

Usage de l'intelligence artificielle pour la gestion des réseaux électriques intelligents

Aleksandr Petrushev^{1,2}, Rémy Rigo-Mariani¹, Vincent Debusschere¹, Patrick Reignier², Nouredine Hadjsaid¹, Come Soulez³, Benoit Bouzigon³

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000, Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LIG, 38000, Grenoble, France

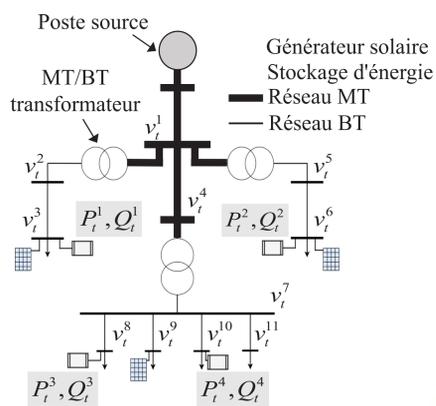
³Enedis, France

Introduction

L'augmentation du volume et de la variété de données disponibles sur les réseaux de distribution ouvre aujourd'hui la voie à des méthodes à base d'intelligence artificielle (IA) pour la conduite opérationnelle - en particulier pour avoir des contrôles optimaux plus rapides et robustes.

Cas d'Etude: Contrôle de tension

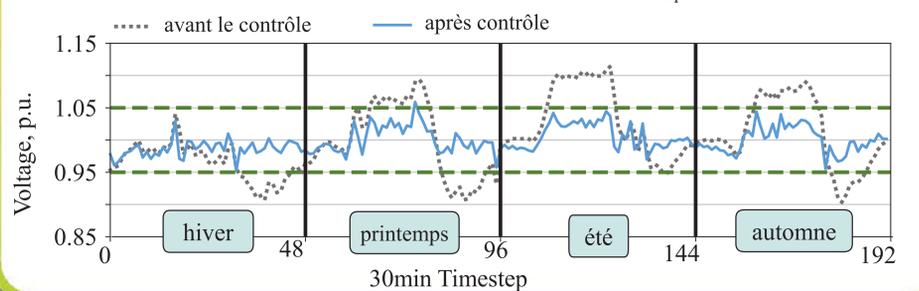
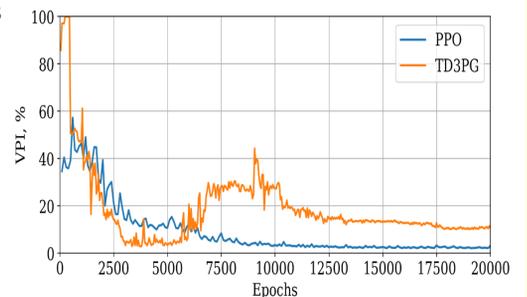
- Application** : réglage de la tension ($\pm 5\%$) par contrôle des moyens de stockage.
- Méthode classique** : optimisation à partir de modèle de réseau.
- Limitations** : incertitudes sur les paramètres de lignes, dégradation au cours du temps.



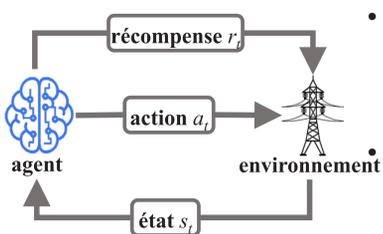
Entraînement Off-line

- Voltage Penalty Index (VPI)** métrique de performances à minimiser :

$$\frac{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \delta_t^n}{|N| \cdot |T|} \cdot 100\% \quad \begin{cases} \delta_t^n = 0 & \text{if } 0.95 \leq V_t^n \leq 1.05 \\ \delta_t^n = 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$
- Deux RL algorithmes différents sont étudiés – TD3PG et PPO.**
 - TD3PG** converge après 3600 itérations - **VPI de 2.8%**.
 - PPO** évite la divergence et converge en 20000 itérations - **VPI de 1.85%**.



Apprentissage par renforcement (RL) en deux étapes



- Actions** : degrés de liberté, contrôles des systèmes de stockage:

$$a_t = [P_{t+1}^f, Q_{t+1}^f]$$

- Etat** : puissances/tension et états de charge des stockeurs:

$$s_t = [v_t^n, P_t^f, Q_t^f, SOC_t^f, t]$$

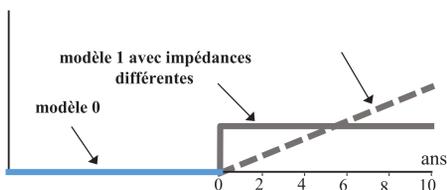
- Récompense** : l'objectif du contrôleur, calculé à partir de l'état s_{t+1} , pour évaluer la pertinence des actions a_t – arbitrage entre les déviations en tensions et en états de charge des stockeurs:

$$r_t = -\alpha \cdot \sum_{n=1}^N \max(0, (v_{t+1}^n - 1.05))^2 + \max(0, (0.95 - v_{t+1}^n))^2 - \frac{1}{\beta} \cdot \sum_{f=1}^F \exp(\omega \cdot |SOC_{t+1}^f - 0.5|)$$

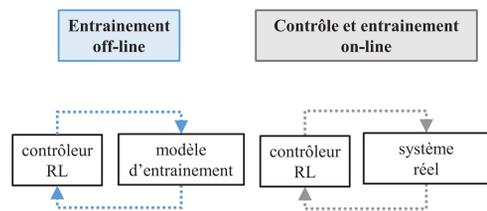
surtensions sous-tensions états de charge

L'entraînement du modèle optimise la politique d'action pour maximiser la récompense au cours du temps

- Entraînement Off-line** sur un modèle de réseau cible avec des valeurs d'impédance nominales du fabricant.



- Entraînement On-line** du contrôleur connecté au réseau électrique dont les caractéristiques ont évolué par rapport au modèle de départ.

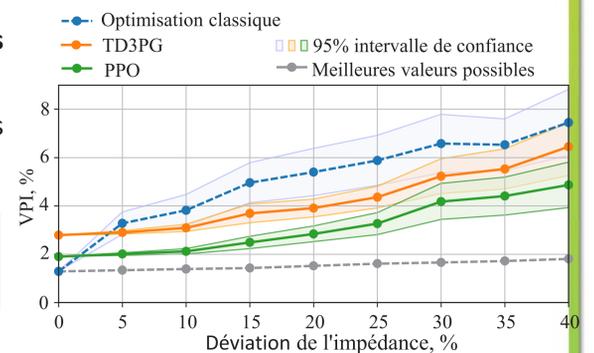


Contrôle et Entraînement On-line

- Modèle 1 avec impédances différentes:**

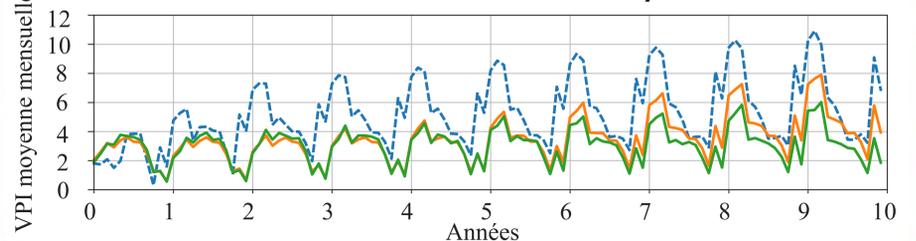
Impact important des incertitudes.

Résultats du RL meilleurs pour 5% de déviation ou plus.



- Modèle 2 avec dégradation d'impédances – 40% de déviation sur 10 ans:**

- Optimisation classique – **VPI moyen = 6.9 %**
- Entraînement off-line seulement – **VPI moyen = 5.4 %**
- Contrôle et entraînement on-line – **VPI moyen = 3.4 %**



Conclusions

- Contrôleur plus robustes face aux incertitudes sur les impédances.
- Adaptabilité on-line pour faire face au changement de paramètres avec un ré-entraînement journalier.
- Exécution rapide < 1s une fois le contrôleur entraîné.

Dynamic profile prediction with AI

Amr Alyafi^{1,2}, Benoit Delinchant¹, Pierre Cauchois³, Jeremie Mériegault³, ¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2ELab, 38000, Grenoble, France Chaire SmartGrids, Fondation Grenoble INP ³Enedis, France

Introduction

- Since the construction of the electrical grid till now models depends only the weather forecast data only.
- 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 CO₂ emission
- **But 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.**

58200 - 57208 ≈ 1000 MW

1 GW of wasted energy in half of hour

Price of 1MW is 143 € from RTE

Lost is: 143000 € in half of hour

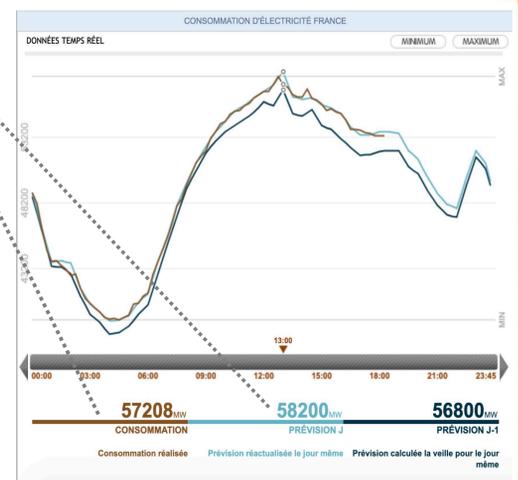
6 864 000 € a Day

0.34 kg CO₂/kWh from coal **

340 ton of CO₂ in half of hour

16320 ton of CO₂ a Day

≈ 16000 planes round trip Paris / newYork

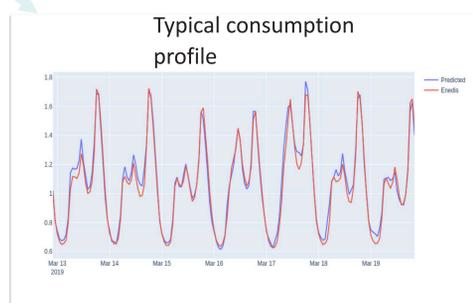


Data from RTE (Electricity transport network in France)

** https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index_e.php

Social media

- 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



Our approach

Detecting and labeling the important events from social data. Quantifying the impact of those events on the national electricity consumption.

- Using AI techniques like LSTM (Long short time memory) Deep learning algorithms to enhance the estimation.
- Succeed to improve the precision of our model more than **75 %** (validated over one year of data) from the applied models.

Publications

- Social data to enhance typical consumer energy profile estimation on a national level. Amr Alyafi, Pierre Cauchois, Benoit Delinchant, Alain Berges. ELECTRIMACS - 2022 Nancy, France.

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

Arshpreet Singh¹, Vincent Debusschere¹, Nouredine Hadjsaid¹, Benoit Bouzigon², Xavier Legrand²
¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000, Grenoble, France
² Enedis, France

Contexte

Les réseaux électriques subissent de fortes transformations et cela va s'intensifier dans les années à venir avec la présence de plus en plus importante des productions interfacées par convertisseurs. D'une part, ces productions rendent possible des régulations rapides et précises. D'autre part, ces dispositifs contribuent de manière limitée au courant de court-circuit, font baisser l'inertie totale du système (pas de machine tournante) et risquent de provoquer des **interactions entre les régulations**. Face à cette problématique, on se propose d'étudier le phénomène de la stabilité liée aux convertisseurs à interactions lentes (**SCIL**) au sein du réseau de distribution.

Questions à traiter

1. Les instabilités de type SCIL **observées dans des réseaux de transport** peuvent-elles également se produire dans un réseau de distribution ?
2. Dans quelles situations les **onduleurs préalablement stables deviennent-ils instables** suite au raccordement d'un autre onduleur ?
3. Comment **modéliser** ces interactions de manière précise et **efficace** ?
4. Une fois détectées, **comment éviter et/ou traiter** ces instabilités ?
5. Comment le gestionnaire du réseau de distribution peut agir face à ces phénomènes ?

Modélisation

- RMS pour analyse préliminaire
- EMT pour validation et études supplémentaires
- Onduleur « **grid-following** » : comportement en source de courant; synchronisation via **PLL**
- Réseau en amont en bus infini + impédance

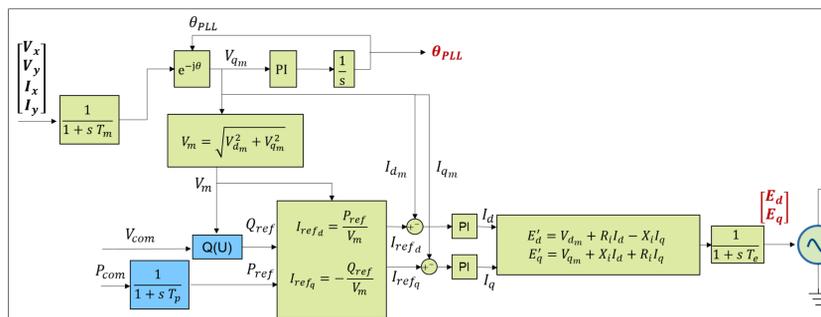


Figure 1 : Modèle RMS de l'onduleur « grid-following »

Objectif

Faire un étude de la stabilité des réseaux de distribution comportant plusieurs onduleurs, afin d'analyser la stabilité liée aux convertisseurs à interactions lentes (**SCIL**).

Stabilité « petits signaux » d'un système à 2 onduleurs

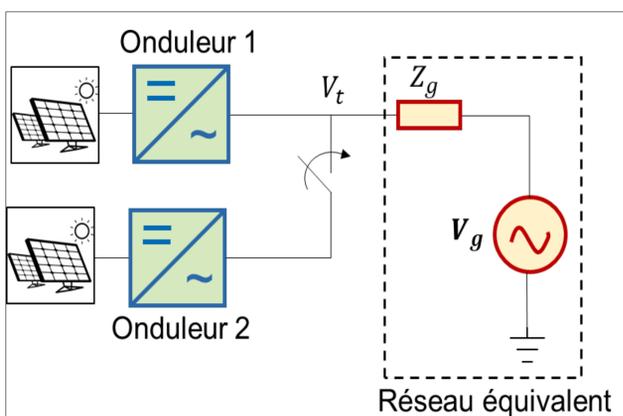


Figure 2 : Système onduleur + réseau équivalent lorsqu'un deuxième onduleur est raccordé

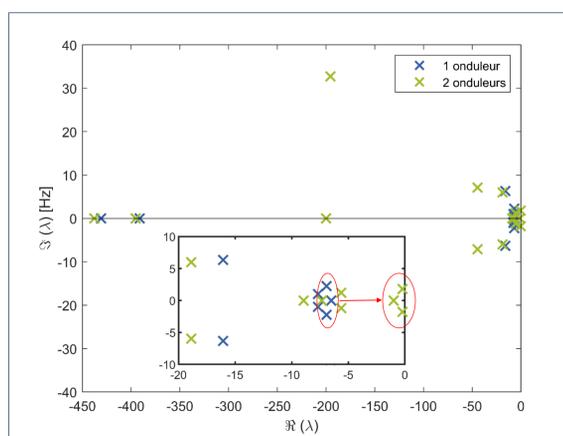


Figure 3 : Valeurs propres pour le système à 1 ou 2 onduleurs

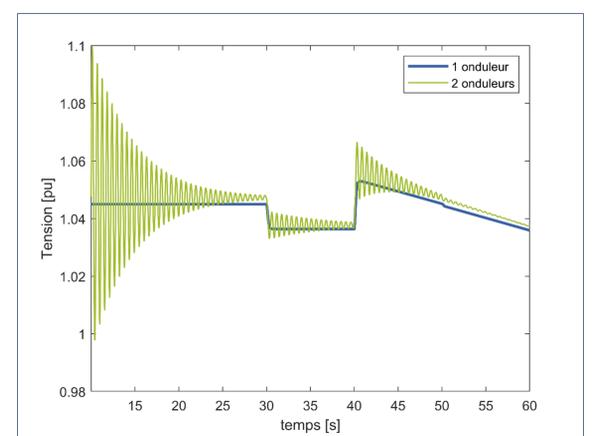


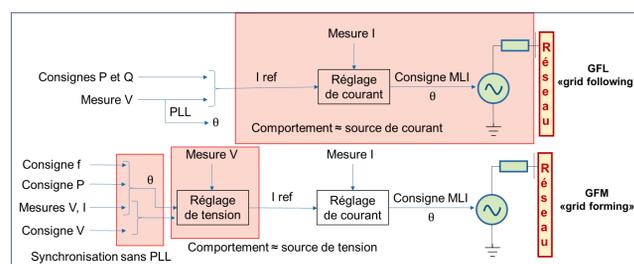
Figure 4 : Tension au point de raccordement pour les deux systèmes

Conclusions préliminaires

- Un **réseau faible** peut entraîner des instabilités SCIL (**situation similaire aux réseaux de transport**)
- **Des oscillations imprévues** lorsqu'on raccorde plusieurs onduleurs
- Les modèles RMS sont capables de reproduire ces oscillations. **Comparaison avec EMT** nécessaire pour validation
- La **PLL** joue un rôle dans ces instabilités; il serait intéressant de vérifier des **méthodes de synchronisation alternatives**

L'onduleur « grid forming »

- Comportement en source de tension, synchronisation **sans PLL**, plus performant dans les réseaux faibles



1. Peut-on adapter le GFM pour des réseaux de distribution (R/X important) ?
2. L'impact des commandes GFM en termes d'instabilités type SCIL ?
3. Un modèle RMS est-il capable de reproduire ces interactions ?

Prochaines étapes

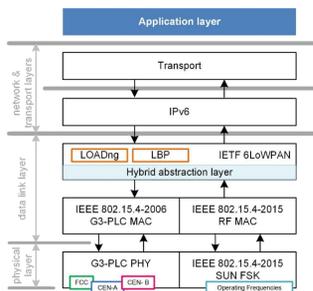
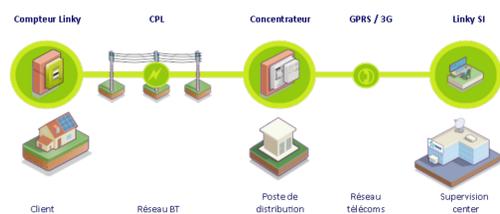
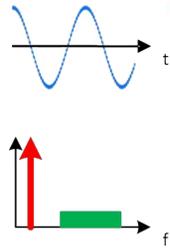
1. Valider les résultats avec des **modèles EMT**
2. Étudier l'**onduleur GFM** dans le cadre du réseau de distribution
3. Développer des **modèles à ordre réduit** pour des réseaux plus complexes
4. Appliquer **d'autres méthodes d'analyse de stabilité**

Résilience théorique et pratique du CPL-G3 en situation dense et face à de nouveaux usages

Henry-Joseph AUDÉOUD (henry-joseph.audeoud@imag.fr), Nicolas GAST (LIG), Abdallah TOUIL (Enedis)

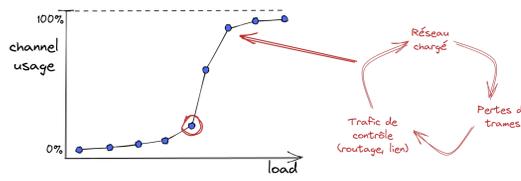
Contexte & objectifs

Pour gérer une grille intelligente, il faut pouvoir surveiller et contrôler la grille, principalement au niveau des points de consommation / production. Les gestionnaires de réseau, déploient des appareils communicants capables de mesurer l'état et d'agir sur la grille. Plutôt que de dépendre entièrement d'un réseau de télécommunications tiers avec ses contraintes, ces appareils peuvent communiquer sur le câble électrique de puissance lui-même. Tout appareil alimenté est ainsi naturellement connecté au réseau de gestion — il s'agit de communications par Courants Porteurs en Ligne (CPL).

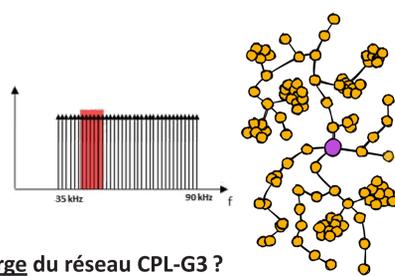


L'alliance CPL-G3 spécifie et certifie des appareils utilisant une les CPL pour construire un réseau de télécommunication. Porté par des organismes internationaux de standardisation (IETF, IEEE, ITU) ainsi que de nombreux industriels, le CPL-G3 est déployé à l'international (plus de 80 millions de produits en opération dans plus de 30 pays). En France, il est utilisé par Enedis dans sur son réseau de distribution d'électricité, et permet de relever tous les jours la quasi-intégralité des compteurs français (près de 35 millions), entre autres celui de chez-vous.

Le réseau CPL n'a pas été conçu pour être un réseau de télécommunications. Il offre un canal difficile pour les transmetteurs (très bruité, beaucoup d'interférences, câbles pas idéaux, impédance réseau parfois trop haute), malgré les techniques pour augmenter la robustesse



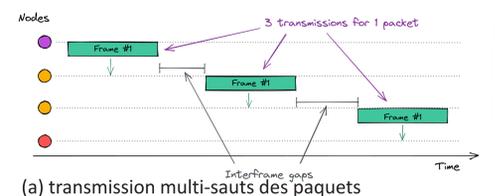
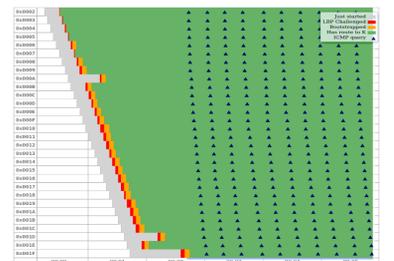
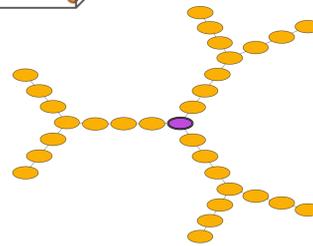
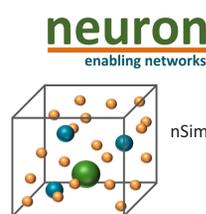
des transmissions (code correcteurs d'erreurs, retransmission automatique...). C'est un réseau à longue portée et bas débit (contrairement au CPL à large bande) ainsi qu'à accès multiple, ce qui place son niveau de saturation assez bas. C'est aussi un réseau multi-saut, donc nécessitant un algorithme de routage, ici réactif (LOADng).



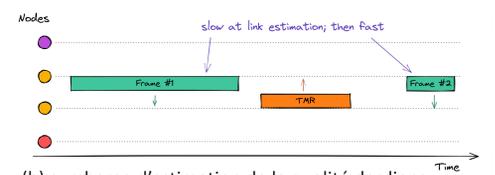
Quelles sont les limites de charge du réseau CPL-G3 ?
Comment rester sous cette limite dans un réseau chargé ?
Supportera-t-il la surcharge de service supplémentaires à venir ?

Approche & résultats

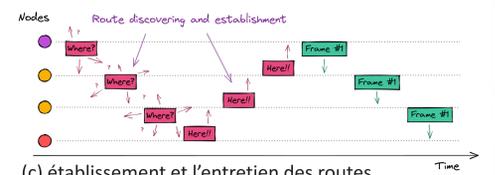
Pour étudier la charge acceptable du réseau, plusieurs approches sont réalisables. L'élaboration d'un modèle théorique permet de donner les grandes lignes; mais, très éloignés de la réalité, ils peuvent facilement être biaisés. La mise en place d'un simulateur permet une de prendre en compte les contraintes logicielles tout en gardant une grande souplesse de réalisation et de configuration. L'étude en laboratoire permet d'intégrer toutes les contraintes matérielles tout en conservant un environnement très contrôlé. Enfin, les expérimentations terrain permettent de confirmer les résultats, avec toutefois toutes les contraintes d'un environnement parfois hostile.



(a) transmission multi-sauts des paquets



(b) surcharge d'estimation de la qualité des liens



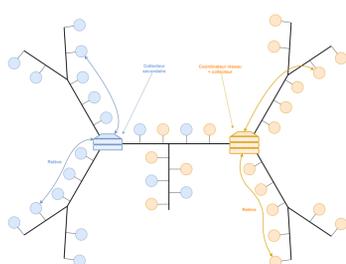
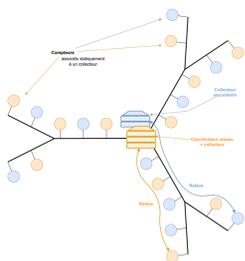
(c) établissement et l'entretien des routes

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le simulateur nSim permettant de simuler intégralement un réseau CPL-G3. Seule la couche de transmission physique est virtuelle, le code logiciel exécuté est le même que celui sur des appareils physiques. Les réseaux simulés ici, allant jusqu'à plus de 600 compteurs, permettent entre autres d'expliquer la durée de collecte des compteurs: (voir les schémas ci-contre et la formule ci-dessous)

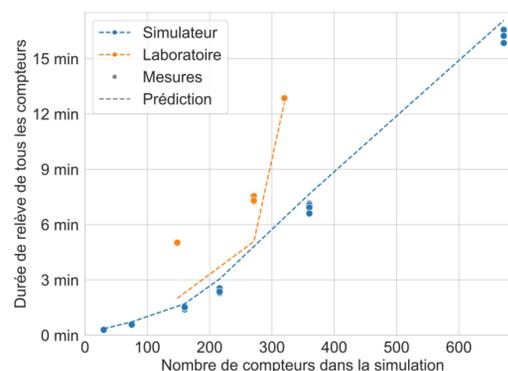
$$D = \frac{(N_{\text{hops}} - N_{\text{TMR}}) \times D_{\text{(data)}}^{\text{8PSK}} + N_{\text{TMR}} \times (D_{\text{(data)}}^{\text{robuste}} + D_{\text{(TMR)}})}{\text{Frames de données} + \text{Gestion des liens}} + \frac{N_{\text{RREQ}} \times (D_{\text{(RREQ)}} + \text{adpRRPWait} + D_{\text{(RREP)}})}{\text{Établissement des routes}}$$

Prochaines étapes

Le réseau CPL-G3 est utilisé entre autres pour collecter toutes les grappes de compteurs d'Enedis. Nous avons été en mesure de donner une explication théorique et prédire la durée de relève que l'on observe, prédiction validée par des simulations et des expérimentations en laboratoire.



La faible capacité du CPL-G3 fait que cependant le seuil de saturation est proche, et facilement atteint — il a même été atteint plusieurs fois lors de simulations exploratoires. Lorsque le réseau est trop étendu, il est alors intéressant d'essayer de le séparer en plusieurs sous-réseaux distincts. On dit diviser pour mieux régner, n'est-ce pas ?



Les tendances observées en simulateur ont ensuite été comparées à des résultats mesurés au laboratoire SmartLab d'Enedis dans des situations comparables. Les simulations sont légèrement optimistes à cause de la topologie du réseau et parce qu'elles ne prennent pas entièrement en compte les contraintes matérielle; toutefois, la validité du modèle de prédiction est confirmé.



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

Guilherme Ramos Milis^{1,2}, Marie-Cécile Alvarez-Hérault¹, Raphaël Caire¹, Christophe Gay², Bruno Gourguechon², Manuel Billaud²
¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000, Grenoble, France
² Enedis, France

OBJECTIF



- Exploiter pleinement ces données désormais accessibles en masse pour estimer de façon dynamique les charges de référence du réseau Basse Tension
- Concevoir une approche disruptive

CONTEXTE

- Un parc de compteurs intelligents désormais déployé ...



Index quotidiens de consommation et de production

Exploitation des Courbes de charge infra-journalières selon accord clients

Pmax horodatée

Indicateurs de qualité de fourniture

- dont l'exploitation des mesures doit permettre d'appréhender l'évolution fondamentale des usages électriques impactant le réseau



Des usages nouveaux consommateurs d'électricité : en 2020, 111.127 véhicules électriques

L'insertion massive d'Enr sur le réseau augmente la tension Au 1^{er} trimestre 2021, 492.414 sites de production raccordés au RPD

Des clients qui auto-consomment une partie de leur production : au 1^{er} trimestre, Enedis a plus de 100.000 clients raccordés en autoconsommation individuelle



CAS D'USAGES

Conception du réseau

Contraintes

Raccordement

Optimisation

Renforcement/
Création

VERS DE NOUVEAUX MODÈLES DE CHARGE POUR LE DIMENSIONNEMENT

Renforcement/ Création

Dimensionnement des ouvrages : choix des solutions techniques

Scénarios référence

Modèles de charge

Thermosensibilité

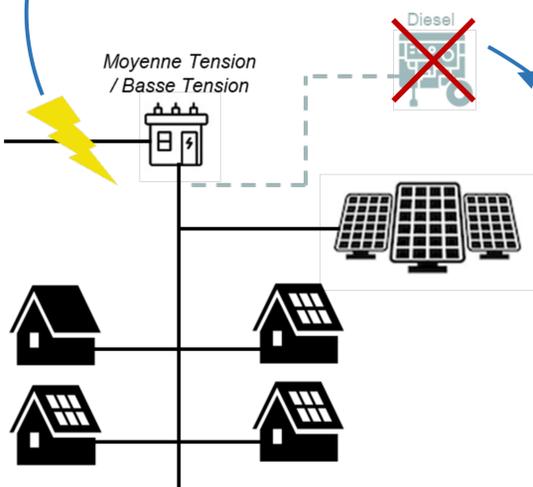
Evolution des comportements

Scénarios planification

Black-start et fonctionnement stable d'un réseau BT îloté en utilisant les productions EnR

Jane Marchand¹, Jérôme Buire¹, Vincent Debusschere¹, Nouredine Hadjsaid¹, Nabil El Jarrai² et Jean Pompée²
¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2ELab, 38000, Grenoble, France
² Enedis, France

Coupure de l'alimentation sur le réseau HTA



• Si le délai de réalimentation est court :
Attente ⌚

• Si le délai de réalimentation est long :
Connexion temporaire d'un groupe électrogène de secours

Comment éviter l'utilisation du groupe électrogène pour :

- ⌚ Réduire le temps de coupure
- ☁ S'affranchissement des énergies fossiles et réduire le bilan carbone
- 👤 Augmenter la résilience locale

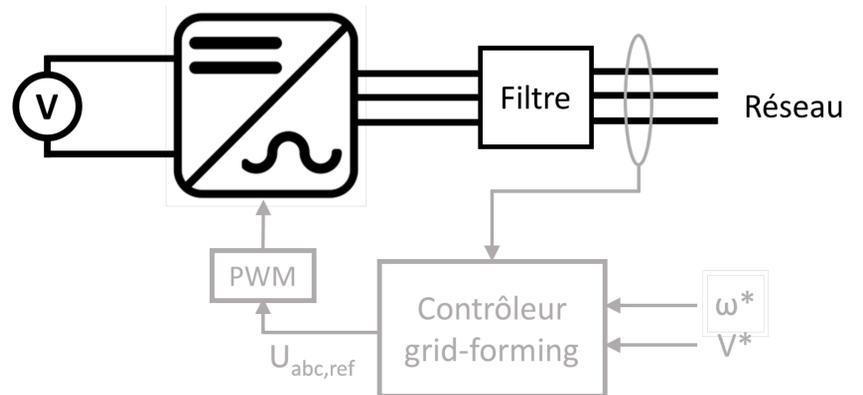
I - Contexte

II - Objectifs

Deux objectifs principaux :

- Assurer le **black-start** du micro-réseau avec de multiples onduleurs de petites taille
 - Maintenir la **stabilité** du réseau BT îloté avec des ressources locales et renouvelables limitées

Le type de contrôle **grid-forming**, qui permet à un onduleur de réguler la tension et la fréquence, contribuera à atteindre ces objectifs:



III - Contraintes

- Fonctionnement îloté interdit par la législation
- Pas de communication entre les panneaux PV
- Création locale de la tension
- Garantir la stabilité et la qualité de l'onde

IV - Défis

- Contrôle des convertisseurs non adapté actuellement (grid-following)
- Equipements de protection non adaptés
- Production solaire variable
- Réseau déséquilibré
- Absence d'inertie

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

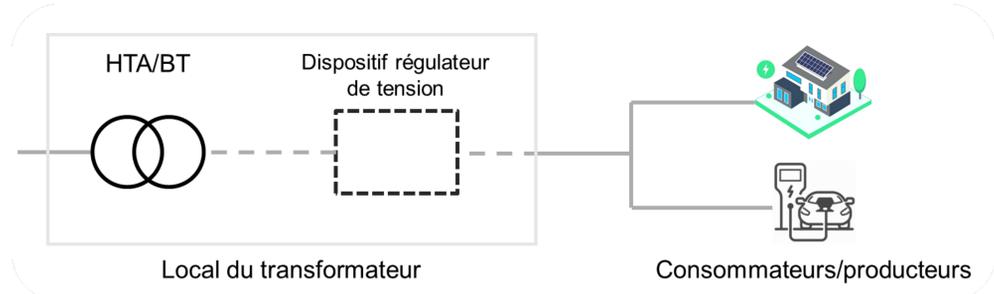
Sabine Vieira Reinert Frello¹, David Frey¹, Yvon Besanger¹, Noureddine Hadjsaid¹, Michel Cordonnier², Guillaume Langlet², Léonard Bacaud²

¹G2ELab, CNRS, Grenoble INP, Univ. Grenoble Alpes, 38000 Grenoble, France

²Enedis, France

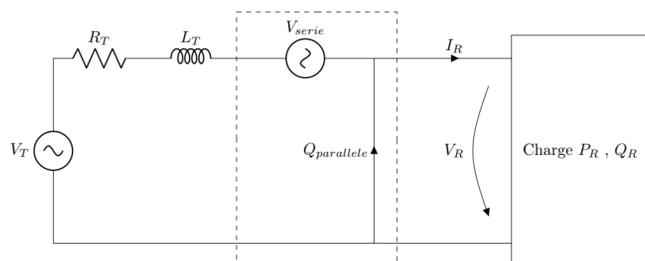
Contexte

- Développement de la production photovoltaïque et de la consommation par la recharge des véhicules électriques en basse tension (sur/sous-tensions locales et perturbations harmoniques sur le transformateur HTA/BT).
- Option pour différer le renforcement du réseau : ajout de régulateurs de tension basés sur des convertisseurs de puissance entre les transformateurs et les charges.

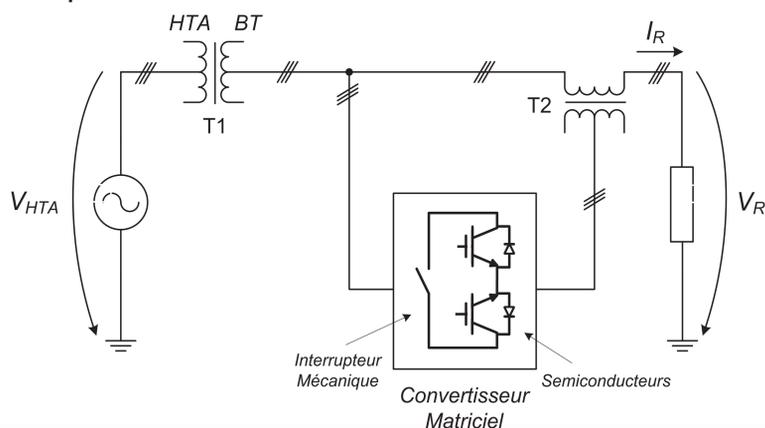


État-de-l'Art

- Mapping des régulateurs de tension pour réseaux moyenne et basse tension :
 - Solutions à base de transformateurs réglables.
 - Solutions à base d'électronique de puissance.
- Sélection des structures d'électronique de puissance pour le cas d'usage :
 - Structures classiques : Onduleurs de tension en série et en parallèle.

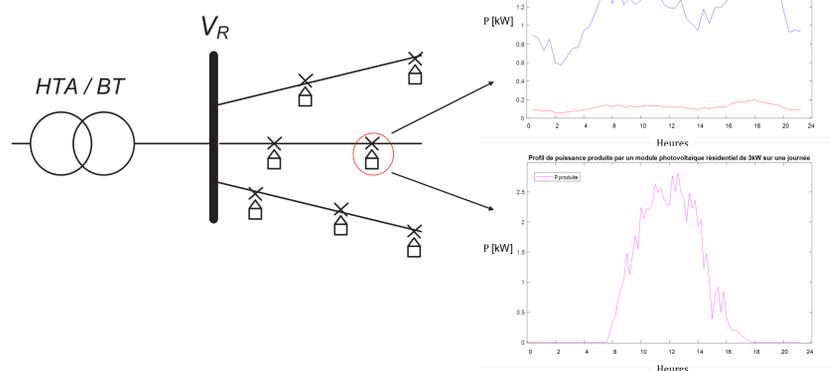


- Structure plus proche du principe de régulateur en charge : Système à base de convertisseur matriciel associé à un transformateur basse fréquence.



Modélisation et Analyses Préliminaires

- Élaboration du profil de mission : Analyse de la tension à côté du transformateur HTA/BT.



- Analyse des effets de la compensation de tension et injection de puissance réactive à côté du transformateur HTA/BT :
 - Injection de puissance réactive à côté du transformateur HTA/BT inefficace pour le réglage de la tension dans le réseau basse tension (compensation parallèle par injection de puissance réactive nécessite une impédance amont importante).
 - Compensation de tension en série efficace, mais limitée pour l'augmentation de la tension.
 - Possibilité d'associer les deux méthodes : série augmente l'impédance amont et parallèle permet le réglage de la tension.
- Réglage de tension basé sur le convertisseur matriciel associé à un transformateur basse fréquence :
 - Réglage fin ou réglage en escalier.
 - Possibilité d'utilisation d'interrupteurs hybrides.

Objectifs et Prochaines Étapes

- Développement d'une ou plusieurs structures d'électronique de puissance, sous contraintes de volume, coût, limitation de la puissance de court-circuit, réparabilité et rendement, pour assurer la stabilité de la tension dans le réseau de distribution avec forte pénétration de production décentralisée.
- Construction des prototypes des structures d'électronique de puissance sélectionnées.
- Tests des prototypes et évaluation de ses performances par rapport aux contraintes et impact réseau.
- Analyse coût-bénéfice de l'implémentation des structures innovantes proposées par rapport aux solutions existantes.