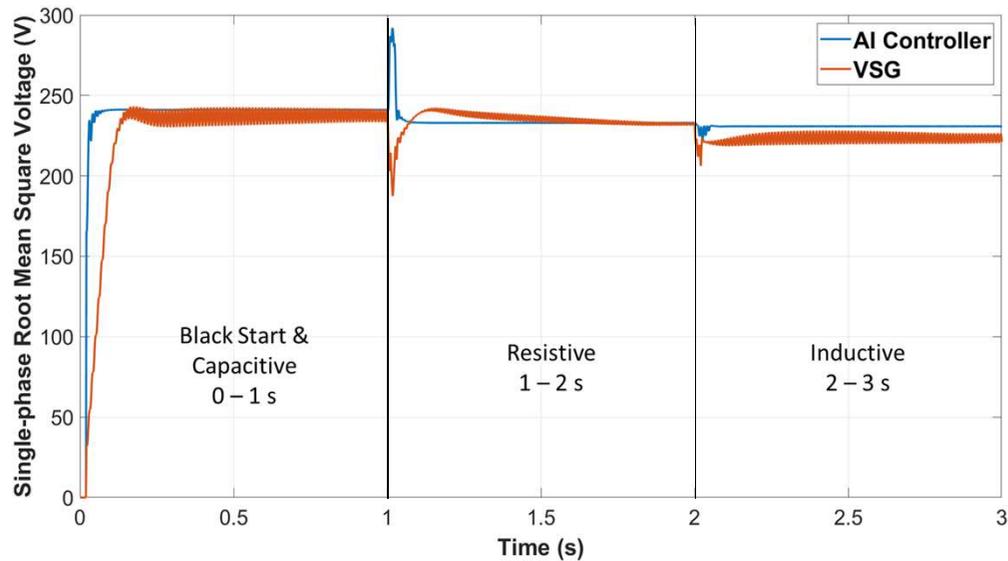


- 🌱 L'erreur de la fréquence par rapport à sa valeur nominale est minime.
- 🌱 Le VSG n'a pas restauré la fréquence à 50 Hz.
- 🌱 Stabilité du réseau conservée.



# Résultats et observations

## Déviations de Tension (IA vs VSG)



- 🌱 L'erreur de la tension par rapport à sa valeur nominale est minime.
- 🌱 Le contrôleur basé sur l'IA réagit plus rapidement.
- 🌱 Le contrôleur basé sur l'IA est plus stable et robuste.



## Conclusions

Le contrôleur à base d'IA est fonctionnel et présente des intérêts par rapport au contrôleur conventionnel:

- Les erreurs entre la fréquence et la tension et leurs valeurs nominales sont minimales
- Le contrôleur basé sur l'IA réagit plus rapidement

L'adaptabilité est limitée car l'approche adoptée est l'apprentissage supervisé.

## Prochaines étapes

Implémentation de l'apprentissage par renforcement => apprentissage via l'interaction avec l'environnement.

Complexification du réseau  
(sources, onduleurs)

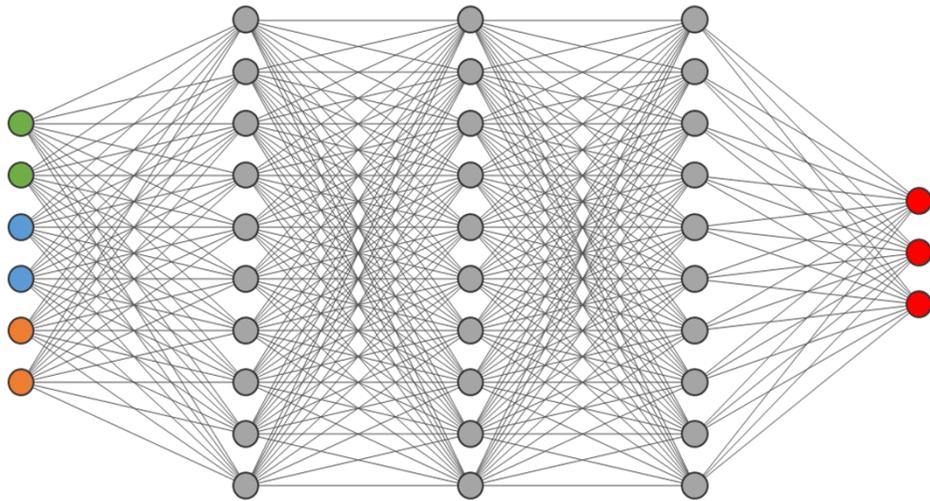


**Merci pour  
votre attention!**



**Type:**

Sequential Feedforward



**Couche d'entrées (16 neurones)**

- ✿ 4 neurones: Tension et courant à la charge (DQ)
- ✿ 4 neurones: Tension et courant à l'onduleur (DQ)
- ✿ 1 neurone: Fréquence
- ✿ 1 neurone: Vitesse angulaire mesurée du rotor de machine virtuelle
- ✿ 1 neurone: Tension de phase requise ( 230V RMS)
- ✿ 1 neurone: Fréquence requise (50 Hz)
- ✿ 3 neurones: Erreurs entre les tensions mesurées et la tension requise
- ✿ 1 neurone: Erreur entre la fréquence mesurée et la fréquence requise

**Couches cachés**

- ✿ 3 couches cachés (128 neurones chacun)

**Couche de sorties (3 neurones)**

- ✿ 2 neurones: Rapports cycliques (en DQ)
- ✿ 1 neurone: Vitesse angulaire du rotor de

