Fondation GRENOBLE INP

SmartGrids
BY FONDATION GRENOBLE INP

Journée scientifique

10.10.2024

Fondation GRENOBLE INP

Benoît GIROUD

Directeur de la Fondation Grenoble INP

+ de 18 M€ mobilisés depuis 2010

+ de 1400 mécènes et donateurs particuliers

1200 bourses

130 projets associatifs soutenus

15 chaires créées, dont 10 actives

9 écoles et 18 laboratoires investis

49 entreprises et organisations mécènes

Chaire d'excellence industrielle : Innovation et mécénat

- Travaux de recherche au service de la société
- Collaboration privilégiée entre partenaires industriels et laboratoires de Grenoble INP
- Agilité des projets : recrutement et affectation de ressources dédiées
- Dissémination des connaissances obtenus auprès de la communauté scientifique et de la formation
- Durée de 4 à 5 ans renouvelables

SmartGrids BY FONDATION GRENOBLE INP

Développer un réseau électrique intelligent et pour tous

Industry 4.h TECHNOLOGY SERVING PEOPLE BY FONDATION GRENOBLE INP

Améliorer la place de l'humain dans l'industrie du futur

Medelia BY FONDATION GRENOBLE INP

Analyse en fatigue probabiliste de structures métalliques

oxalia BY FONDATION GRENOBLE INP

Prédire la dynamique des écoulements multiphasiques

TwinHy BY FONDATION GRENOBLE INP

Jumeau numérique en production hydroélectrique et problèmes apparentés

Vivien QUEMA

Administrateur général de Grenoble INP - UGA

« Par ses formations, sa dynamique en recherche et valorisation, sa stratégie internationale et ses interactions avec la société, Grenoble INP - UGA contribue à bâtir un monde durable dans lequel ses ingénieurs, managers et docteurs agissent en citoyennes et citoyens éclairés et engagent les transitions. Nous sommes ainsi convaincus de notre rôle moteur à jouer, ces prochaines années, dans la transition collective vers un paradigme régénératif. »

G2Elab
Grenoble Génie Électrique
Grenoble Electrical Engineering

Nouredine HADJSAID

Directeur G2Elab et Chaire SmartGrids
Président Conseil Scientifique Think Smartgrids
Vice Président IEEE Power Energy Society

Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble

« Le G2Elab couvre un spectre scientifique qui va des matériaux et composants, pour aboutir à la conception et au pilotage de systèmes d'énergie électrique »

Sébastien JUMEL

Directeur Développement, Innovation et Numérique et membre du COMEX d'Enedis

« La transition écologique est en marche. Face à l'urgence climatique, la nouvelle France électrique entre dans une nouvelle ère qui place l'électricité comme l'énergie incontournable au service des nouveaux usages et de la sobriété énergétique. Cela engage des transformations majeures pour l'électricité et de grands défis pour Enedis.

En 2050, l'électricité devrait représenter 55 % de la consommation d'énergie contre 25 % actuellement. Une mutation des usages qui rend indispensable l'adaptation du réseau public de distribution. Nos clients - particuliers, entreprises, collectivités - doivent pouvoir continuer à compter sur un réseau fiable et performant. En parallèle, nous travaillons aussi à le rendre plus connecté et intelligent afin de favoriser des usages toujours plus sobres et plus respectueux de l'environnement. »

Pierre Mallet

Directeur R&D

Enedis

Service public de la transition écologique dans les territoires

---

« Les réseaux de distribution se trouvent au cœur de la transition énergétique et nous devons concevoir les solutions innovantes qui permettront de faciliter l'évolution vers une économie décarbonée, d'améliorer notre performance industrielle et d'offrir de nouveaux services à nos clients.

Cette collaboration, que nous avons renouvelé en 2021 pour cinq ans, nous a apporté de nombreux résultats, dont certains très directement utilisables dans nos processus industriels de gestion des réseaux.

Notre partenariat nous permet de travailler avec des experts au meilleur niveau à la fois dans les domaines de l'électrotechnique et dans les domaines IT, big data et IA. »

SmartGrids
BY FONDATION GRENOBLE INP

Marie-Cécile ALVAREZ-HERAULT
Titulaire de la chaire SmartGrids

Thématiques de recherche de la chaire

Sujets « réseau électrique »

Fonctionnement et optimisation des réseaux électriques de distribution

- Réseaux de distribution à **faible inertie**
- Fonctionnement et protection des **microgrids** (grid-connected et off-grid)
- Apports des **nouvelles solutions à base d'EP**
- **Réseau hybride AC/DC et DC**

Sujets « TIC »

Solutions innovantes à base de nouvelles technologies IT, Big Data et IA

- Données et méthodes IA pour l'optimisation et la gestion du réseau
- Architectures et outils informatiques pour les SI complexes
- Perspectives 5G et évolutions des CPL

Sujets transverses

- **Résilience des réseaux de distribution**
- **Exploitation des données accessibles pour la planification à toute échelle** temporelle

Innovation pédagogique

Saurez-vous anticiper l'arrivée massive des énergies renouvelables et des véhicules électriques à horizon 2050?

Equipe 2024

Micro-réseaux

Protection

Réseaux hybrides AC/DC

Dispositifs innovants à base d'électronique de puissance

Impact du stockage

Résilience

Edge computing

IA pour la distribution

Intelligence artificielle pour améliorer la connaissance des charges

Apport des données de réseaux sociaux pour la modélisation des charges

Résilience des réseaux de distribution en présence d'énergies renouvelables

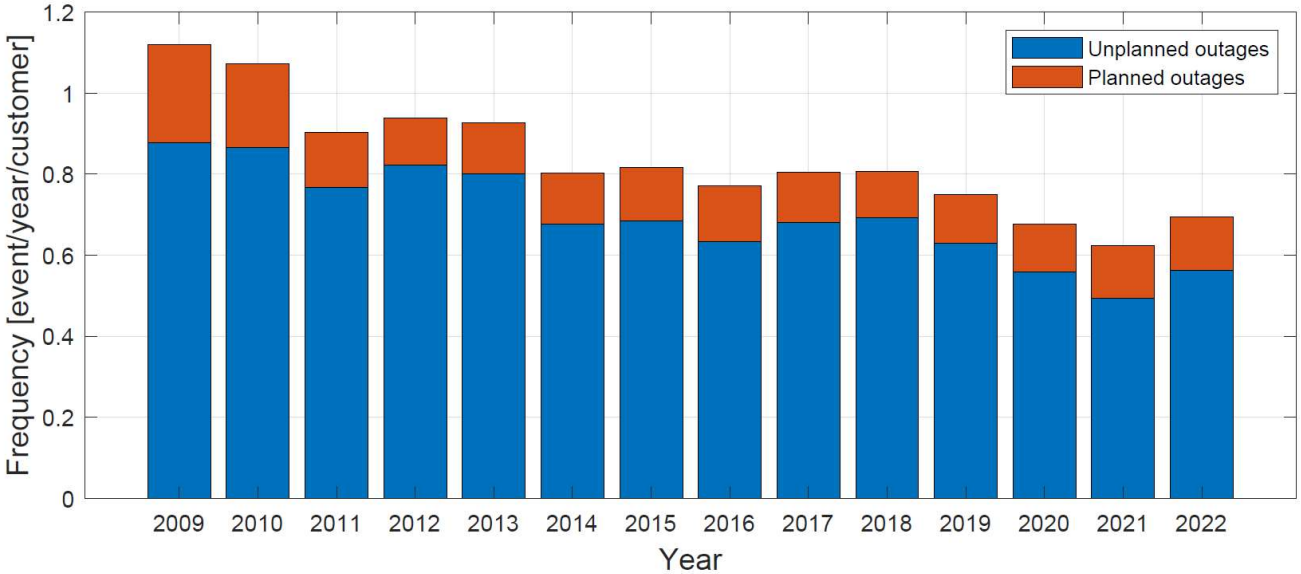
Black-start et fonctionnement stable d'une portion de réseau BT isolée en utilisant les productions locales renouvelables

Jane MARCHAND

Encadrants G2Elab : Jérôme BUIRE, Vincent DEBUSSCHERE et Nouredine HADJSAID

Encadrants Enedis : Nabil EL JARRAI, Iulia IVAN et Jean POMPÉE

Contexte



Fréquence des coupures longues (> 3 min) par client BT

Générateur diesel utilisé par Enedis

Critère B en 2023 :

55 min → Durée de coupure <u>non planifiée</u> par client

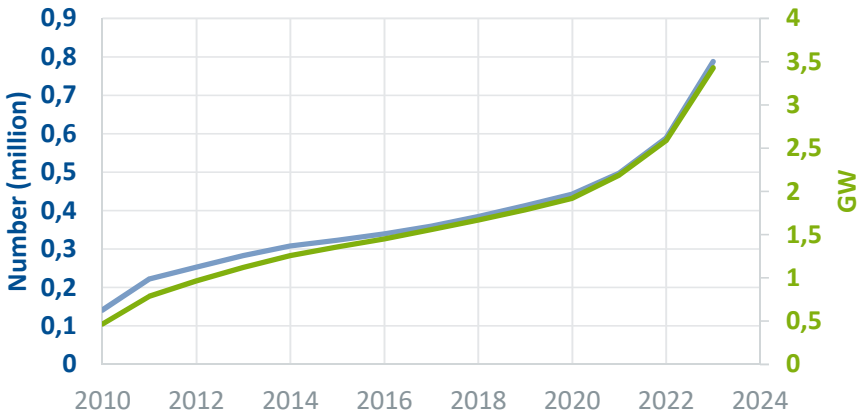
18 min → Durée de coupure <u>planifiée</u> par client

<u>Source:</u> Enedis Open Data

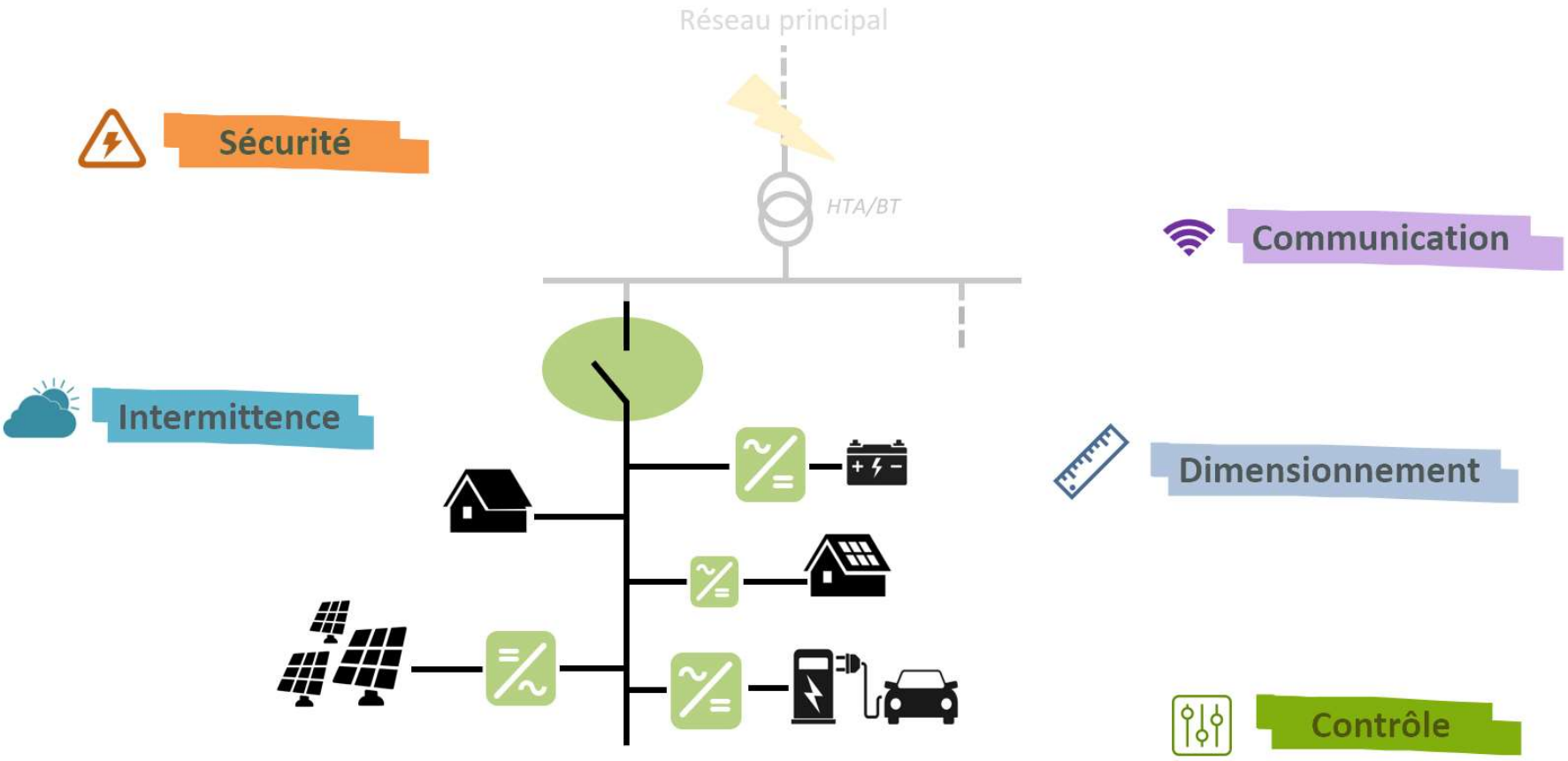
Contexte

POURQUOI?

- Réduire le bilan carbone de la réalimentation
- Réduire la dépendance aux énergies fossiles
- Augmenter la resilience locale
- Réduire le temps de coupure



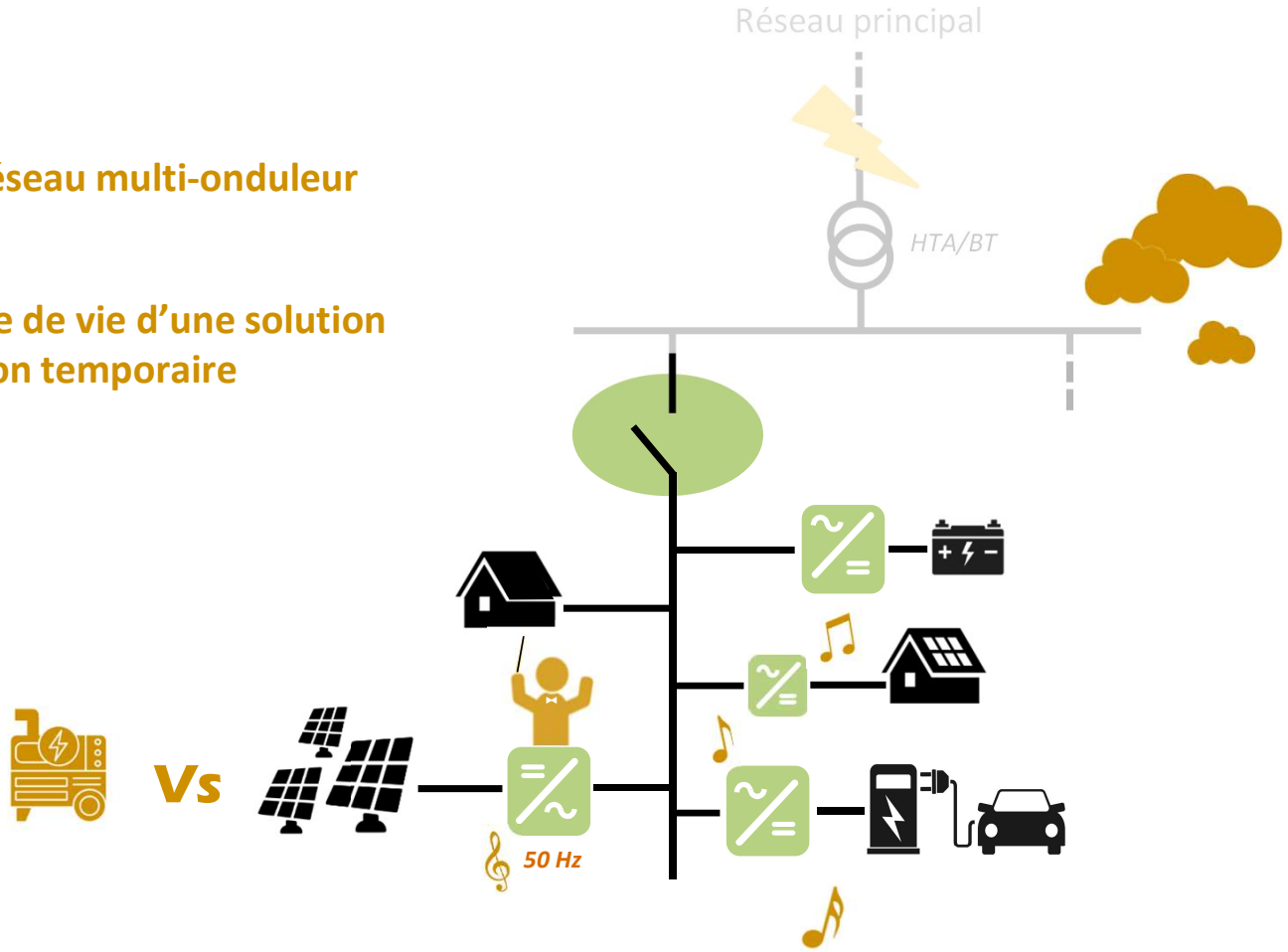
Challenges


Réseau principal
HTA/BT
Sécurité
Communication
Intermittence
Dimensionnement
Contrôle

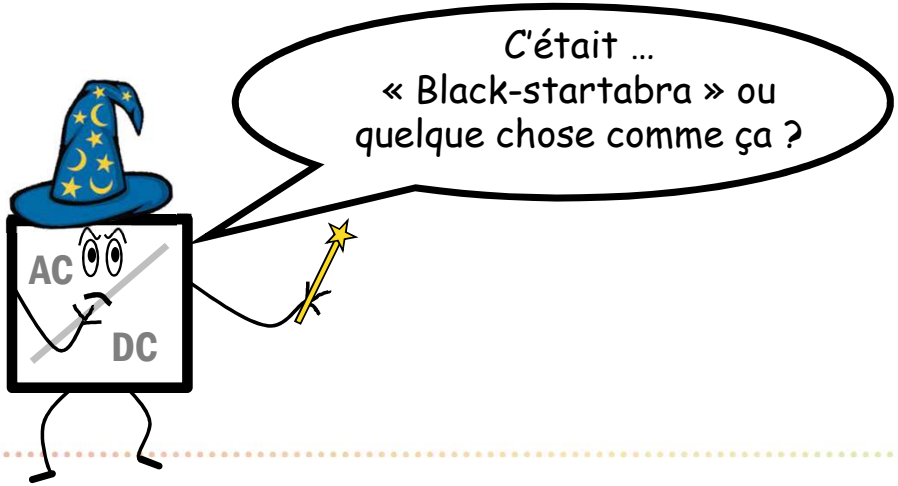
Plan

1- **Stabilité d'un réseau multi-onduleur**

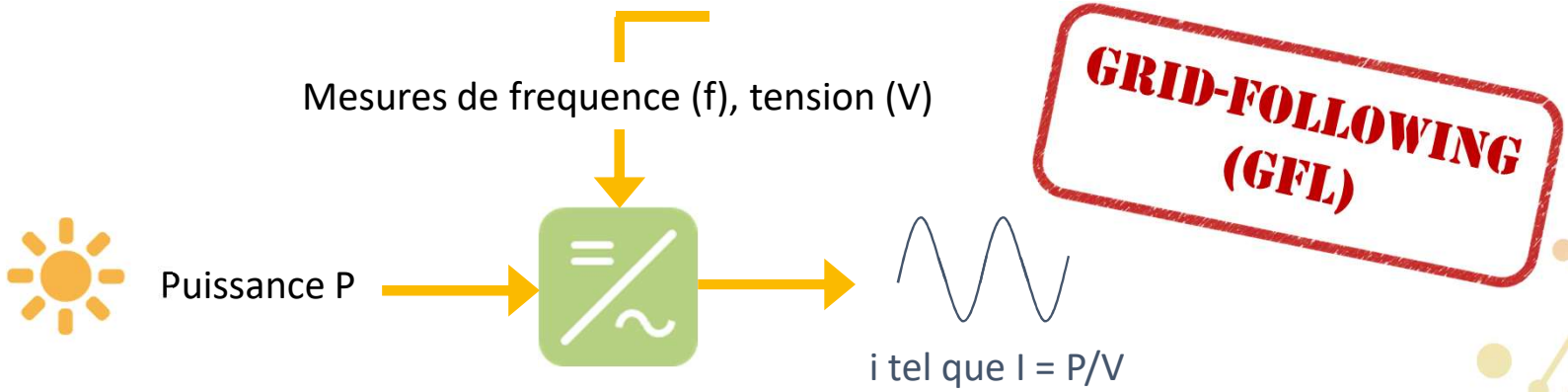
2- **Analyse de cycle de vie d'une solution de réalimentation temporaire**

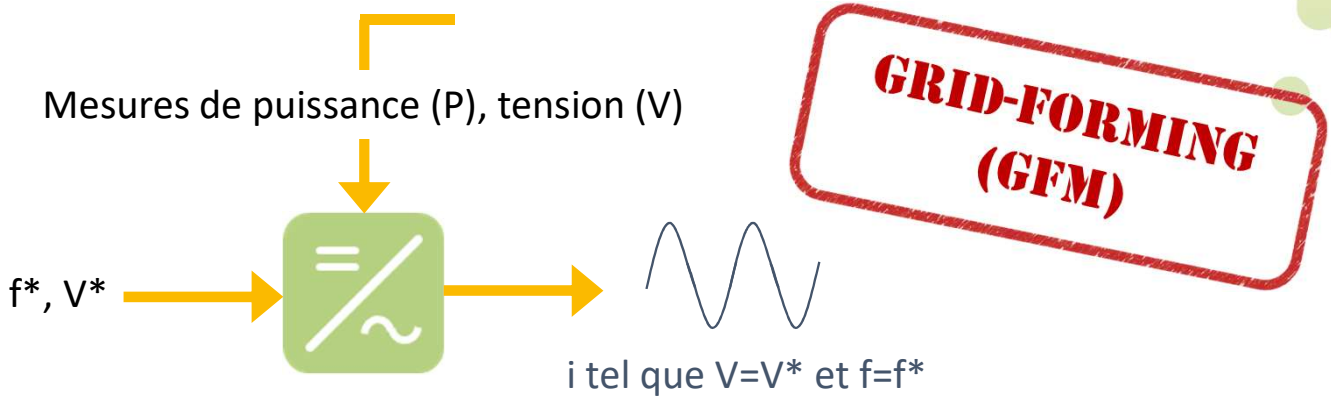


1- Stabilité durant le black start d'un réseau multi-onduleur



Un autre type de contrôleur …





Combien d'onduleurs en grid-forming ?

Pas assez

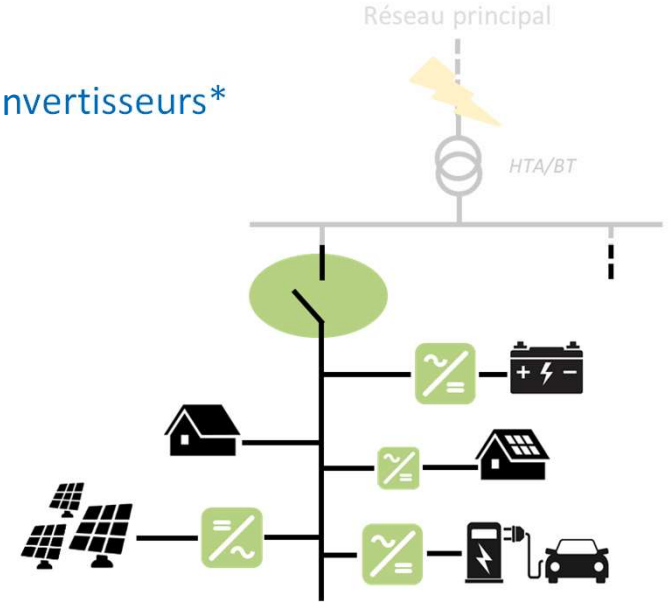
GFM

Trop

GFM

- Saturation
- Réseau pas assez fort

- Coût ++
- Interactions entre convertisseurs*



*A. Singh, V. Debusschere, N. Hadjsaid, X. Legrand, and B. Bouzigon, "Slow interaction converter-driven stability in the distribution grid: Small-signal stability analysis with grid-following and grid-forming inverters," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 39, no. 2, pp. 4521–4536, 2024

Combien d'onduleurs en grid-forming ?

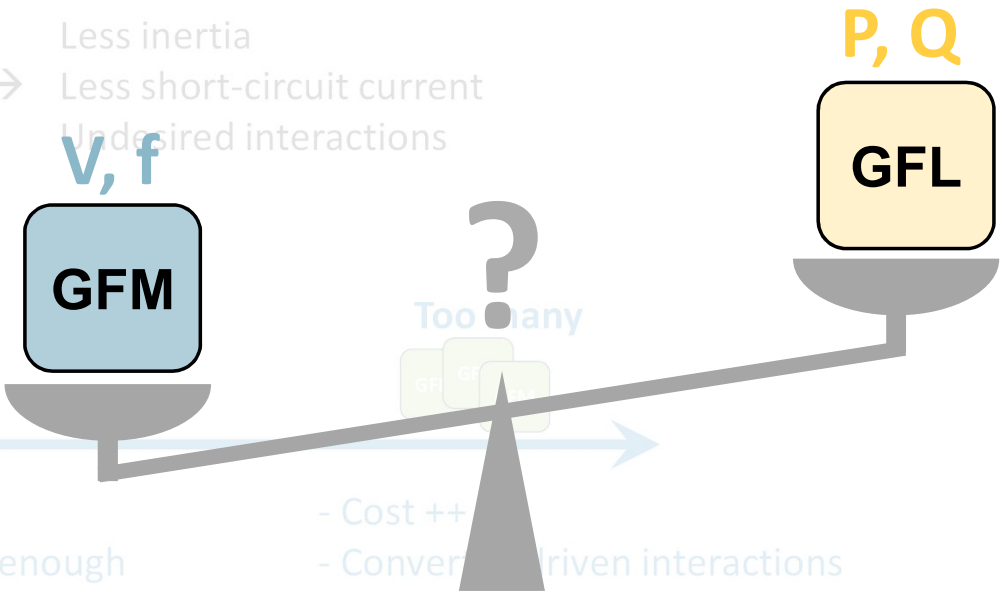
Many inverters → Less inertia
Less short-circuit current
Undesired interactions

- Saturation
- Grid not strong enough

- Cost ++
- Converter-driven interactions

Combien d'onduleurs en grid-forming ?

Many inverters →
Less inertia
Less short-circuit current
Undesired interactions



Too few

- Saturation
- Grid not strong enough

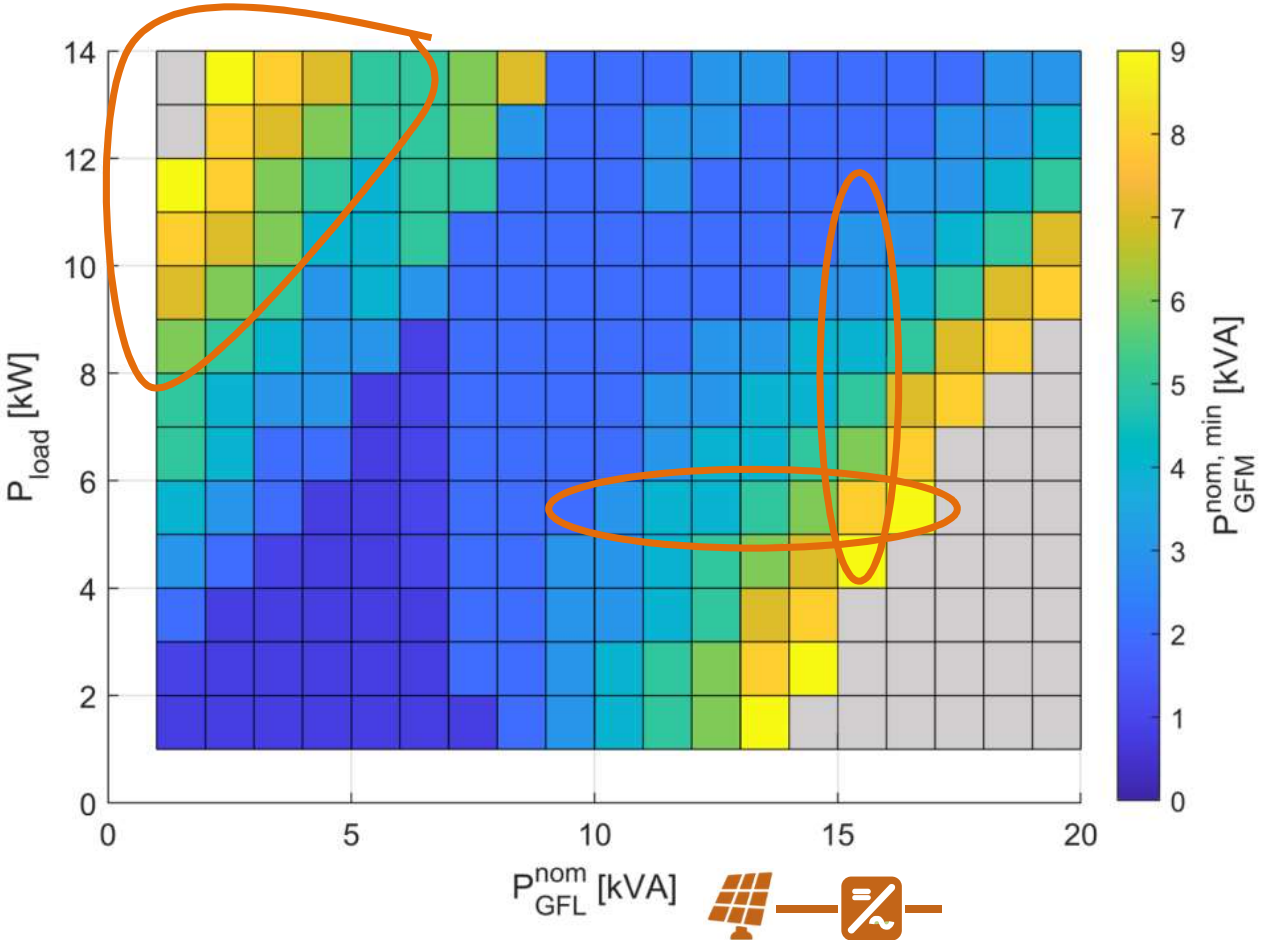
Too many

- Cost ++
- Converter driven interactions

Pourquoi c'est difficile?

- Modèles adaptés
- Méthodologie adaptée
- Prise en compte des paramètres

Etude du ratio GFM/GFL



Plus gros GFM

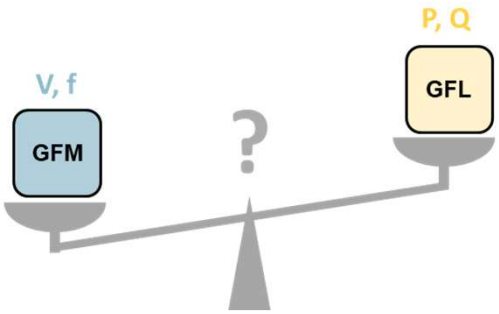
J. Marchand, J. Buire, V. Debusschere, N. EL Jarrai, J. Pompee, N. Hadjsaid, "Sizing Local Grid-forming Capacity to Re-energize Low Voltage Grids", *submitted to:* Electrical Power System Research

Etude du ratio GFM/GFL

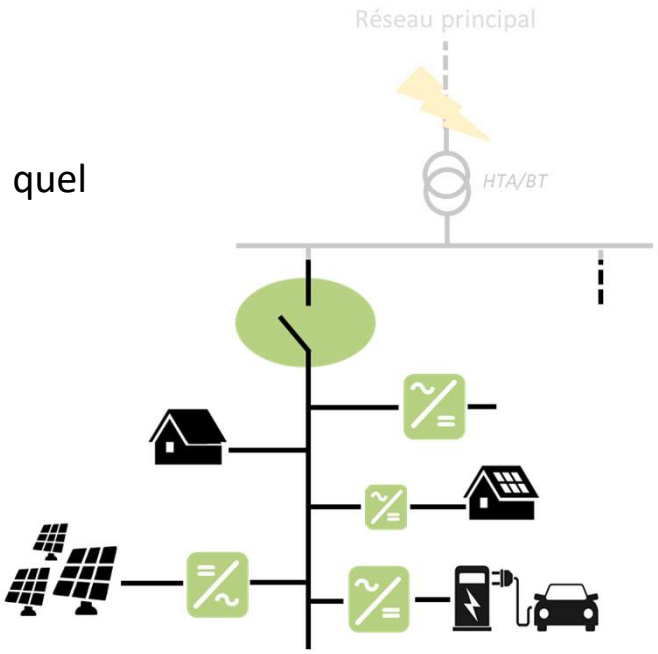
Catégorie	Paramètre	Impact
Conception du réseau	Topologie	Non (cf comparaison grid A & B)
	Position des GFMs	Non
	Longueur de ligne	Oui, mais sans changer le nb de GFLs connectés
	Impédance de ligne	Oui
	Type de charges	Oui
	Paramètres du filtre des onduleurs	Oui
Puissance et nombre d'onduleurs	n GFMs	Non
	n GFLs	Oui
	Capacité GFM	Oui
	P injectée GFL	Oui

J. Marchand, J. Buire, V. Debusschere, N. El Jarrai, J. Pompée and N. Hadjsaid, "Large-Signal Stability of Inverter-Based LV Microgrids: Share of Grid-Forming Units", 2023 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), Grenoble, France, 2023

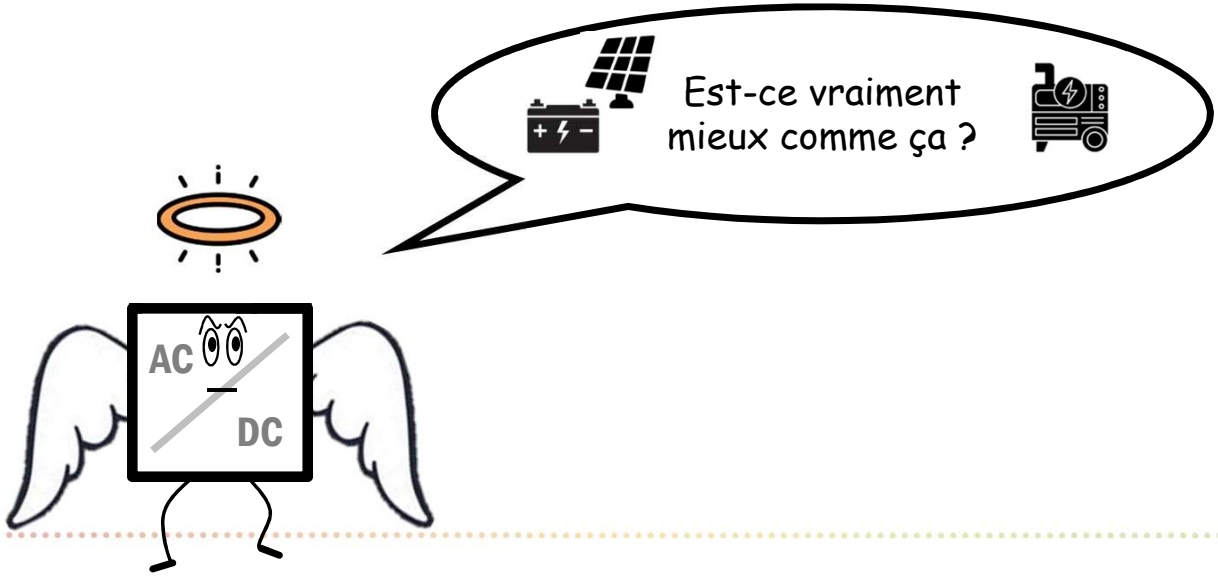
Etude du ratio GFM/GFL



- Réalimentation locale impossible dans le réseau BT tel quel (besoin de grid-forming)
- Analyse sur un cas d'étude, à généraliser



2- Analyse du cycle de vie d'une solution de réalimentation temporaire



ACV – Unité fonctionnelle

Définition de l'unité fonctionnelle

Inventaire

Extraction des données

Sélection des indicateurs

Allocation des émissions pour les équipements multi-usage

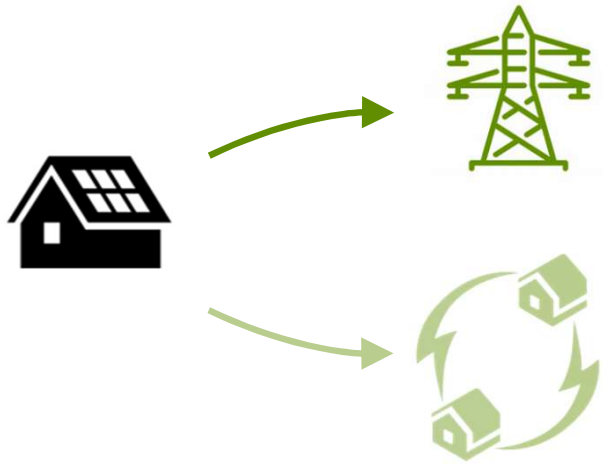
Analyse et comparaison des résultats

"Réalimentation de 30 maisons pendant 6h en continue, en commençant à 10h, sous une météo d'hiver nuageuse, 2 fois par ans pendant 20 ans"

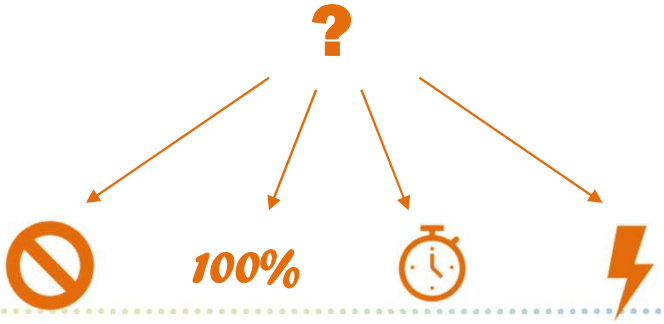
ACV – Allocation des émissions

- Définition de l'unité fonctionnelle
- Inventaire
- Extraction des données
- Sélection des indicateurs
- Allocation des émissions pour les équipements multi-usage
- Analyse et comparaison des résultats

Exemple:



Comment allouer les émissions ?



Contexte

Définition de l'unité fonctionnelle

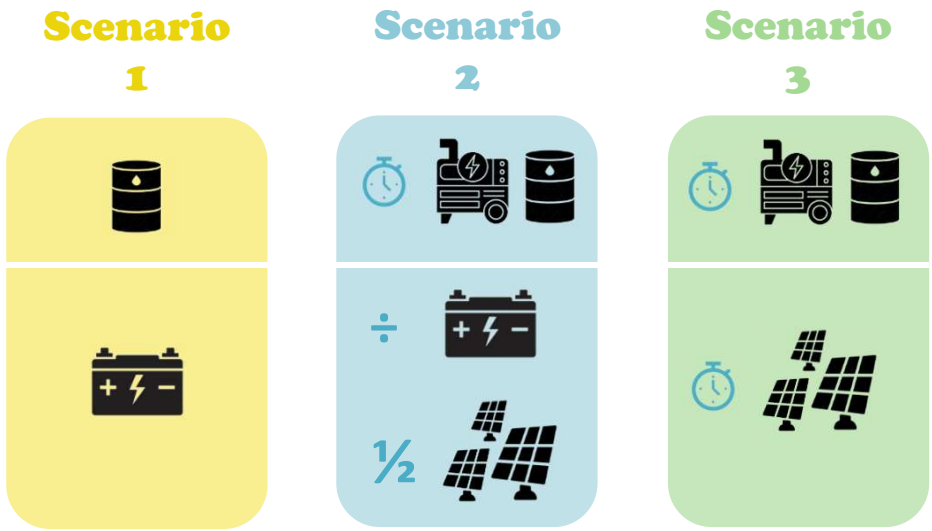
Inventaire

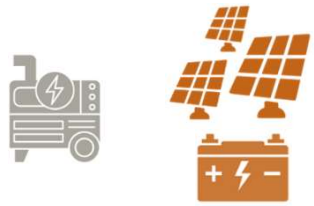
Extraction des données

Sélection des indicateurs

Allocation des émissions pour les équipements multi-usage

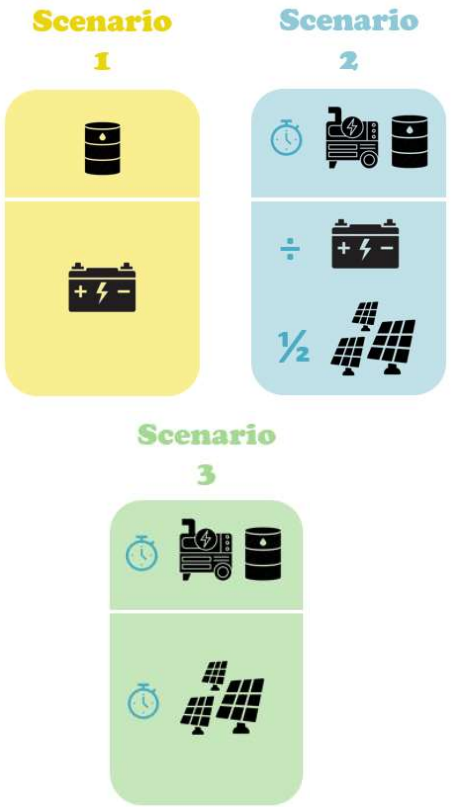
Analyse et comparaison des résultats

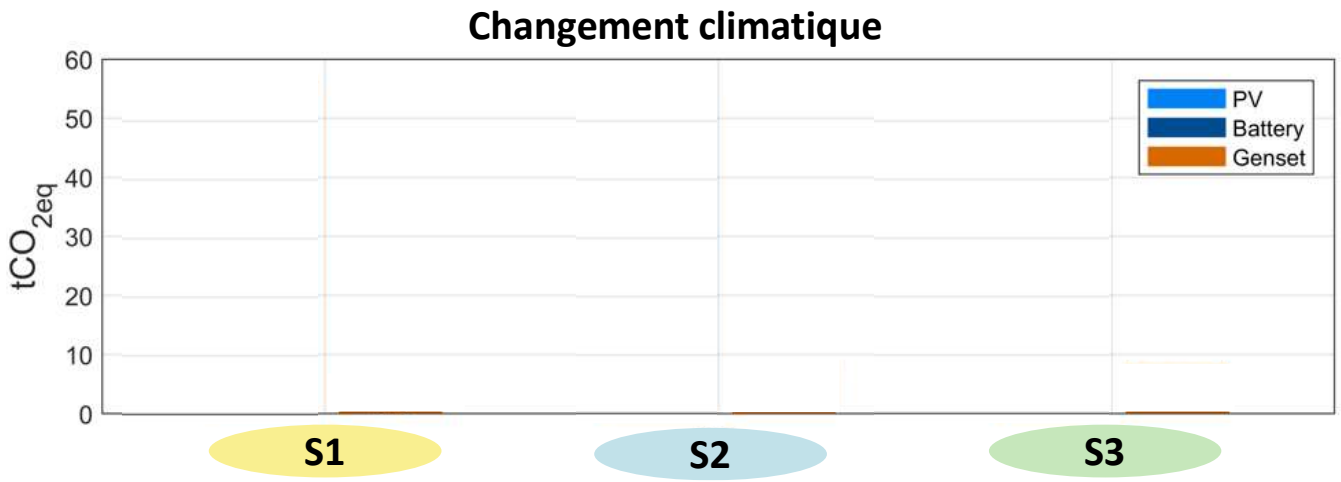




Solution 1 *Solution 2*

ACV - Résultats





J. Marchand, J. Buire, V. Debusschere, J. Pompee, I. Ivan, N. Hadjsaid, “Using Life Cycle Assessment Tools to evaluate the relevance of a Re-energization Project”, *submitted to:* Journal of Cleaner Production

Conclusion & perspectives

Next steps:

- Adapter le plan de **protection** ;
- Tester **différents types de contrôleurs GFM** : matching control, droop, virtual oscillator, etc ;
- Investiguer l'impact du **réglage** du contrôleur sur le ratio GFM/GFL ;
- Introduire des déséquilibres dans le réseau îloté.

Validation expérimentale:

- Valider le travail sur un **démonstrateur**, en labo et sur le terrain.

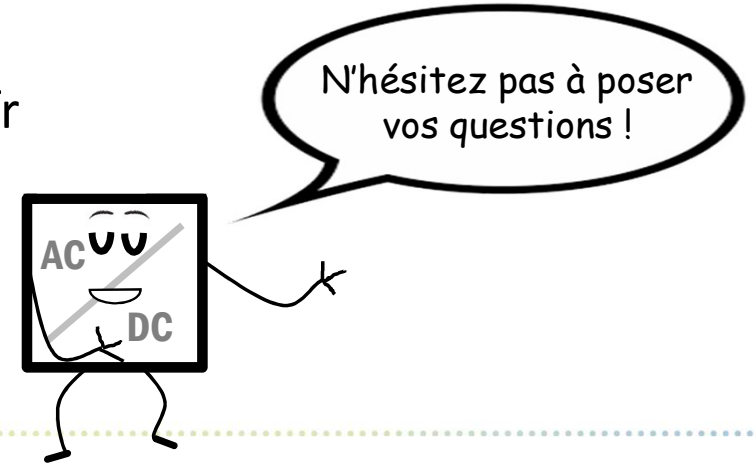
Autres perspectives:

- Réfléchir au moyen de **compensation** pour les producteurs PV qui fournissent un service réseau (black start) ;
- Considérations sociales : étudier les **besoins des utilisateurs** du réseau pendant les situations de coupure et d'urgence.

Merci de votre attention !

Jane MARCHAND

jane.marchand@g2elab.grenoble-inp.fr



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

David Frey

Doctorante : Sabine VIEIRA REINERT FRELLO
Encadrants G2ELab : David FREY, Yvon BESANGER, Nouredine HADJSAID
Encadrants Enedis : Guillaume LANGLET, Michel CORDONNIER, Léonard BACAUD, Mahana BERNIER et Kamel SAHNOUNI

Contexte et objectifs

Contexte :

- Développement photovoltaïque (PV) et de véhicules électriques (VE) ➡ Variations de tensions au niveau BT hors limites des normes

- **Compromis de Enedis** : Assurer le fonctionnement du **réseau basse tension (BT)** selon la Norme européenne EN50160 ($V_{Réseau} = V_{nom} \pm 10\%$)

- Souhaitable d'éviter
  - Modifications aux bornes des clients (trop nombreux)
  - Changements côté réseau HTA en raison des coûts plus élevés

Contexte et objectifs

Solutions pour différer le renforcement du réseau :

- Régleurs en charge au niveau des transformateurs HTA/BT
- Ajout de dispositifs en ligne basés sur des **convertisseurs de puissance** entre les transformateurs et les charges

Objectif principal des solutions à base de l'électronique de puissance (EP) :

- Facilité de mise en œuvre
- Limiter les perturbations pendant les commutations

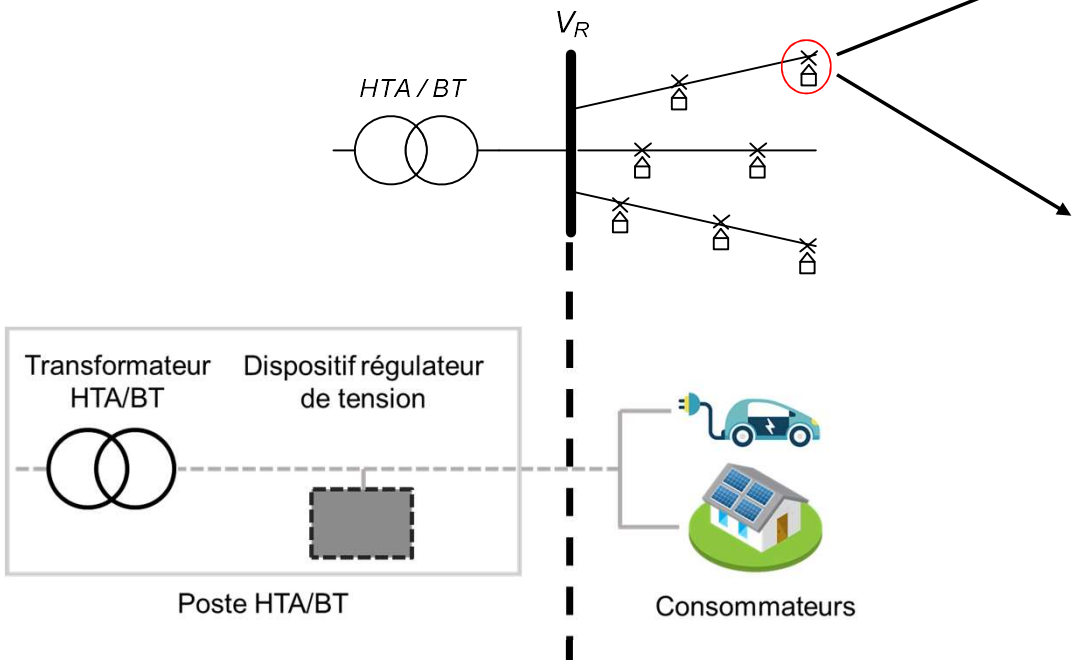
Contraintes :

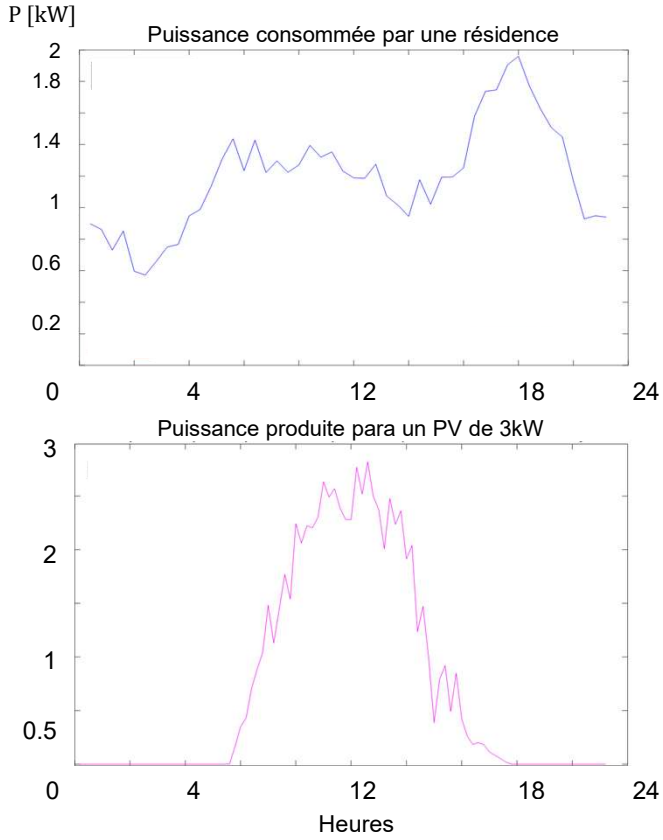
- Encombrement
- Coût (CAPEX et OPEX)
- Pcc (limitation)
- Taux de défaillance
- Réparabilité
- Rendement

Comprendre les « contraintes » réseau

Composition du réseau BT testé:

- Nombre de clients BT : 61
- Puissance du poste HTA/BT : 250 kVA
- Longueur maximale développée : 770 m





Comprendre les « contraintes » réseau

Élaboration des cas d'études : Analyse de la tension (V_R) à côté du transformateur HTA/BT

- Considération de différents scénarios de charge pour le futur (prévisions 2050*)

Cas*	Maisons avec PVs en toiture [%]	Maisons avec stations de recharge de VEs [%]
Stagnation	10.3%	33%
Intermédiaire	55.2%	57%
Rupture	100%	81%

- Calculs de répartition des charges
- Évaluation des demandes de compensation de tension au long d'une journée

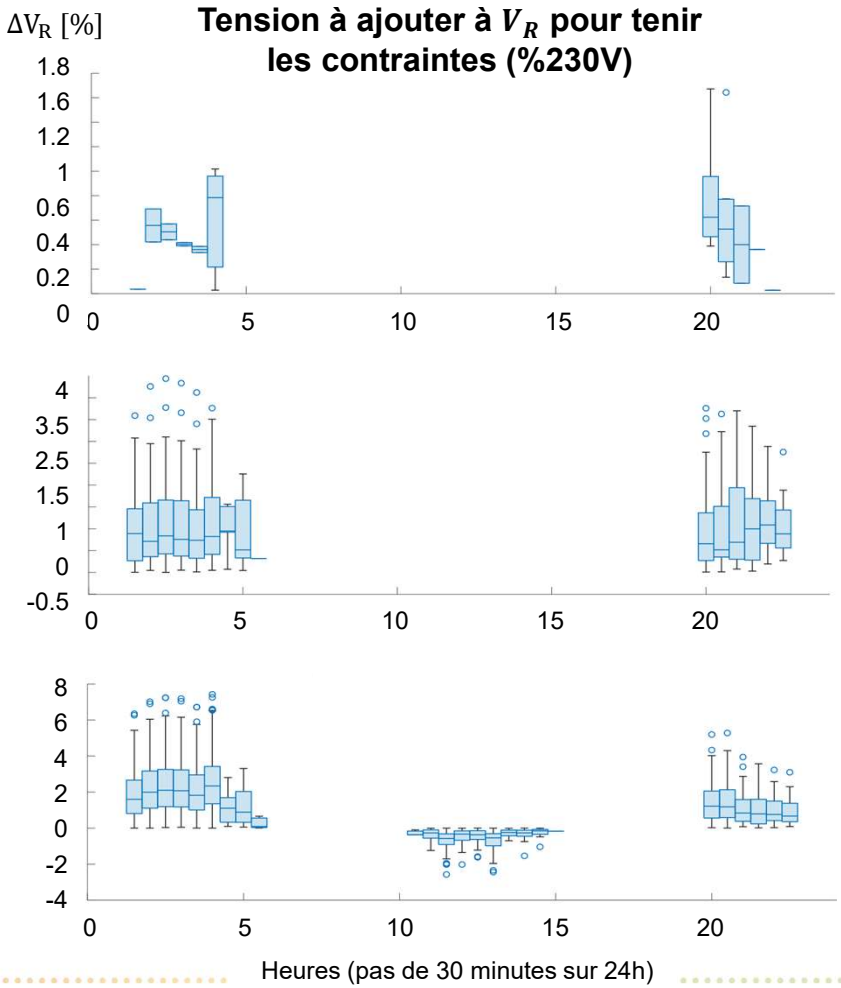
* « Éléments de prospective du réseau public de distribution d'électricité à l'horizon 2050 », rapport Enedis de 2021

Comprendre les « contraintes » réseau

Cas Stagnation

Cas Intermédiaire

Cas Rupture



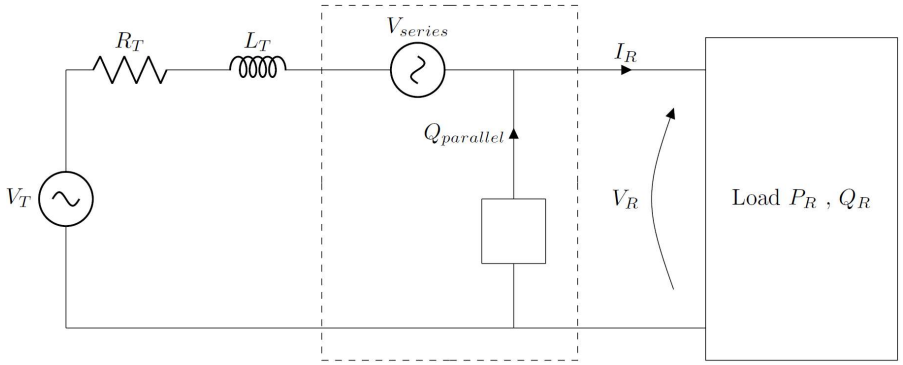
Une compensation de +/-2,5% semblerait convenir dans beaucoup de cas.

Méthodes de compensation de tension

Injecter de la puissance réactive

Structures EP classiques (**onduleurs de tension**)

- Compensation en **parallèle**
- Compensation en **série**
- Compensation **mixte**



=> Nécessite des valeurs importantes de puissance réactive pour des effets limités

=> Solution potentiellement utilisable en bout de ligne

Injecter une tension

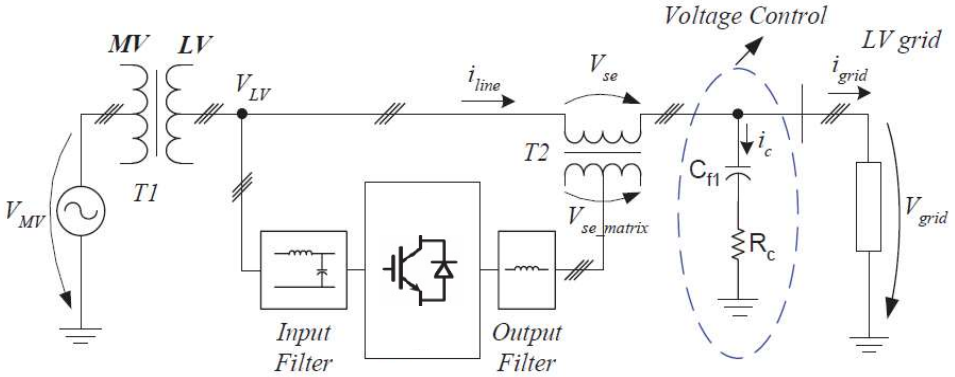
Structure plus proche du principe du régleur en charge :

Réglage par « crans » (similaire à un changement de TAP)

Solution plus basique et robuste

Réglage linéaire

Solution à découpage haute fréquence

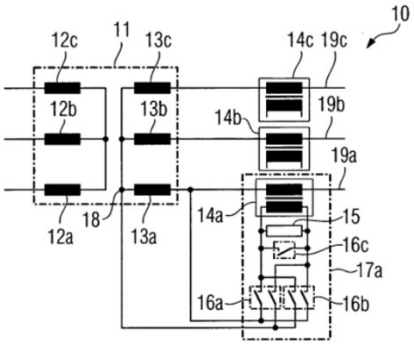


Méthodes de compensation de tension

Qu'est-ce qui existe?

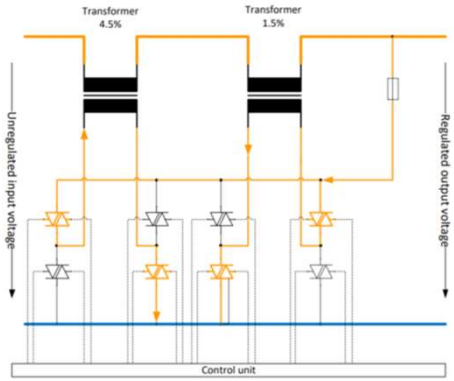
Solutions à base de contacteurs ou de Triacs

ou linéaires



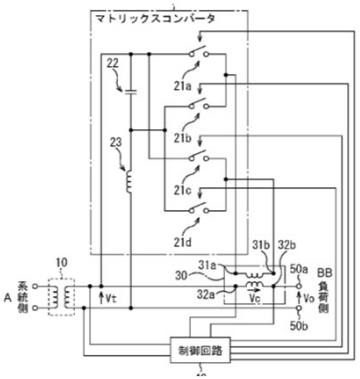
Brevet SIEMENS
(DE 10 2010 040 969 A1)

Contacteurs électromécaniques
⇒ Présence d'un parasurtenseur (15) pour les commutations



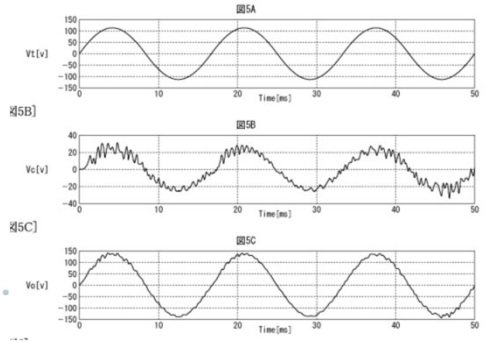
LVRSys de A. Eberle GmbH & Co. KG

⇒ Commande des TRIACS
et comportement lors des basculements



Brevet Université Kagoshima
(WO 2007 / 108427)

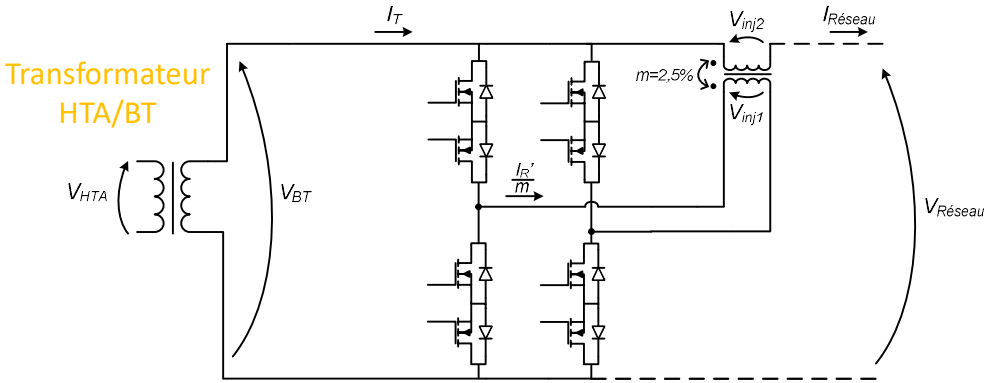
⇒ Filtrage CEM et qualité onde de tension



Système développé

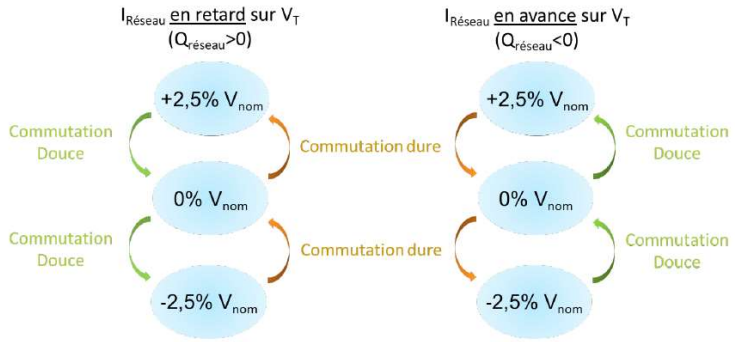
Structure de conversion AC/AC

Convertisseur monophasé relié au réseau par un transformateur basse fréquence (BF)



Commutation en mode « TAP classique »

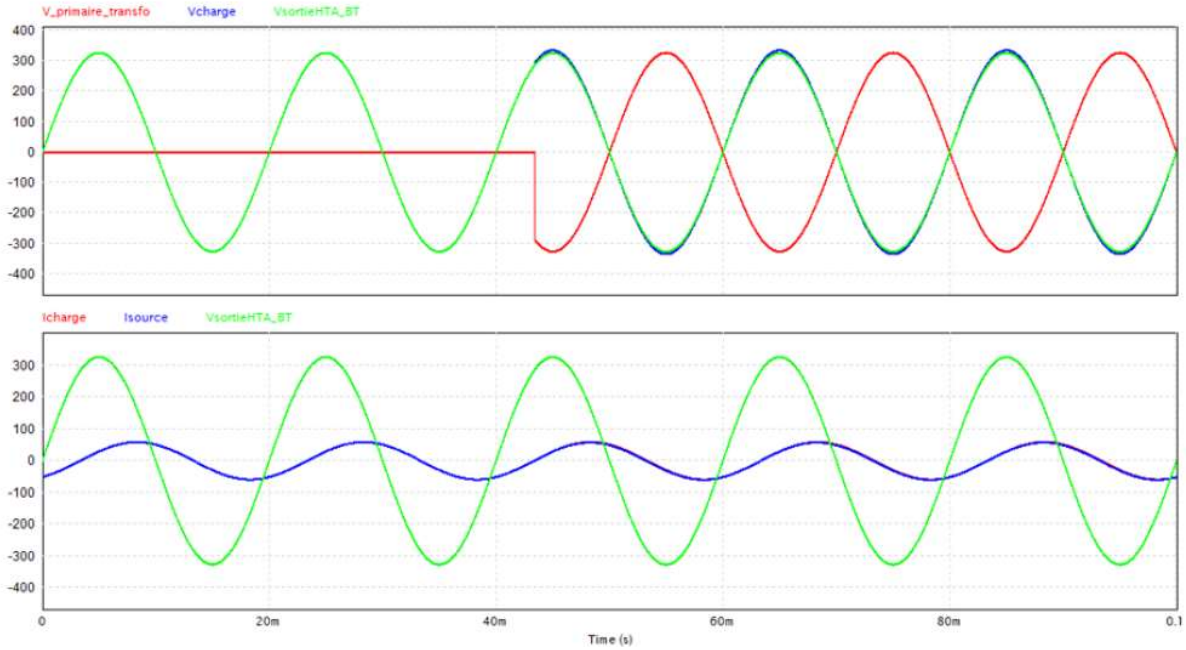
- Évolution de la tension par pas
  - ⇒ Passage d'une transition quelques fois par jour
  - ⇒ Contrôle simplifié
- Trois niveaux de tension injectée : +2,5% / 0% / -2,5%
- Possibilité de commuter à/proche du zéro de courant de manière totalement contrôlée
  - ⇒ Peu pertes, peu de perturbations
  - ⇒ Commutation douce possible
  - ⇒ Résilience à des soucis de synchronisation



Système développé

Structure de conversion AC/AC : Commande de la commutation

- Synchronisation sur le passage par 0 du courant
- Réalisation d'une séquence spécifique pour chaque cas de commutation (de 0 à -2,5% avec I en retard en commutation douce)

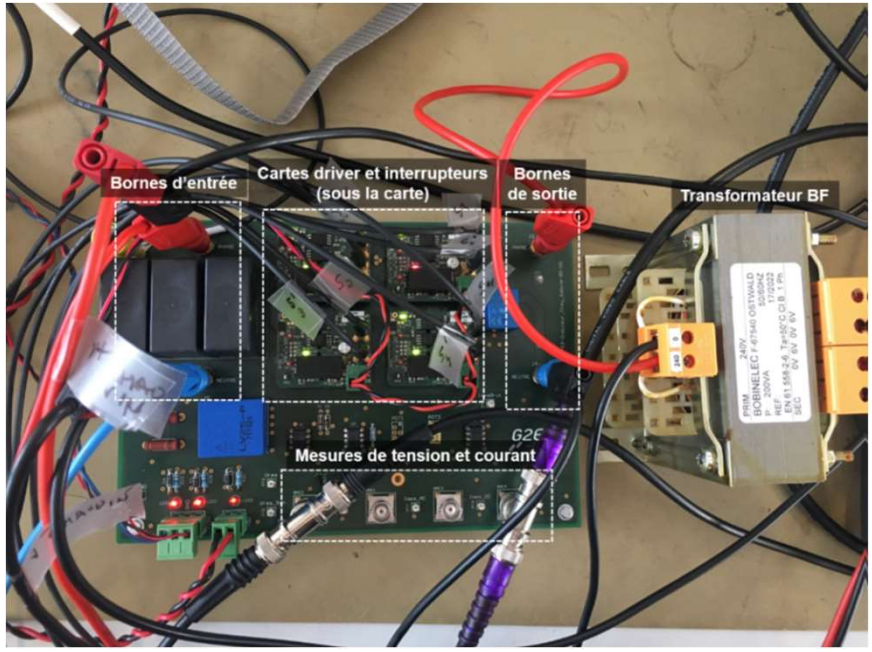


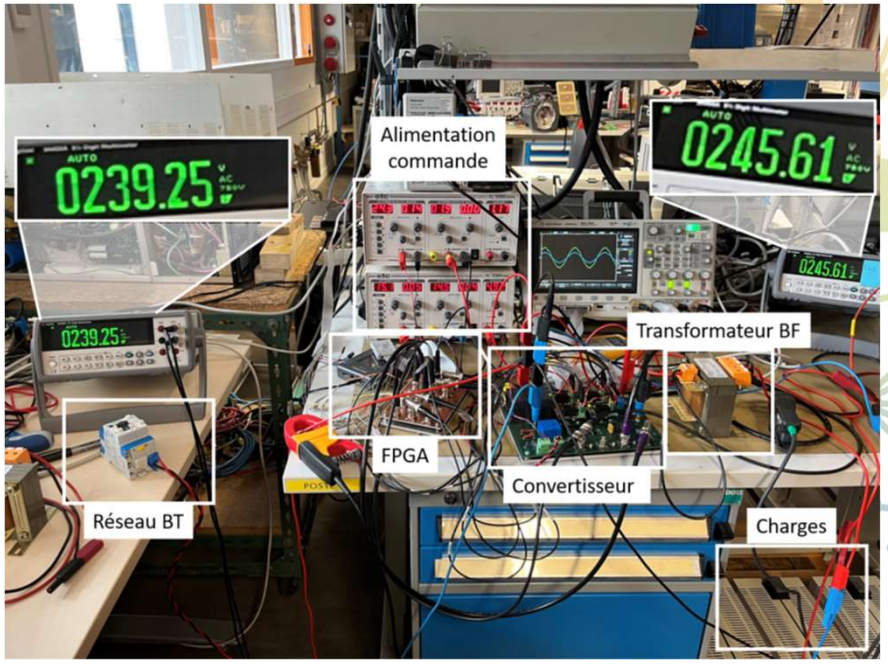
Prototype de validation

Prototype réalisé

Dispositif monophasé
Puissance : 200VA
Courant de ligne : 32A

Mesure des tension et courant du convertisseur
Contrôle embarqué dans un FPGA
Synchronisation sur les passage par 0 de I

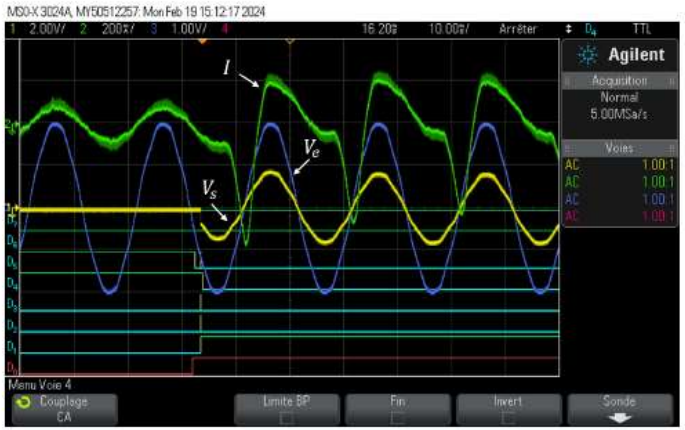


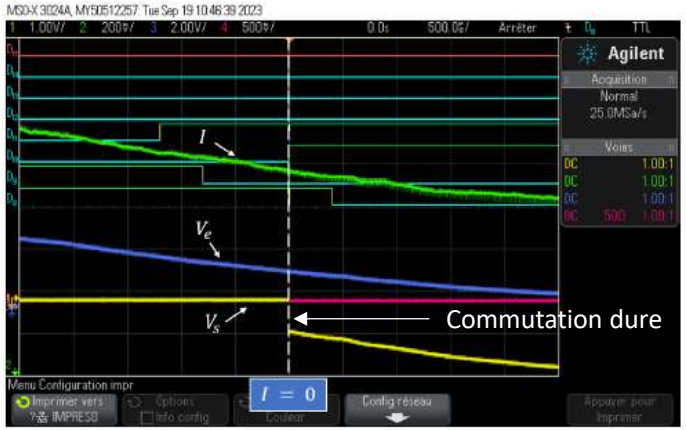


Analyse des commutations

Résultats de commutations

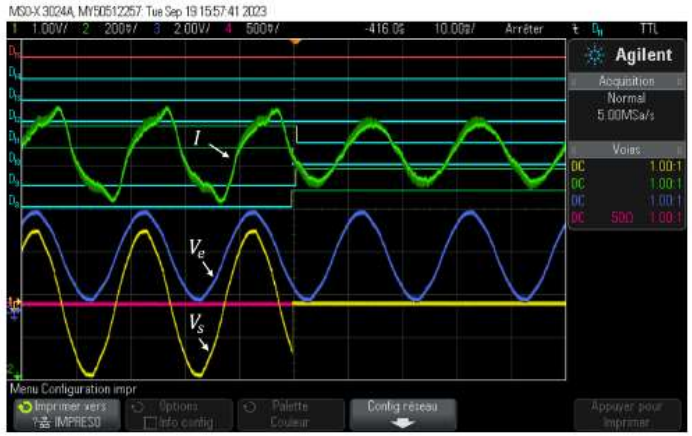
Commutation dure
0 à 2,5%

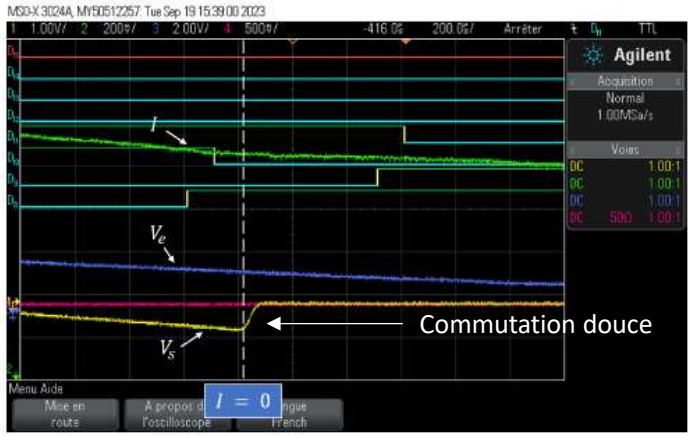




Séquence de commandes « rapprochées ». Le changement de signe de I n'est pas souhaité.

Commutation douce
2,5% à 0





Temps d'attente pour le changement de signe de I

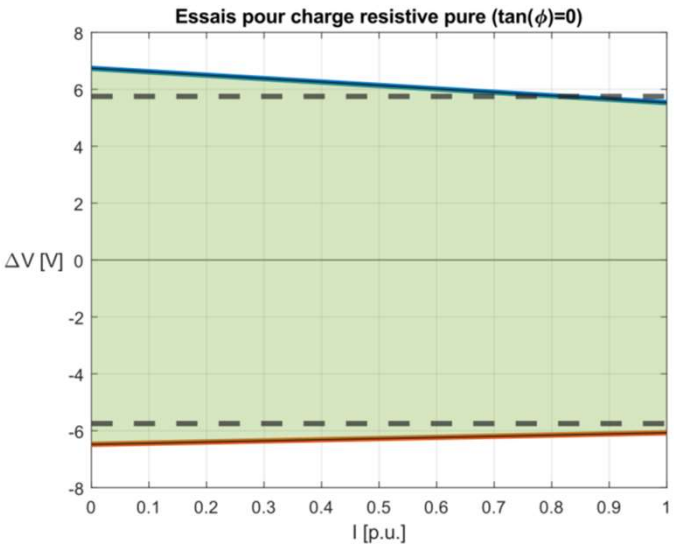
Analyse des commutations

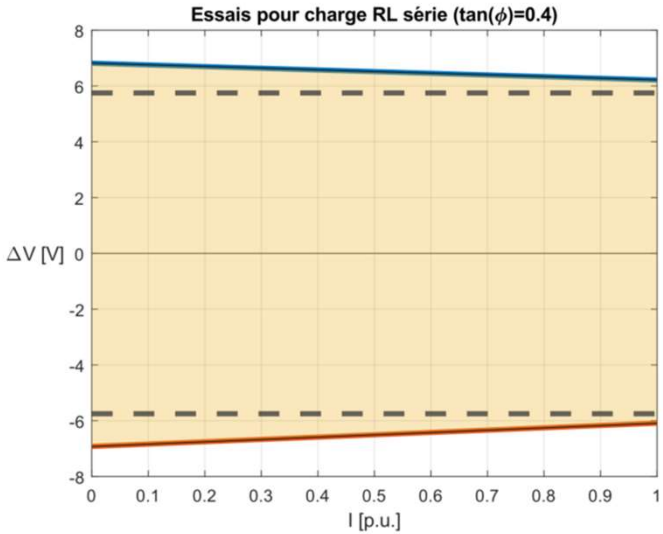
Résultats de commutations : Robustesse vis-à-vis de la désynchronisation

- 3 « commutations »
- Etat final obtenu
- Pas de perturbations
- Pas de sur-contraintes sur les interrupteurs

Comportement dans le réseau

Performances du système : Capacité de compensation versus la puissance transitée



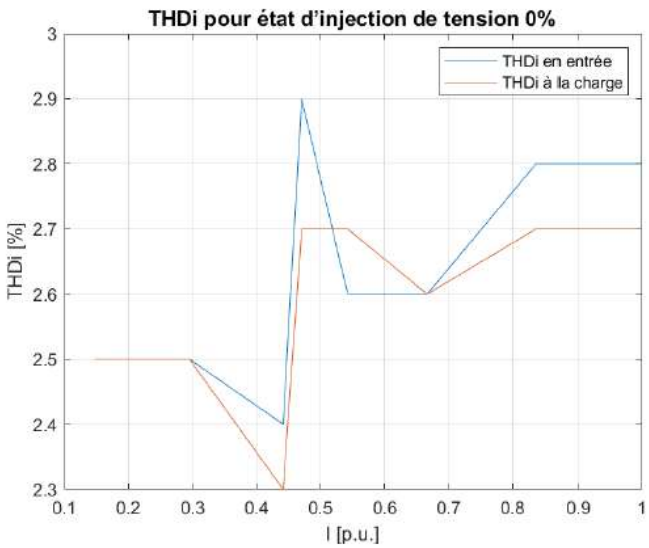


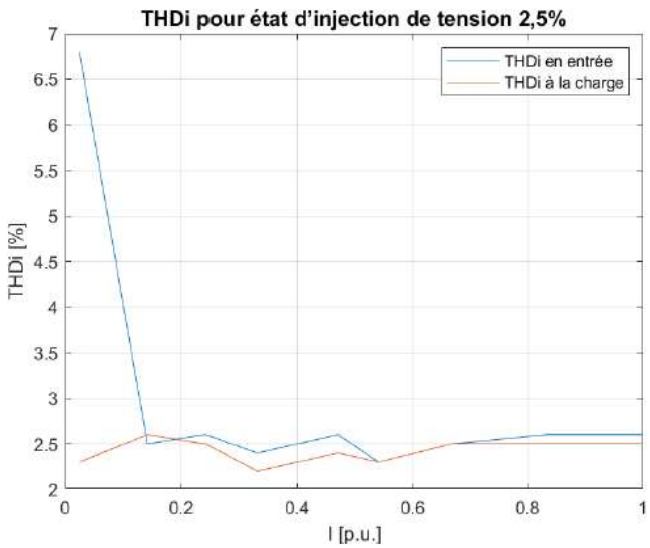
- Les performances en compensation sont tenues
- Pertes de performance liés aux impédances séries du transformateur
- Résistance série un peu élevée => Optimisation du transformateur

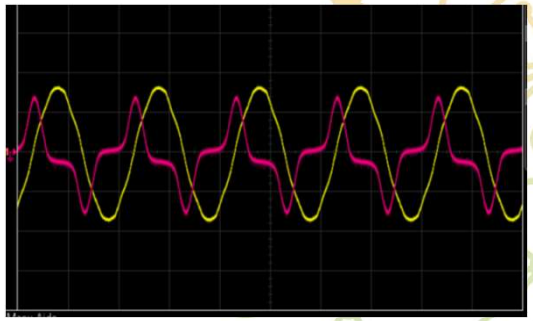
R_{s2}= 15,4 mΩ
L_{s2}= 5,4 µH

Comportement dans le réseau

Performances du système : Perturbations induites







- Très légère dégradation du THDI à basse puissance liée au courant magnétisant du transformateur

Conclusions

- **La solution d'injection série a montré son efficacité**

- **La maitrise des commutations permet de ne pas avoir de perturbations au niveau de la charge (ni surtensions, ni creux de tensions) et ne nécessite pas de parasurtenseur**

- **La commutation semble robuste, même en cas de désynchronisation**

- **La compensation fonctionne sur la plage de puissance et l'impédance d'insertion est limitée. Une optimisation du design du transformateur, notamment la section de câble et son mode de bobinage peut potentiellement permettre de les réduire encore**

- **Des interrupteurs mécaniques peuvent être envisagés en parallèle des semiconducteurs pour éviter une sur sollicitation des semi-conducteurs en régime permanent, notamment dans les cas de défaut réseau**
  - Les semi-conducteurs assurent la transition;
  - Les interrupteurs mécaniques se ferment une fois la transition réalisée.

Merci de votre attention !

David Frey

david.frey@g2elab.grenoble-inp.fr

Impact des productions à base de l'électronique de puissance sur le réglage des protections des réseaux électriques de distribution lors d'un défaut polyphasé

Lainser SKLAB

Encadrants G2Elab : Bertrand RAISON

Encadrants Enedis : Manuel BILLAUD, Benjamin SCHULER, Mahana BERNIER, Christophe BOISSEAU

Plan de la présentation

1. Contexte
2. Objectifs
3. Pilotage des onduleurs lors d'un défaut
4. Cas d'étude et résultats
5. Solutions proposées
6. Conclusion et perspectives

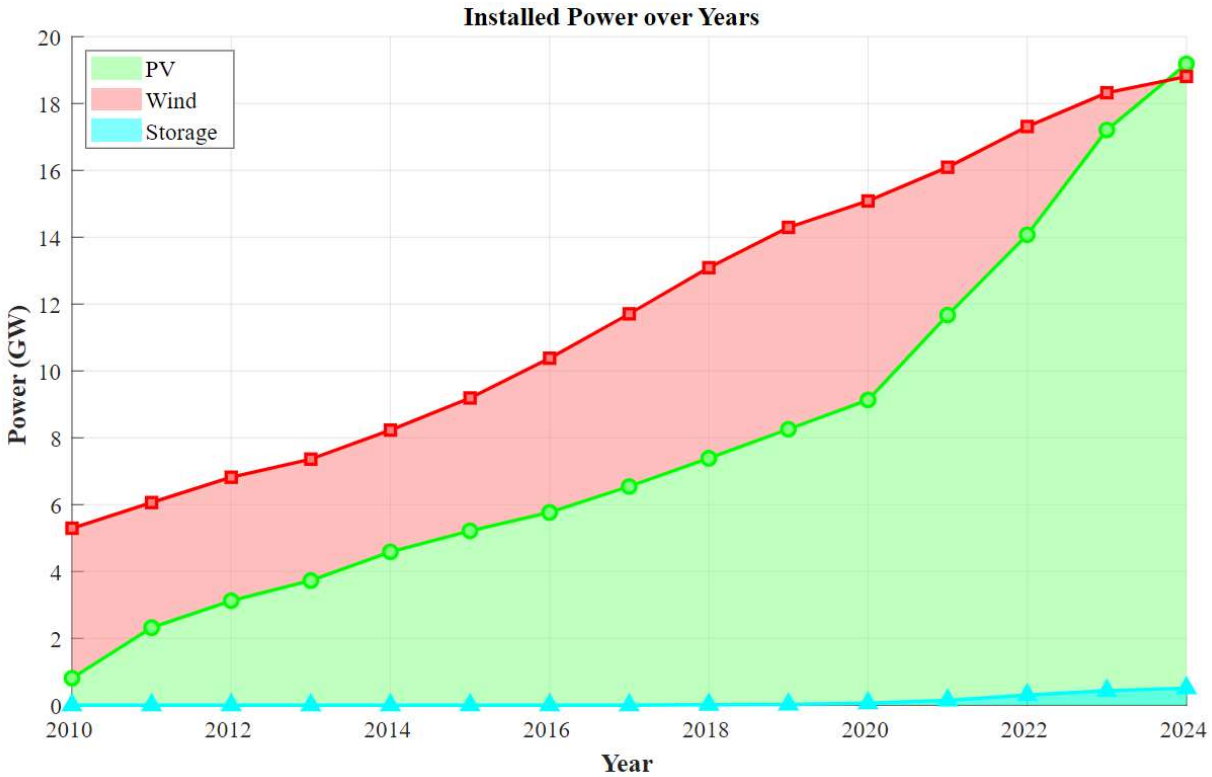
Contexte

- **Forte pénétration des énergies renouvelables connectées au réseau à travers des convertisseurs statiques (**38,5 GW au deuxième trimestre de 2024 sur le réseau d'Enedis**)**

- Comportement différent des convertisseurs statiques par rapport aux machines tournantes lors d'un défaut

- Contribution des convertisseurs au courant de court-circuit dépendent fortement de leur commande

- Risque d'aveuglement des protections si cet aspect n'est pas pris en compte, en particulier dans la modélisation de ces ouvrages dans Erable (Outils de planification d'Enedis)



Source : Open-data Enedis

Contexte

Plan de protection en présence de producteurs de type machine tournante

❑ Type de protections :

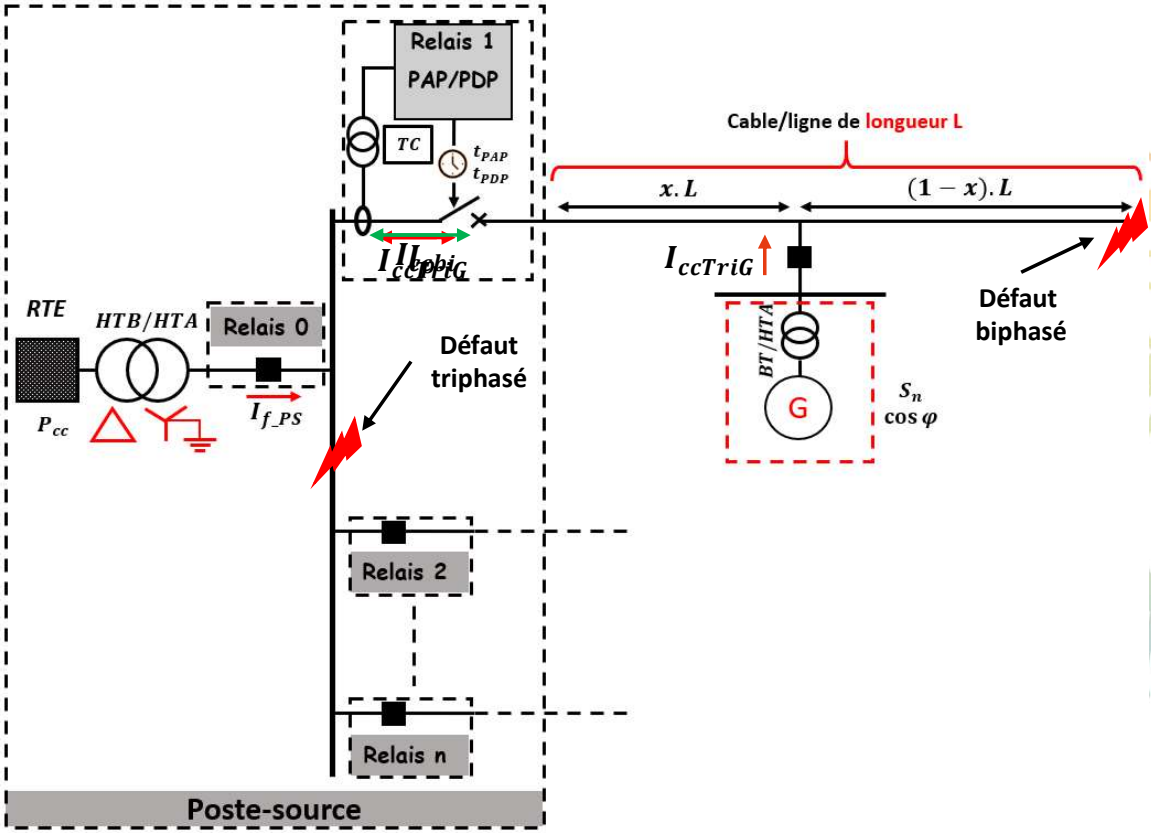
- Protection Ampèremétrique de Phase (PAP)
- Protection Directionnelle de Phase (PDP)

❑ Choix et réglage de ces protections :

I_{ccTriG} :
Courant de court−circuit maximal au niveau de la protection de départ lors d'un défaut triphasé situé immédiatement en amont de la protection de départ.

I_{ccbi} :
Courant de court−circuit minimal au niveau de la protection de départ lors d'un défaut biphasé franc sur le départ en présence de producteurs.

I_p :
Courant de transit maximal en régime permanent au niveau de la protection en absorption ou en refoulement de puissance.



Contexte

Le Iccbi, calculé selon la norme CEI 60909, est le même en présence ou en l'absence de producteurs, car leur contribution n'est pas prise en compte !!

Plan de protection en présence de producteurs de type machine tournante

❑ **Choix et réglage de ces protections :**

Si : $\mathbf{0,8 \times I_{ccbi} > 1,2 \times I_{ccTriG}}$

- Une PAP (protection ampèremétrique de phase)

$$\max(1{,}3 \times I_p;\ 1{,}2 \times I_{ccTriG}) \leq I_{PAP} \leq 0{,}8 \times I_{ccbi}$$

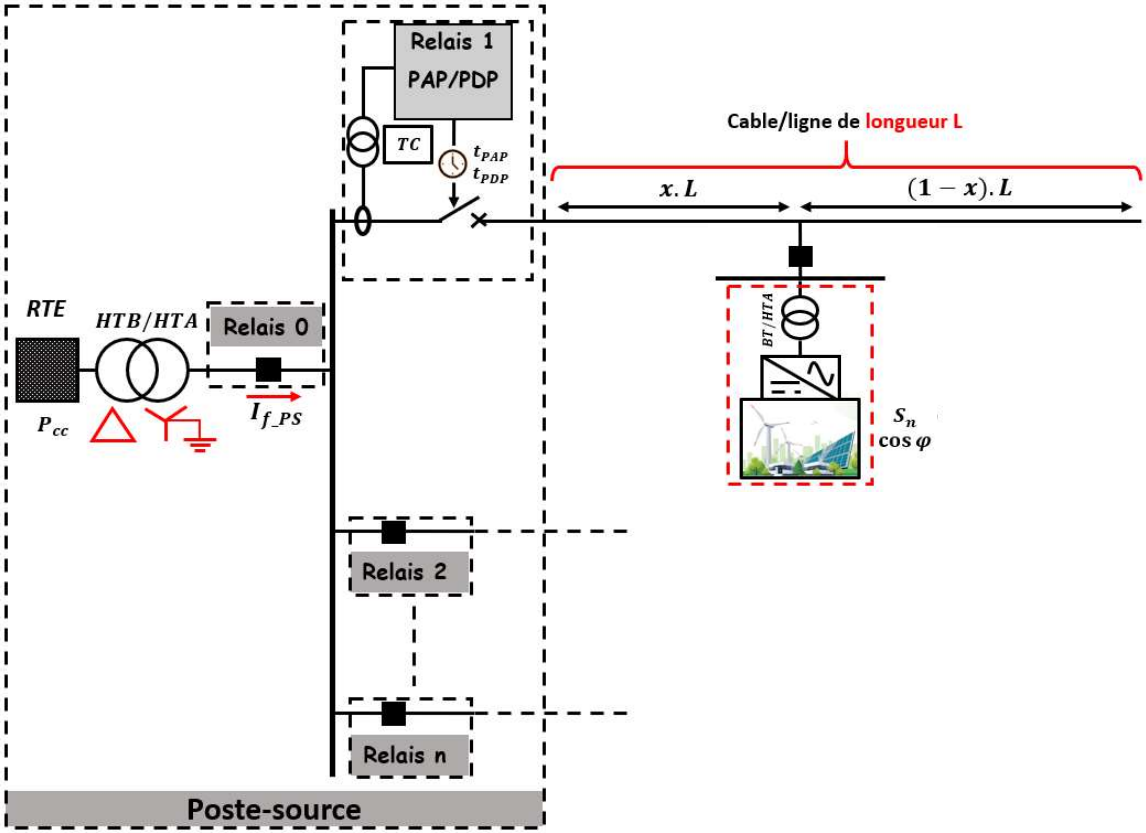
Si : $\mathbf{0,8 \times I_{ccbi} \leq 1,2 \times I_{ccTriG}}$

- Une PDP (Protection Directionnelle de Phase) :

$$1{,}3 \times I_p \leq I_{PDP} \leq 0{,}8 \times I_{ccbi}$$

- Une PAP : (protection de secours)

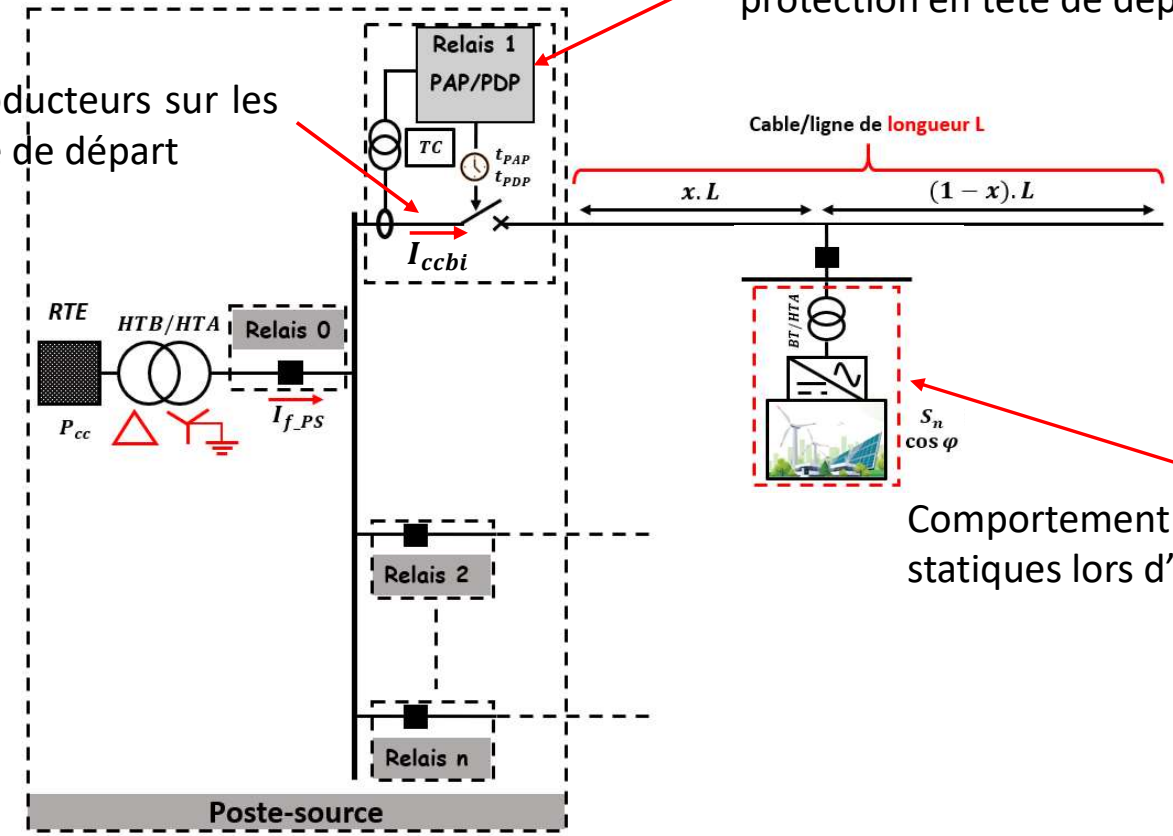
$$1{,}2 \times I_{ccTriG} \leq I_{PAP}$$



Objectifs

Conclusion sur les réglages de la protection en tête de départ

Impacts des producteurs sur les courants en tête de départ



Comportement réel des convertisseurs statiques lors d'un défaut

Pilotage des onduleurs lors d'un défaut

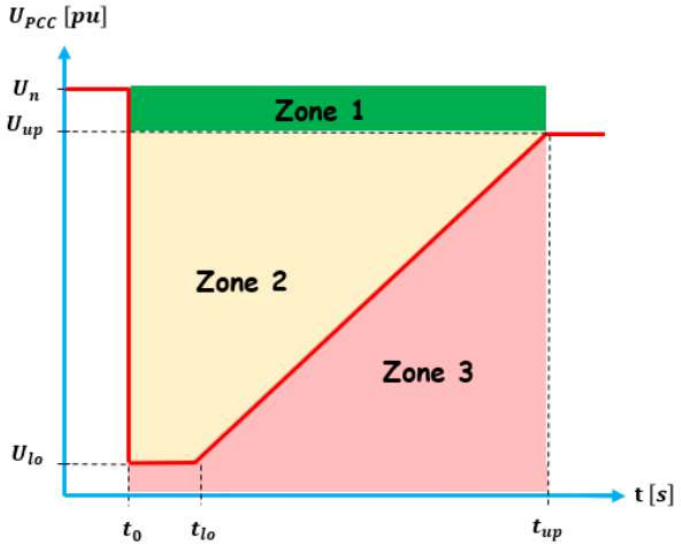
1. Exigences des gestionnaires de réseaux

Pour l'efficacité et la stabilité des réseaux, les gestionnaires de réseaux imposent quelques conditions pour accorder la connexion des EnR à leur réseau :

- Rester connecté au réseau pendant une courte période de court-circuit (Low Voltage Ride Through (LVRT)).
- Injecter du courant réactif pendant cette période pour soutenir le niveau de tension (Soutien dynamique de tension (DVS)).

i. Low Voltage Ride Through (LVRT)

Country	U_{lo} [pu]	U_{up} [pu]	t_{lo} [s]	t_{up} [s]
France	0.05	0.85	0.15	1.5
Germany	0	0.9	0.15	1.5
Denmark	0.2	0.9	0.5	1.5
China	0.2	0.9	0.15	2
South Africa	0	0.85	0.15	2

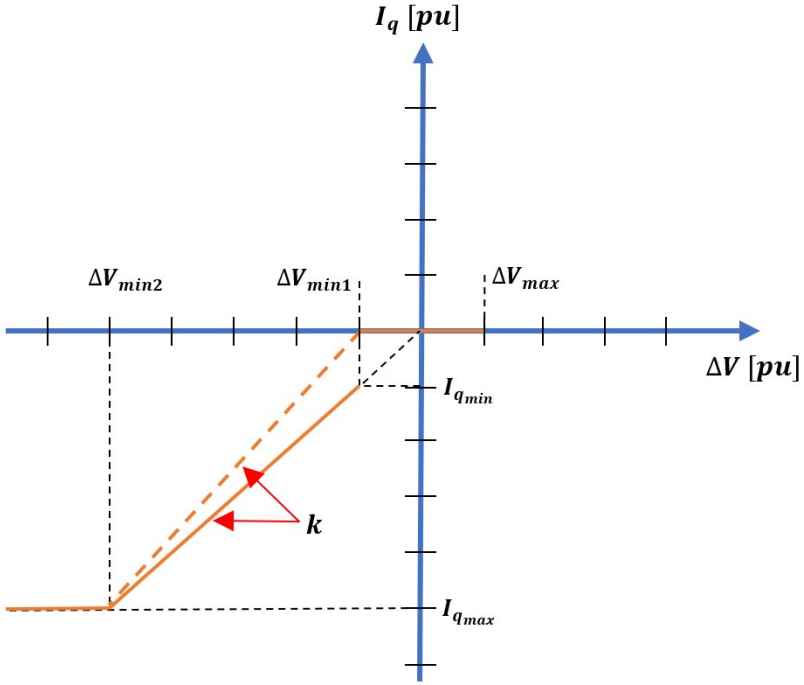


Pilotage des onduleurs lors d'un défaut

1. Exigences des gestionnaires de réseaux

ii. Soutien dynamique de tension (DVS)

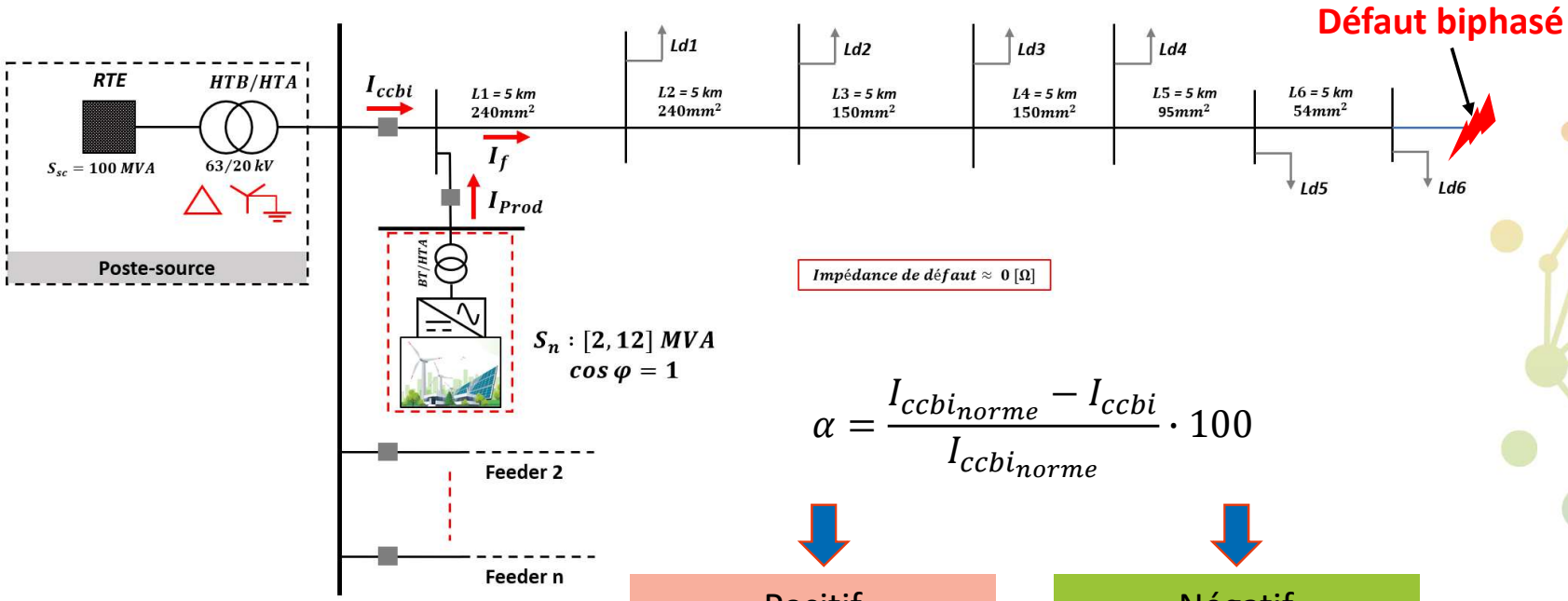
Country	ΔV_{min1} [pu]	Iq_{min} [pu]	ΔV_{min2} [pu]	Iq_{max} [pu]	ΔV_{max} [pu]	k
Germany	-0.1	-0.2	-0.5	-1	0.1	2
Denmark	-0.1	0	-0.5	-1	0.1	2.5
China	-0.1	0	-0.8	-1.05	0.1	1.57
South Africa	-0.1	0	-0.5	-1	0.1	2.5



- Le facteur k influence la quantité de courant réactif que l'on peut injecter. Pour les pays que nous avons étudiés, le k est compris entre 1,5 et 2,5.

Cas d'étude et résultats

2. Exemple d'un départ impédant et une $P_{cc} = 100\ MVA$



$$\alpha = \frac{I_{ccbi_{norme}} - I_{ccbi}}{I_{ccbi_{norme}}} \cdot 100$$

Positif
$\Rightarrow I_{ccbi_{norme}} > I_{ccbi}$

Négatif
$\Rightarrow I_{ccbi_{norme}} < I_{ccbi}$

Cas d'étude et résultats

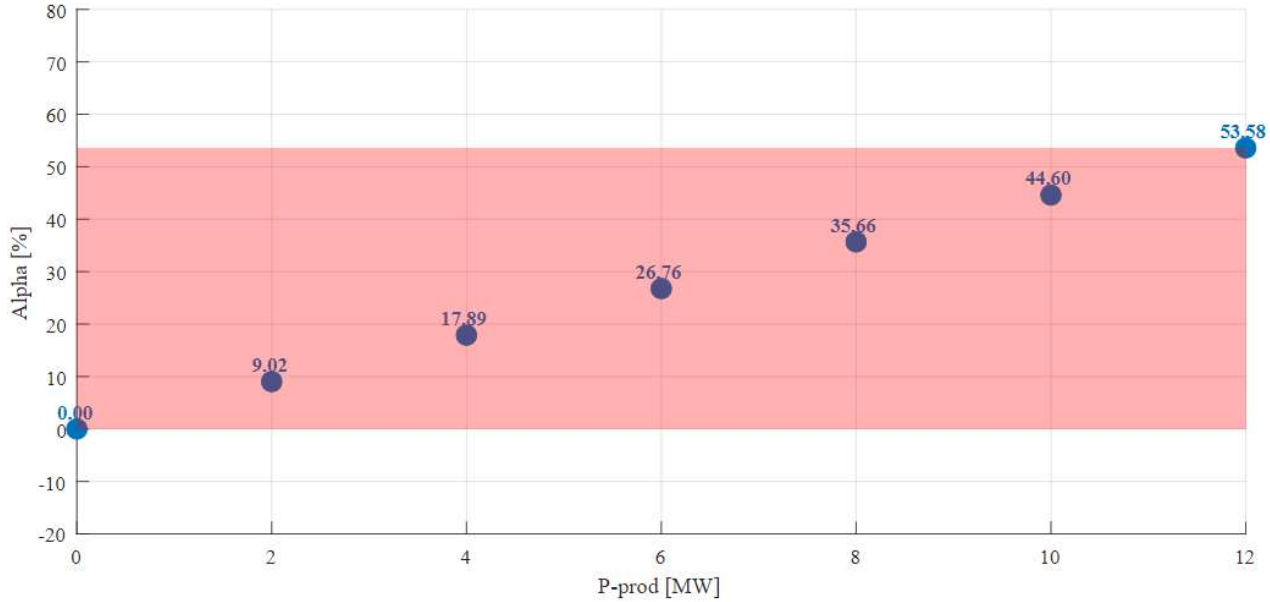
2. Exemple d'un départ impédant et une $P_{cc} = 100\ MVA$

i. Effet du producteur sur les courants de départ

$$\alpha = \frac{I_{ccbi_{norme}} - I_{ccbi}}{I_{ccbi_{norme}}} \cdot 100$$

Positif
$\Rightarrow I_{ccbi_{norme}} > I_{ccbi}$

Négatif
$\Rightarrow I_{ccbi_{norme}} < I_{ccbi}$



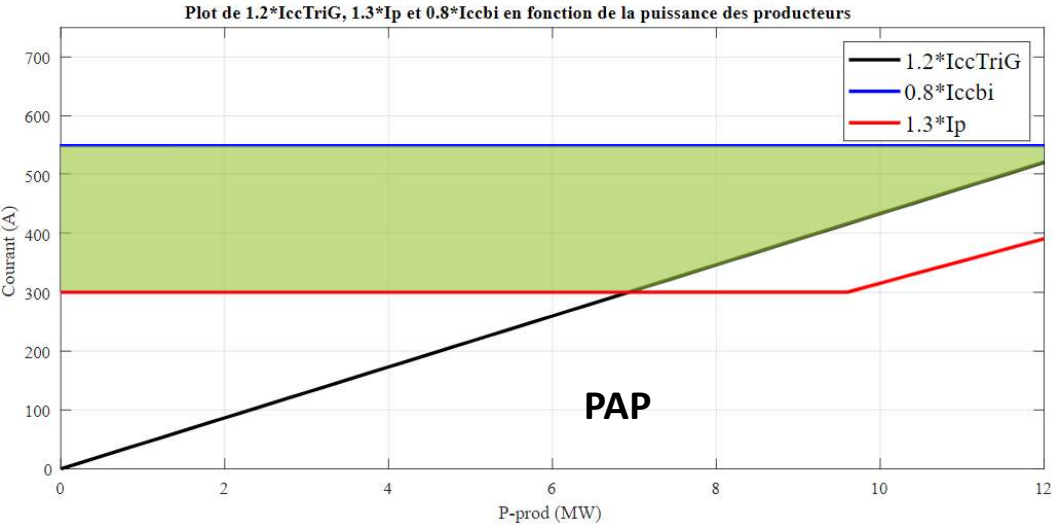
- Le facteur de masquage est positif, ce qui signifie que le producteur réduit la contribution du courant de défaut du poste-source, ce qui peut entraîner un aveuglement de la protection en tête de départ.
- Le facteur de masquage est proportionnelle à la puissance du producteur

Cas d'étude et résultats

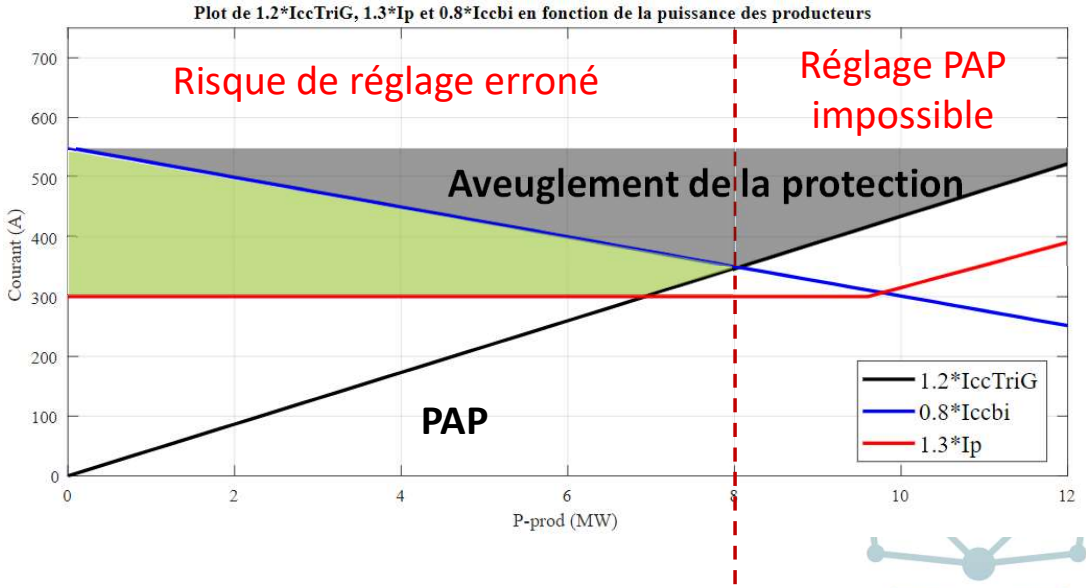
2. Exemple d'un départ impédant et une $P_{cc} = 100\ MVA$

ii. Effet du producteur sur la protection de tête de départ

Réglage des protections suivant les calculs de la norme CEI 60909



Producteurs contribuent au défaut



Plage de réglage de la PAP

Aveuglement de la protection

Solutions proposées

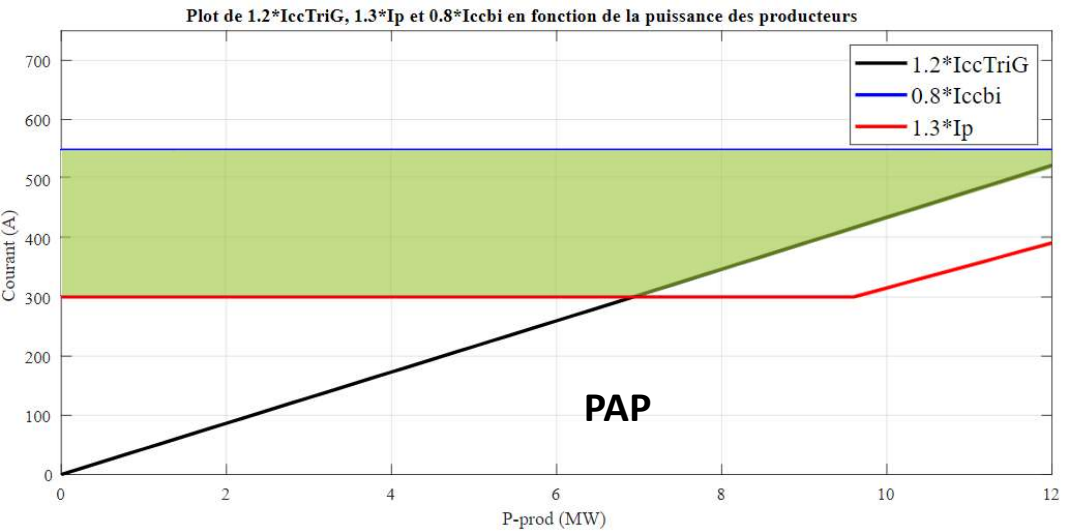
- ❑ Limitation de la puissance des producteurs que l'on peut raccorder sur un départ
- ❑ Changement de l’algorithme de détection de défaut polyphasés
- ❑ Utilisation d’une protection fondée sur la séquence négative du courant de défaut

Solutions proposées

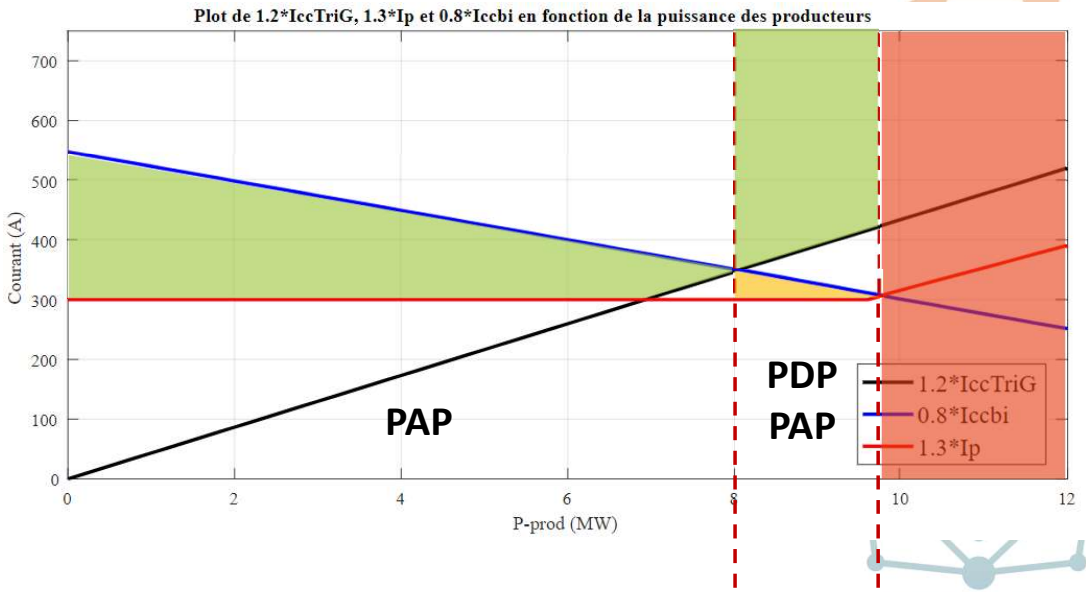
1. **Limitation de la puissance des producteurs que l'on peut raccorder sur un départ**

i. Cas d'un départ impédant et une $P_{cc} = 100\ MVA$

Réglage des protections suivant les calculs de la norme CEI 60909



Producteurs contribuent au défaut



Plage de réglage de la PAP

Plage de réglage de la PDP

Raccordement inacceptable

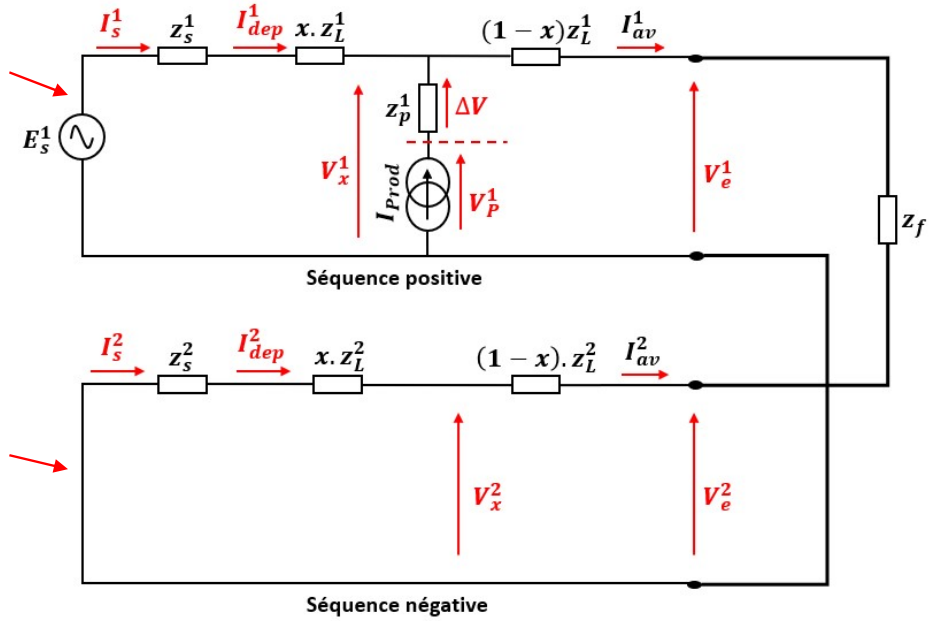
Solutions proposées

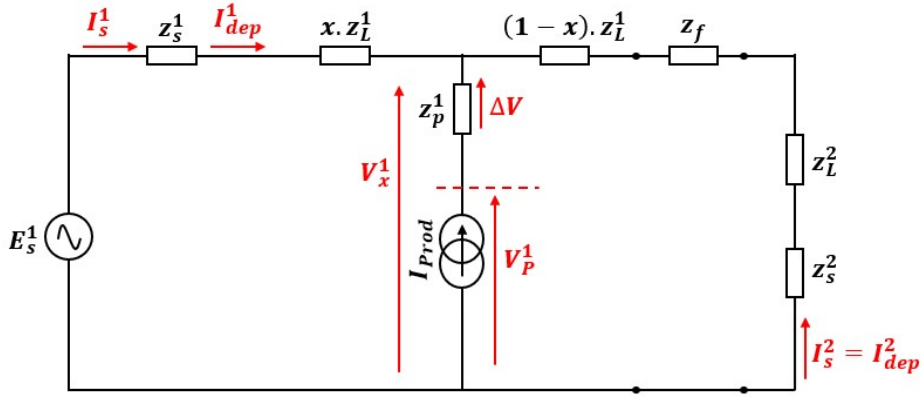
2. Protection fondée sur la séquence négative du courant de défaut

i. Modélisation du cas d'étude

Séquence positive

Séquence négative

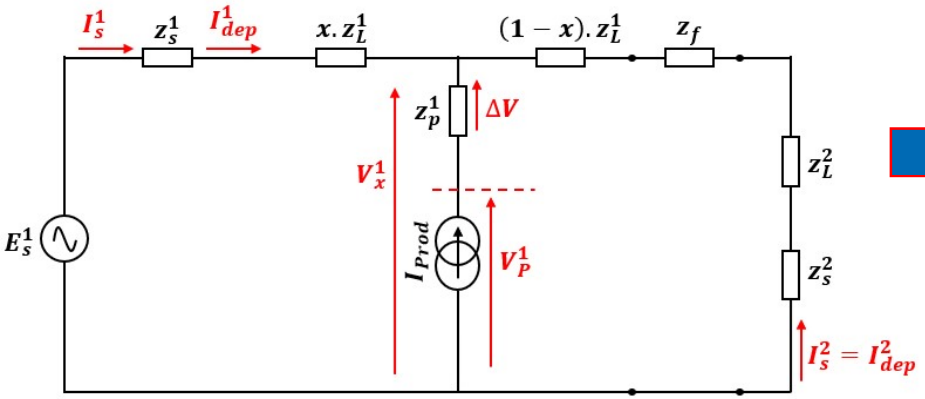




Solutions proposées

2. Protection fondée sur la séquence négative du courant de défaut

i. Modélisation du cas d'étude



$$\left|I_{dep}^2(x\,,I_{Prod})\right| = \left|\frac{E_s^1}{2\cdot z_L^1 + 2\cdot z_s^1} + \frac{E_s^1}{E_s^1}\cdot\frac{z_s^1 + x\cdot z_L^1}{2\cdot z_L^1 + 2\cdot z_s^1}\cdot I_{Prod}\right|$$

$$\Rightarrow \left|I_{dep}^2(x\,,I_{Prod})\right| = \left|I_{dep_{sans_{prod}}}^2\right|\cdot\left|1 + (z_s^1 + x\cdot z_L^1)\cdot\frac{I_{Prod}}{E_s^1}\right|$$

En général : $z_L^1 = z_L^2$, $z_s^1 = z_s^2$

Pour des P_{cc} importante, $z_s^1 = z_s^2 \approx 0$ $\quad\Rightarrow \left|I_{dep}^2(x\,,I_{Prod})\right| = \left|I_{dep_{sans_{prod}}}^2\right|\cdot\left|1 + x\cdot z_L^1\cdot\frac{I_{Prod}}{E_s^1}\right|$

$$\left|I_{dep}^2(x\,,I_{Prod})\right| = \begin{cases} \left|I_{dep_{sansProd}}^2\right| & x = 0 \\ \left|I_{dep_{sans_{prod}}}^2\left(1 + x\cdot z_L^1\cdot\frac{I_{Prod}}{E_s^1}\right)\right| & 0 < x < 1 \\ \left|I_{dep_{sans_{prod}}}^2\left(1 + z_L^1\cdot\frac{I_{Prod}}{E_s^1}\right)\right| & x = 1 \end{cases}$$

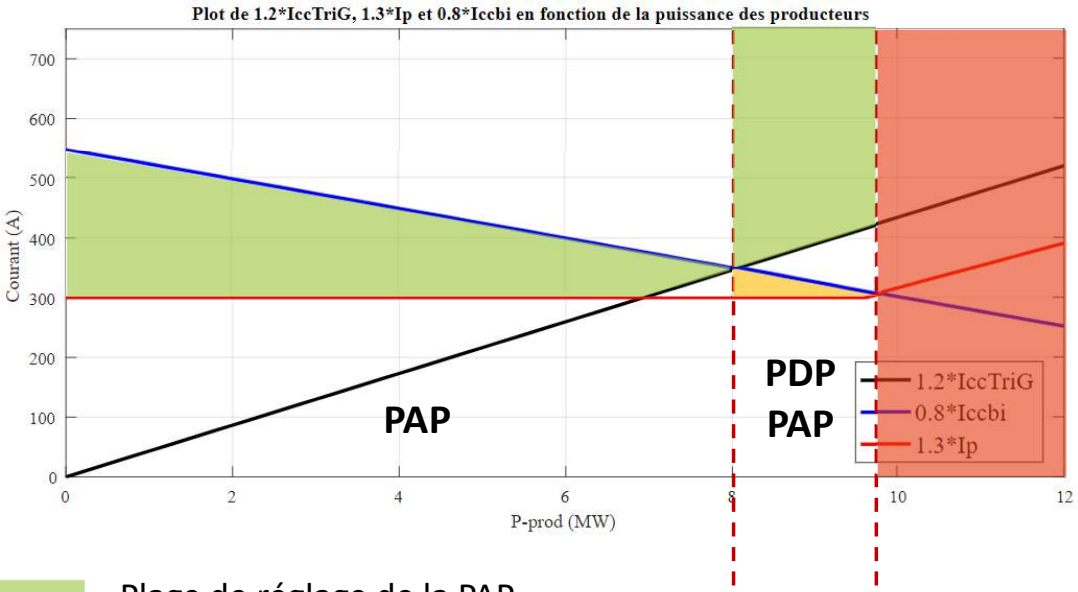
- Pour une forte P_{cc} et à une distance de 0 du poste-source, le courant inverse de tête de départ ne change pas.
- Lorsque l'on s'éloigne du poste-source, le courant inverse de tête de départ augmente en fonction de la puissance installée du producteur.

Solutions proposées

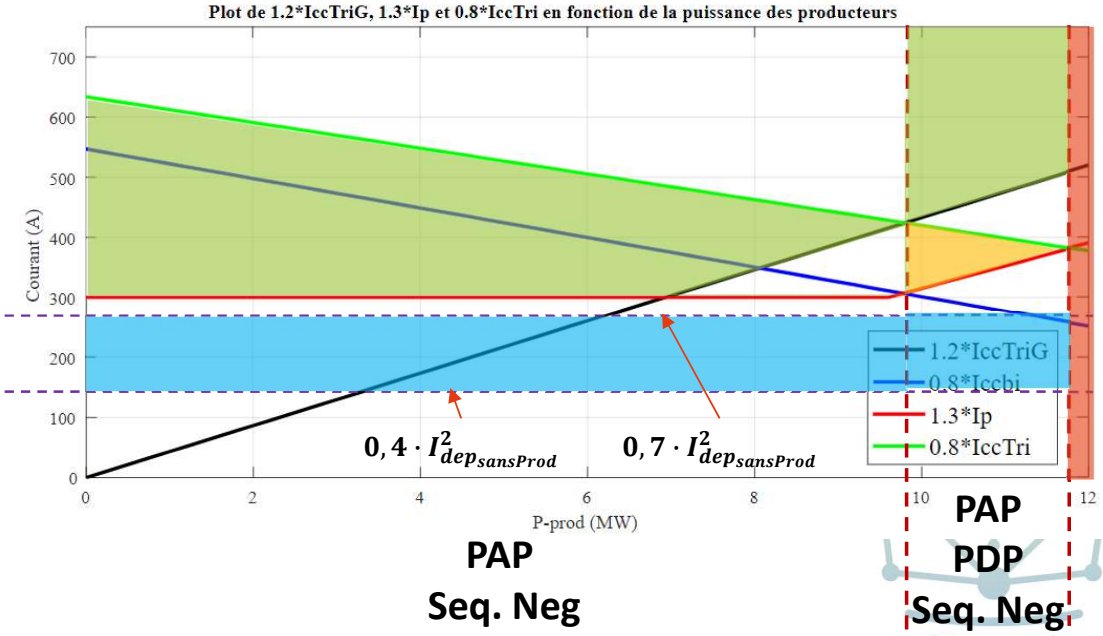
2. Protection fondée sur la séquence négative du courant de défaut

ii. Cas d'un départ impédant et une $P_{cc} = 100\ MVA$

Limitation de la puissance de producteur



Avec l'intégration d'une protection à séquence négative



Plage de réglage de la PAP

Plage de réglage de la PDP

Plage de réglage de la protection à séquence négative

Raccordement inacceptable

Conclusions et Perspectives

Conclusions :

- La norme de calcul du courant de court-circuit (CEI 60909) ne prend pas en compte la contribution des producteurs avec l'interface d'EP!
- La présence de ces producteurs sur un réseau réduit la contribution du poste-source aux défauts, ce qui entraîne un aveuglement potentiel des protections.
- Il est très important de prendre en compte les producteurs lors du calcul des courants de défaut pour établir le plan de protection
- Nous avons proposé des solutions pour améliorer le plan de protection et éviter l'aveuglement potentiel des protections

Perspectives :

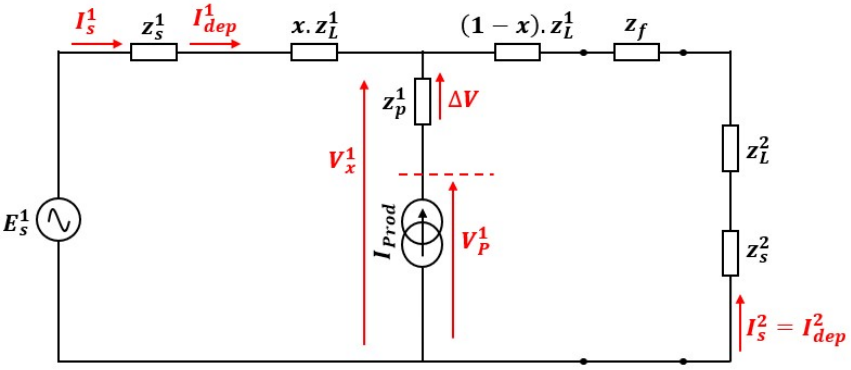
- Étude et évaluation du comportement des protections homopolaires lors d'un défaut monophasé en présence de producteurs
- Reprendre les mêmes études pour le cas d'un micro-réseau, si le temps le permet

Merci de votre attention !

Lainser SKALB

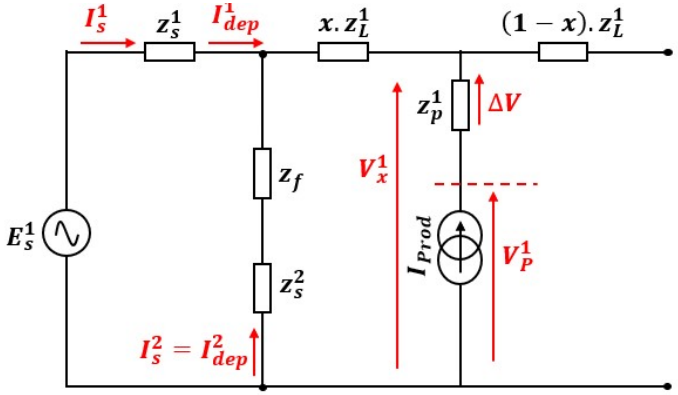
lainser.sklab@g2elab.grenoble-inp.fr

Défaut biphasé en tête de départ



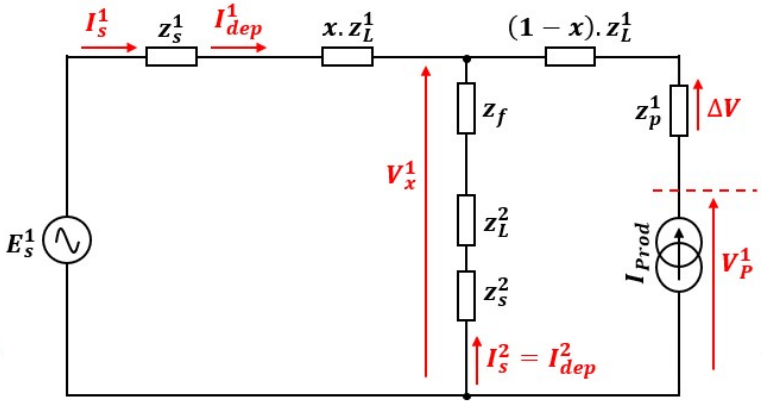
$$\left|I_{dep}^2(x\,,I_{Prod})\right| = \left|I_{dep_{sans_{prod}}}^2\right| \cdot \left|1 + (z_s^1 + x \cdot z_L^1) \cdot \frac{I_{Prod}}{E_s^1}\right|$$

Défaut biphasé en tête de départ



$$\left|I_{dep}^2(x\,,I_{Prod})\right| = \left|I_{dep_{sans_{prod}}}^2\right| \cdot \left|1 + z_s^1 \cdot \frac{I_{Prod}}{E_s^1}\right|$$

Défaut biphasé entre 0 et L (prod à L km)



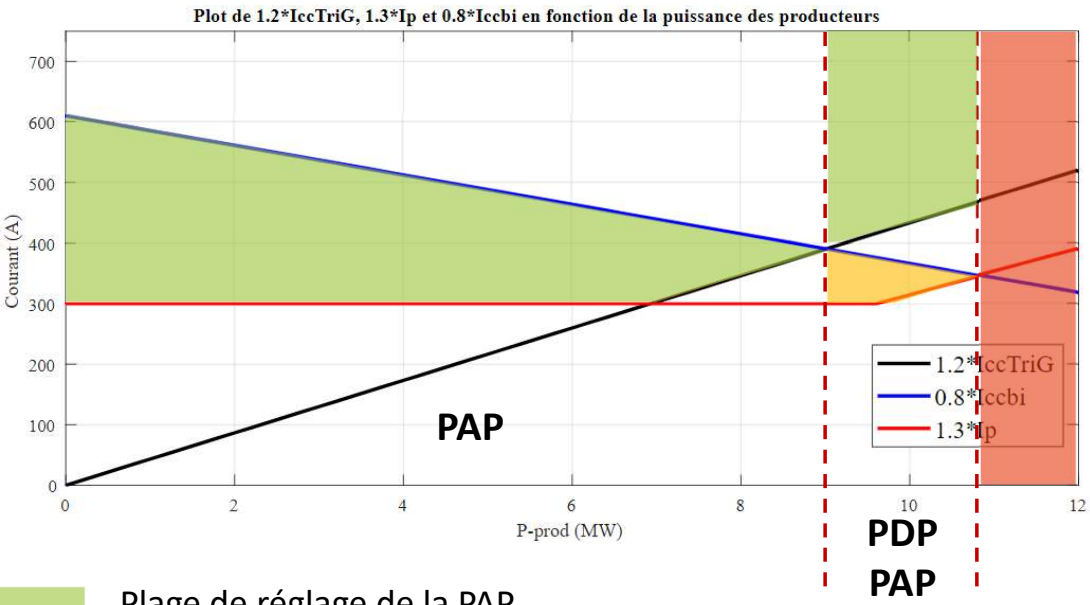
$$\left|I_{dep}^2(x\,,I_{Prod})\right| = \left|I_{dep_{sans_{prod}}}^2\right| \cdot \left|1 + (z_s^1 + x \cdot z_L^1) \cdot \frac{I_{Prod}}{E_s^1}\right|$$

Solutions proposées

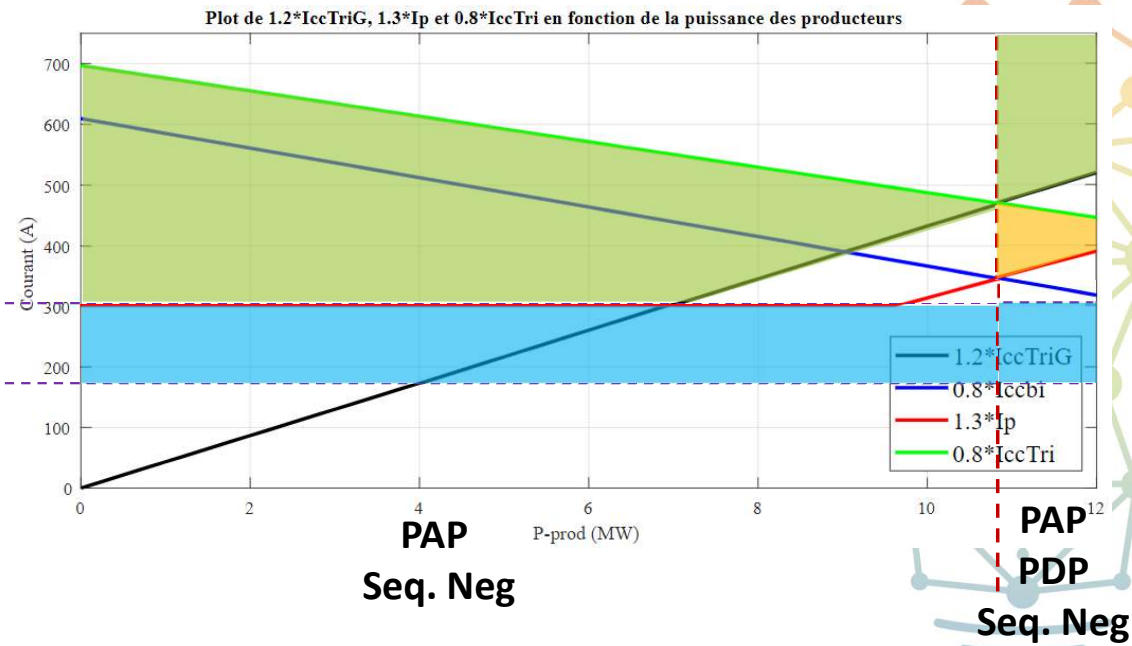
2. Protection fondée sur la séquence négative du courant de défaut

ii. Cas d'un départ impédant et une $P_{cc} = 200\ MVA$

Limitation de la puissance de producteur



Avec l'intégration d'une protection à séquence négative



Plage de réglage de la PAP

Plage de réglage de la PDP

Plage de réglage de la protection à séquence négative

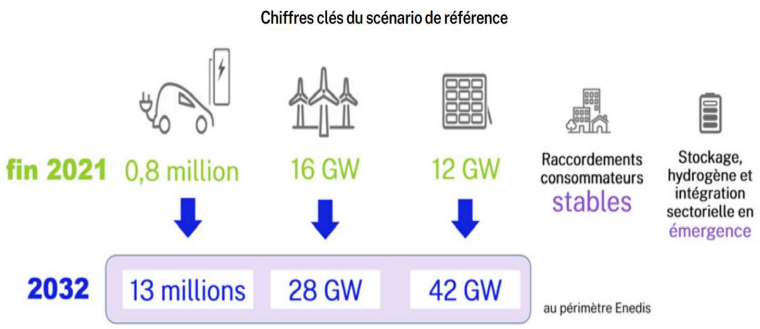
Raccordement inacceptable

Protection des Réseaux Hybrides AC/DC

Mohammed KHARRICH

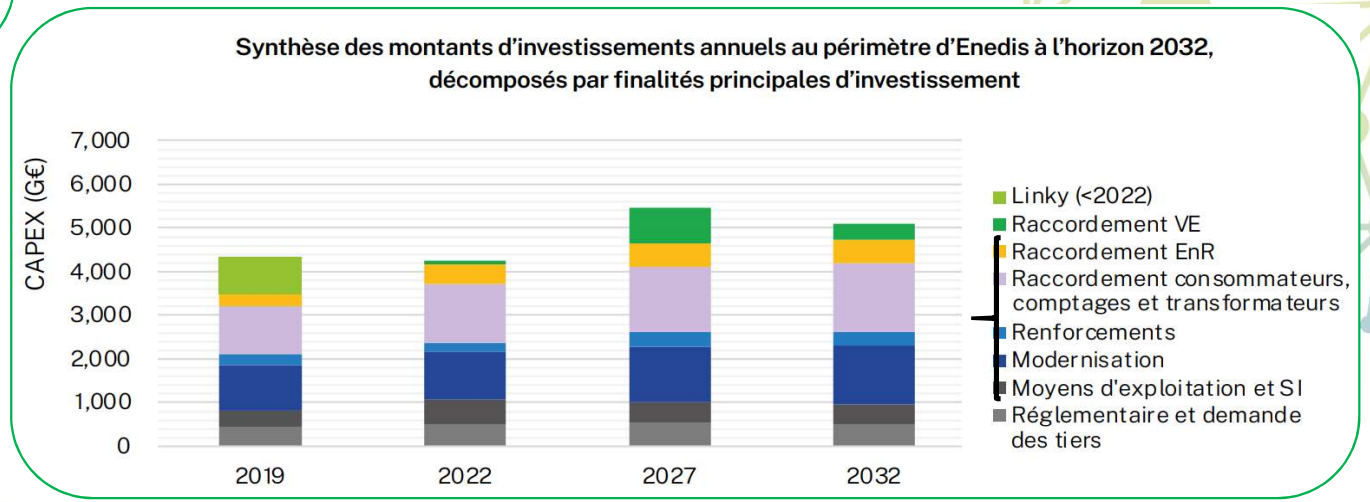
Encadrants G2Elab : Bertrand RAISON
Encadrants Enedis : Maria-Victoria ZAMUNER, Jean POMPÉE, Kamel SAHNOUNI

Introduction



- Développement des sources décentralisées renouvelables et véhicules électrique en DC → regain pour les réseaux AC/DC
- Etude prospective → Quels sont les impacts du développement des réseaux AC/DC sur sur le plan de protection?

Travaux antérieurs : structures de réseaux avec SOP (Soft Open Point) et AC/DC → pourraient reporter les renforcements nécessaires



Objectifs

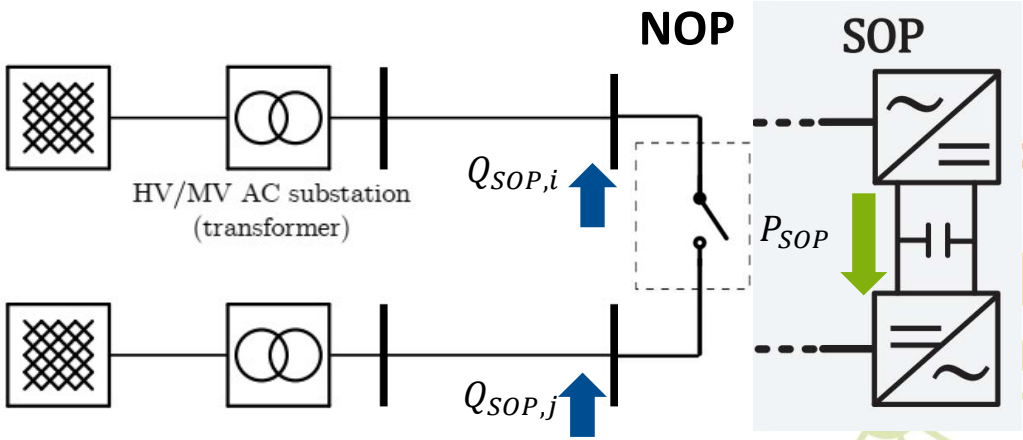
1- Comment le Soft Open Point (SOP) peut-il contribuer à la réduction des coûts d'investissement dans les infrastructures de réseaux de distribution ?

2- Quels sont les avantages économiques d'un réseau hybride AC/DC par rapport à un réseau AC classique ?

3- Est-ce que les systèmes de protection sont adaptés pour assurer la stabilité et la sécurité des réseaux hybrides AC/DC avec SOP face aux défis spécifiques tels que les courts-circuits ?

Planification des Réseaux Hybrides AC/DC

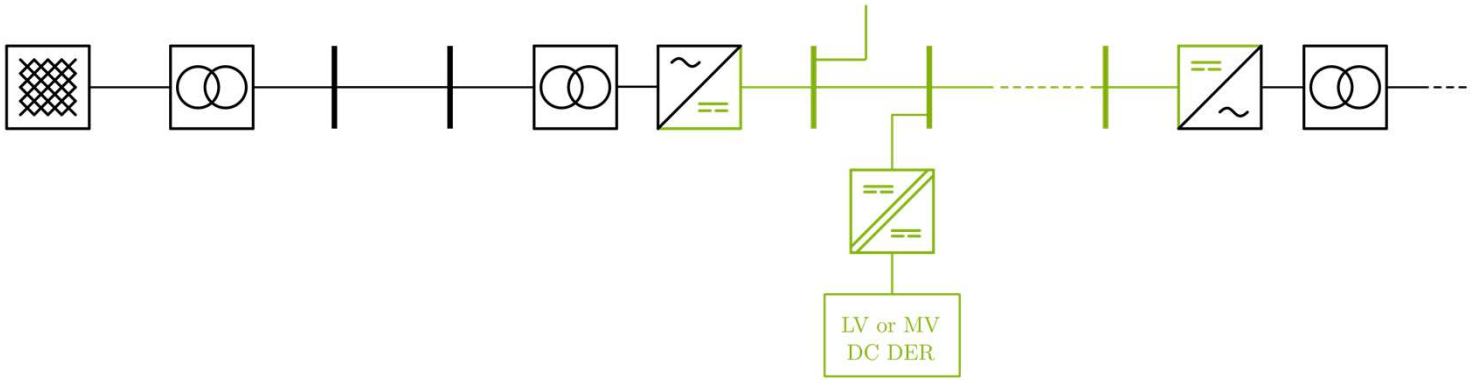
- **État de l'art**
- **Qu'est-ce qu'un Soft Open Point?**
  - Remplace un interrupteur commandable (OMT).
  - Peut être modélisé comme un back to back.
  - Appelé aussi Flexible Power Link (FPL).
  - Flexibilité opérationnelle:
    - Gestion active du flux de puissance.
    - Support de puissance réactive.



- **Objectif**
- **SOP pour reporter le renforcement:**
  - Amélioration de la flexibilité.
  - Augmentation de la fiabilité.
  - Optimisation de l'efficacité du réseau.

Planification des Réseaux Hybrides AC/DC

- **Motivations pour les systèmes hybrides AC/DC**



Flexibilité et Contrôlabilité

- Réseau de distribution MV maillé et gestion du flux de puissance active.

Mutualisation

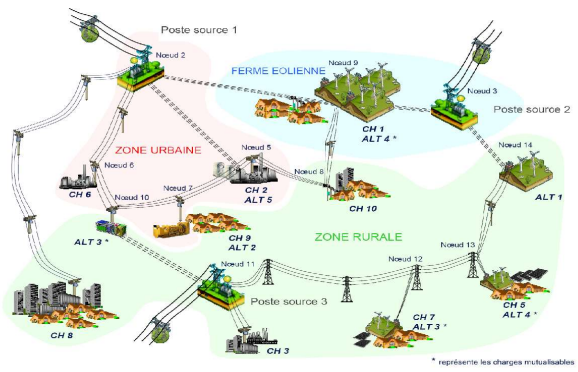
- Réduction des transformateurs à basse fréquence.

Efficacité

- Réduction des pertes de conversion
- Réduction des pertes sur lignes en fonctionnant à des tensions plus élevées

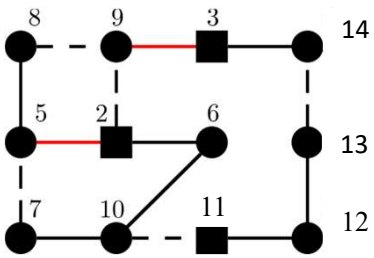
Planification des Réseaux Hybrides AC/DC

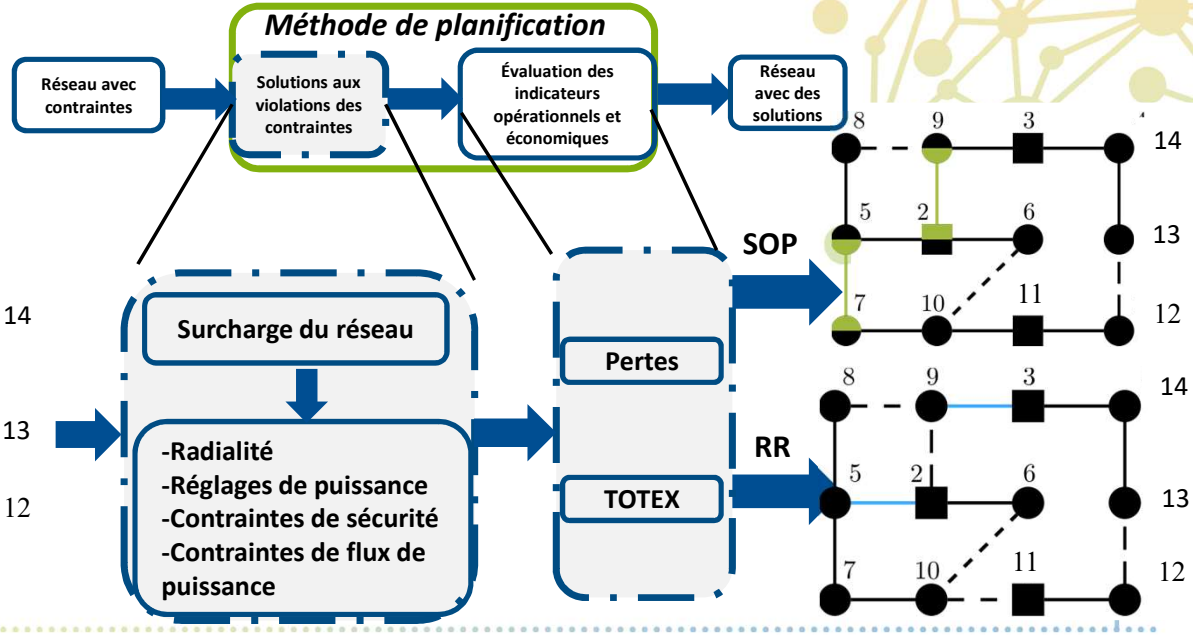
- **Test avec le réseau de distribution RD-PREDIS**
  - Le réseau de distribution simule un réseau HTA français avec une puissance de 30 MVA et une tension de 20 kV.
  - La planification du réseau pour déterminer la taille et l'emplacement des SOP.
  - Comparer le réseau de distribution de solution SOP avec le réseau renforcé (RR).



Vue d'ensemble de RD-PREDIS en représentation maillée

Réseau avec contraintes





Planification des Réseaux Hybrides AC/DC

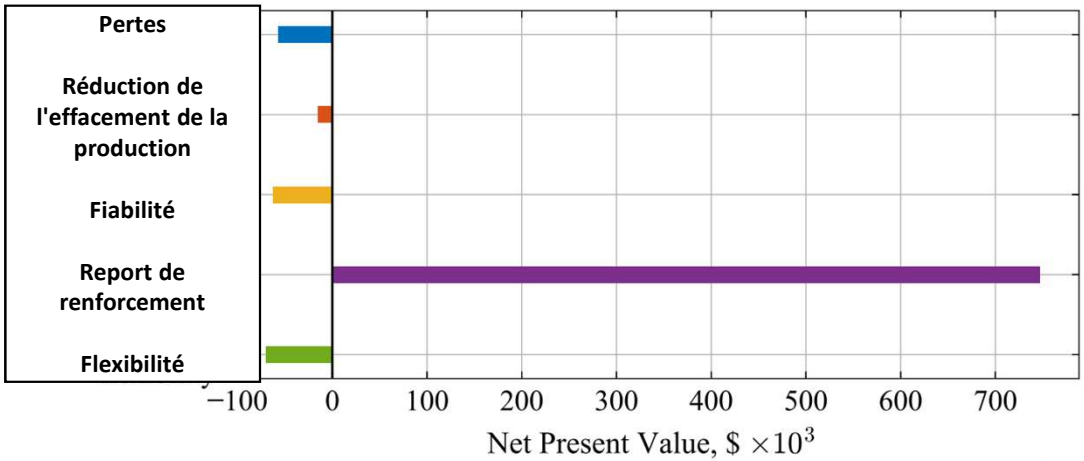
- **Report du renforcement**

	Location	Size	Capital Cost (M$)	Present Capital Cost with reinforcement deferral (M$)
Reinforcement	2-5	8km - 2×Al240mm^2	1.180	1.180
	3-9	1km - 2×Al240mm^2		
SOP	2-9	2.3MVA	0.360	0.970 → -18%
	5-7	700kVA		

$$\mathrm{NPV}^{\Omega} = \sum_{t=0}^{N_t-1} \frac{1}{(1+r)^t} \left(B^{\Omega}(t) - C^{\Omega}(t)\right)$$

Bénéfice du projet **Coûts du projet**

- L'application des SOPs peut significativement améliorer le TOTEX des réseaux de distribution.
- L'utilisation des SOP pour les autres scénarios est techniquement faisable, mais seule le 'Report de renforcement' semble être viable.



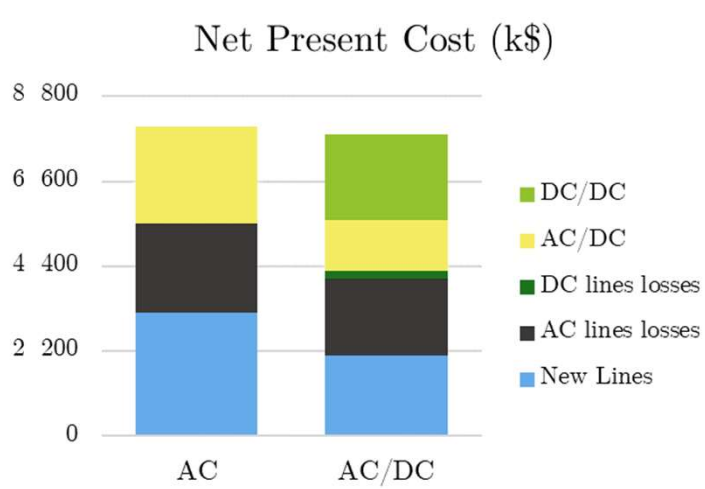
Deakin, M., Sarantakos, I., Greenwood, D., Bialek, J., Taylor, P. C., & Walker, S. (2023). Comparative analysis of services from soft open points using cost–benefit analysis. Applied Energy, 333, 120618.

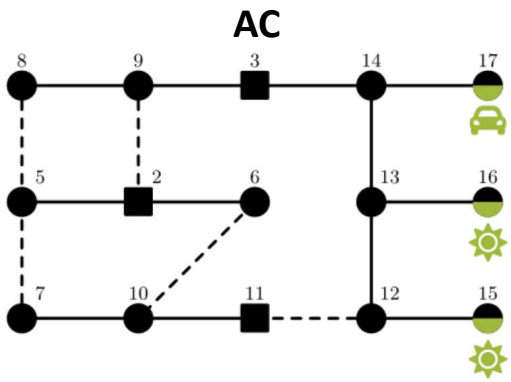
Planification des Réseaux Hybrides AC/DC

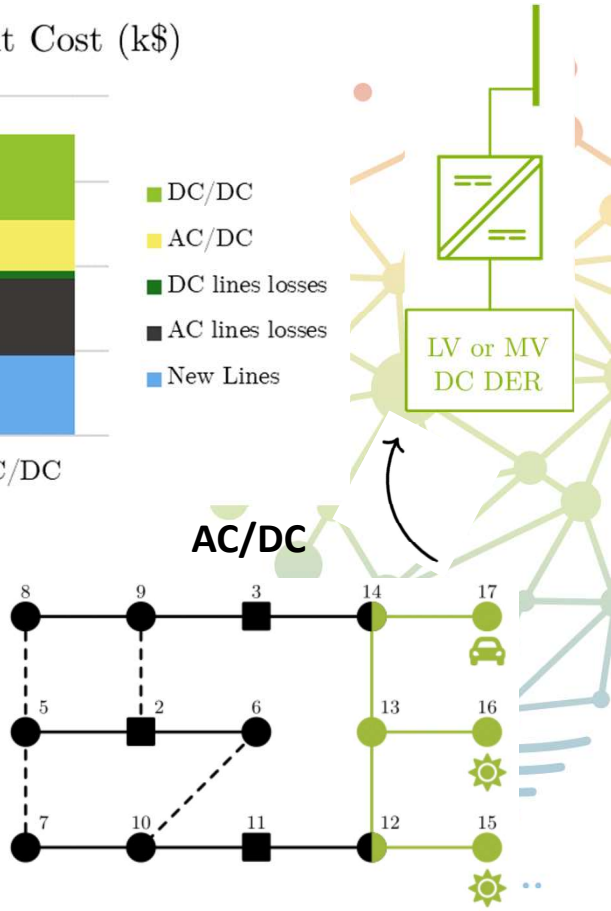
- **Comparaison des réseaux hybrides AC/DC et des réseaux AC**

- **Avantages AC/DC**
  - Coûts des lignes réduits.
  - Maillage du réseau.
  - Réduction des stations de conversion AC/DC.
  - Moins de pertes dans les échanges DC.

- **Inconvénients AC/DC**
  - Coûts des convertisseurs DC/DC.

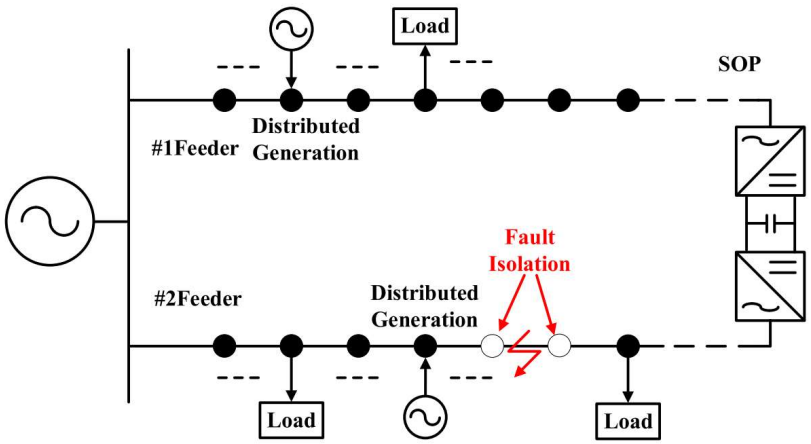


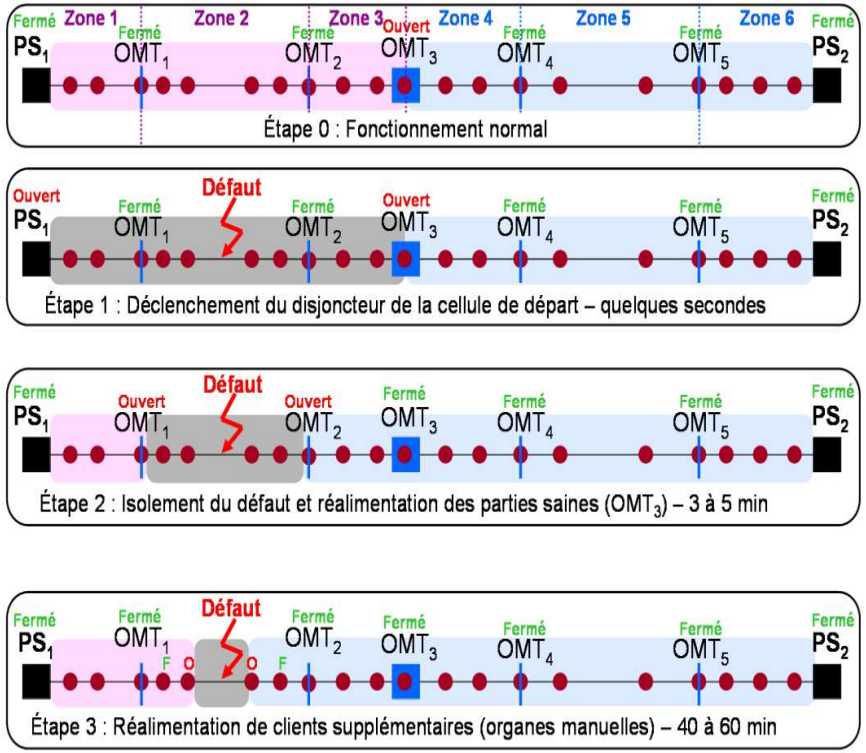




Protection des Réseaux Hybrides AC/DC

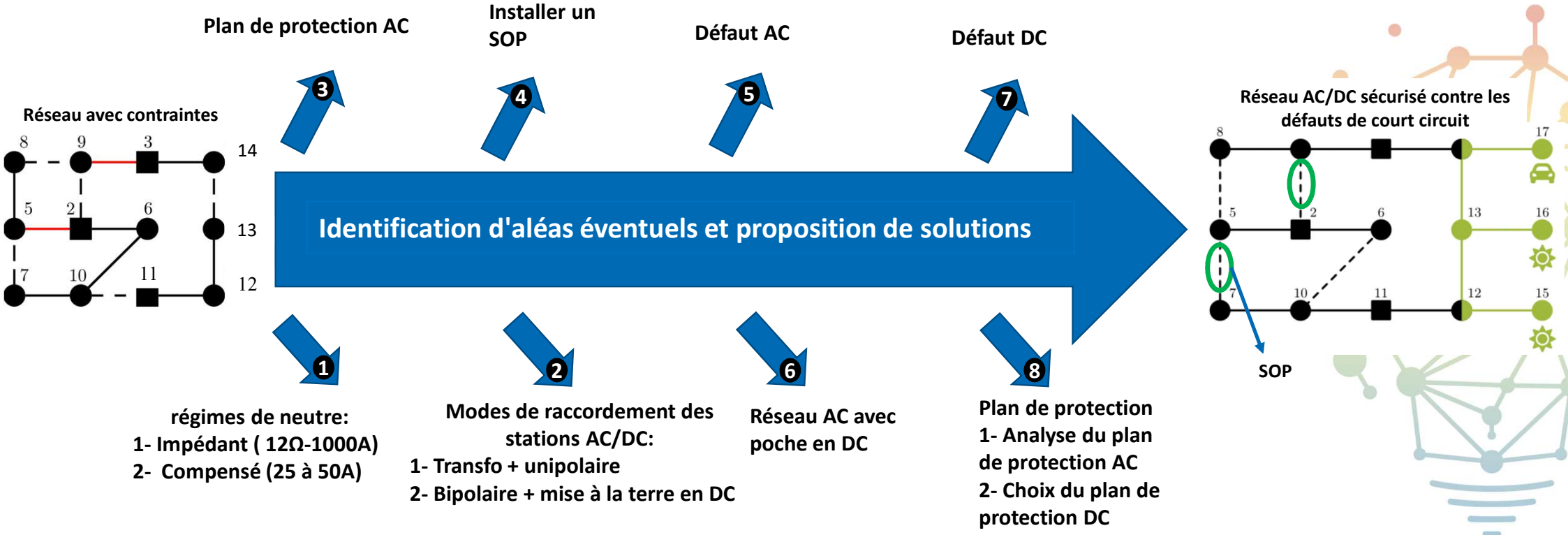
- **Pourquoi considérer la protection ?**
  - La réalimentation prend entre 40 et 60 minutes dans des conditions normales.
  - Les SOP permettent un processus de réalimentation plus rapide après une panne.





Protection des Réseaux Hybrides AC/DC

- **RÉSUMÉ DU TRAVAIL EN COURS**



Merci de votre attention !

Mohammed KHARRICH

mohammed.kharrich@g2elab.grenoble-inp.fr

Introduction à l'Intelligence Artificielle et intérêt pour la distribution

Romain Rombourg

Collaboration G2Elab : Vincent DEBUSSCHERE

Collaborations Enedis : Anne DE MOLINER, Pierre CAUCHOIS, Quentin FRESNEL

IA : Un domaine large, en expansion

Cas d'usage	Technique d'IA	Méthodes	Données
Prévision de charge	Apprentissage supervisé / IA générative	Conditional VAE, Score matching, ...	CdC à la maille voulue
Détection de pertes non techniques	Apprentissage supervisé / fédéré	Heterogeneous FL	Historiques de consommation avec pertes non techniques
Contrôle d'électronique de puissance	Apprentissage supervisé / par renforcement	Meta-learning, Mixture d'experts	Configurations de réseaux électriques
Planification des réseaux	Planification Automatique	Domain modeling	N/A
Interaction clients	Modèles conversationnels	GPT-4 + fine-tuning + model pruning	Interactions clients
Génération de CdC	IA générative	Modèles de diffusion, Score-matching	CdC à la maille voulue
...	...	...	...

CdC : courbe de charge

IA pour la distribution : besoin d'une vision à contre-courant

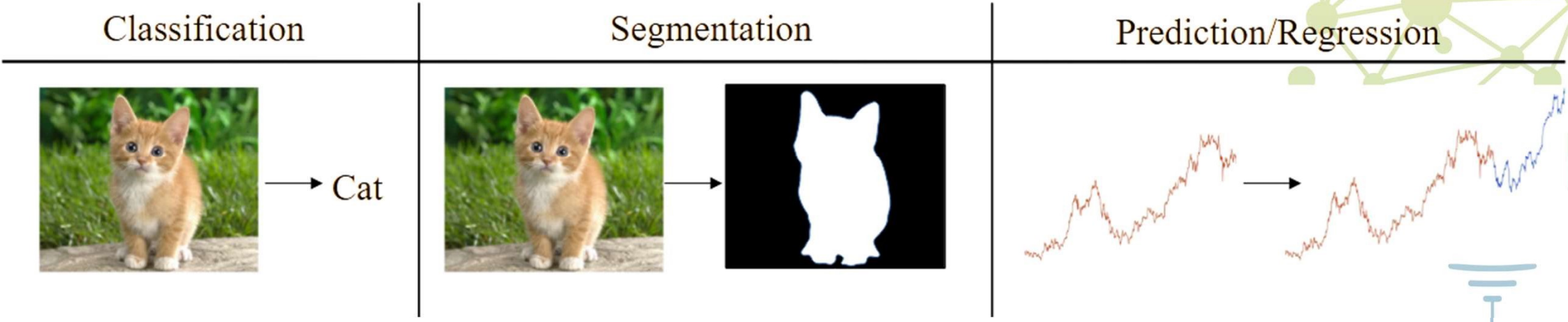
- **Modèles IA généraux monstrueux entraînés sur des To de données**
  - ChatGPT coûte en 100 000 et 700 000 dollars par jour principalement en électricité (+12 Millions de dollars à l'entraînement)
  - Nous dirige vers un monopole malsain économiquement et écologiquement

- **Besoin d'une IA frugale, spécialisée, décentralisée et rapidement déployable**
  - IA frugale
    - Model pruning
    - Small world nets
  - IA hybride
    - Couplage des modèles physiques et des modèles IA

- **Besoin d'une collaboration forte des experts métier et des experts IA**

Principe des Réseaux de neurones (ANN)

- La tâche est vue comme une fonction
  - Une machine qui associe une "réponse" à une "question"
- Le modèle cherche à approximer au mieux la fonction de tâche
- On fournit un ensemble d'exemples d'entrées/sorties attendues

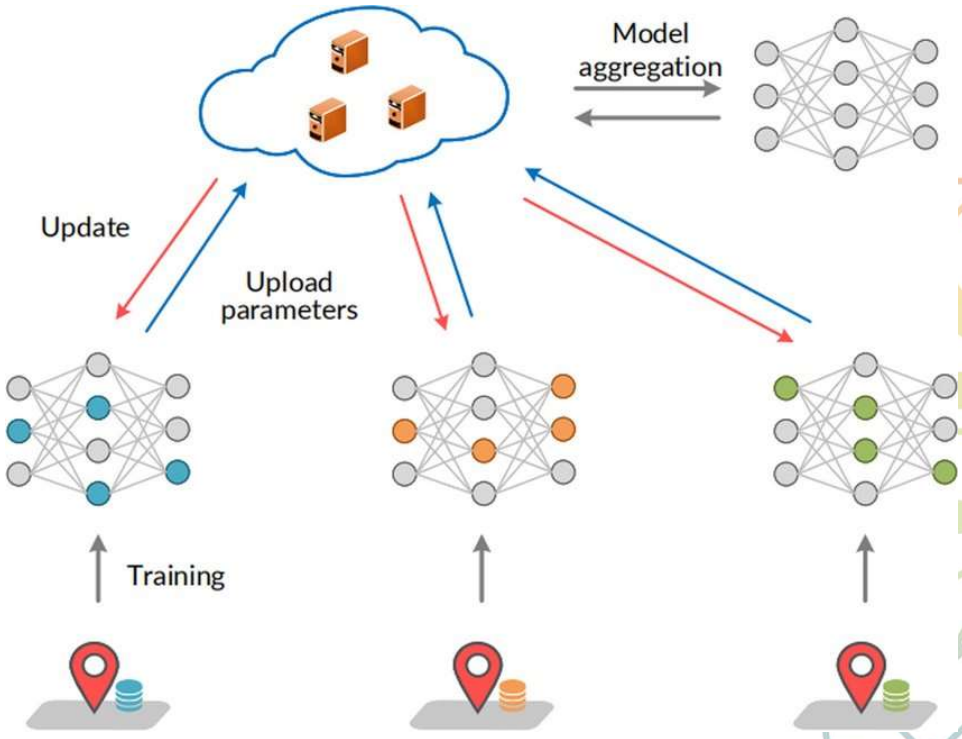


A savoir sur les ANN...

- Théorème : N'importe quelle fonction* peut être approximée par un ANN
- Ne devrait pas être utilisé comme algorithme "boîte noire"
  - Besoin d'expertise pour créer des modèles efficients
- N'implique pas nécessairement un gros coût en calculs
- De nombreux paradigmes d'apprentissage existent pour s'adapter à différentes situations
  - Distribution des données: temporelle, spatiale, restrictions...
  - Disponibilité des données : déséquilibres, rareté...

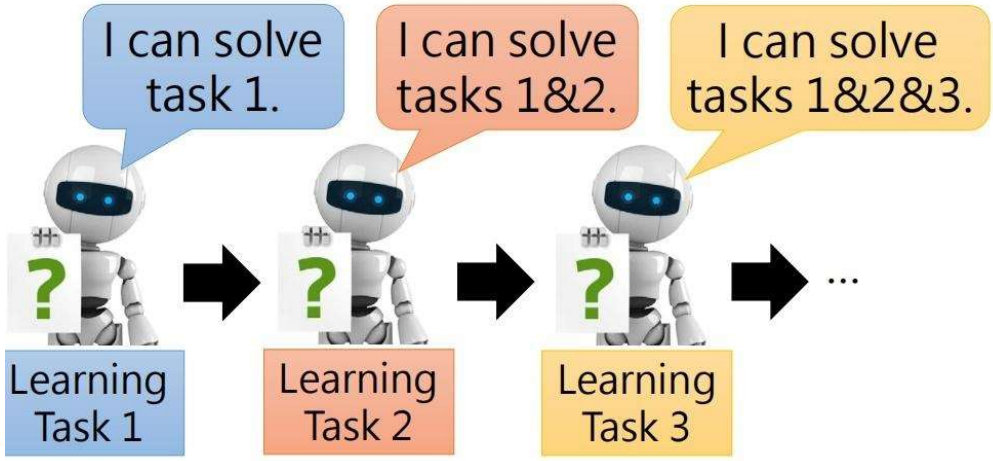
Apprentissage fédéré

- Les données sont collectées par différents "agents"
- Chaque agent apprend indépendamment depuis ses données
- Les modèles sont régulièrement fusionnés par un serveur central
- Utile lorsque les données sont distribuées spatialement



Apprentissage Continu

- L'agent apprend d'un flux de données
- Les données/la tâche sont susceptibles de varier
- Si nécessaire, le modèle ne doit pas oublier les connaissances
- Utile si l'acquisition est contrainte dans le temps
- Utile si l'ensemble des données ne peux être stocké/utilisé d'un coup



Apprentissage Few-shot

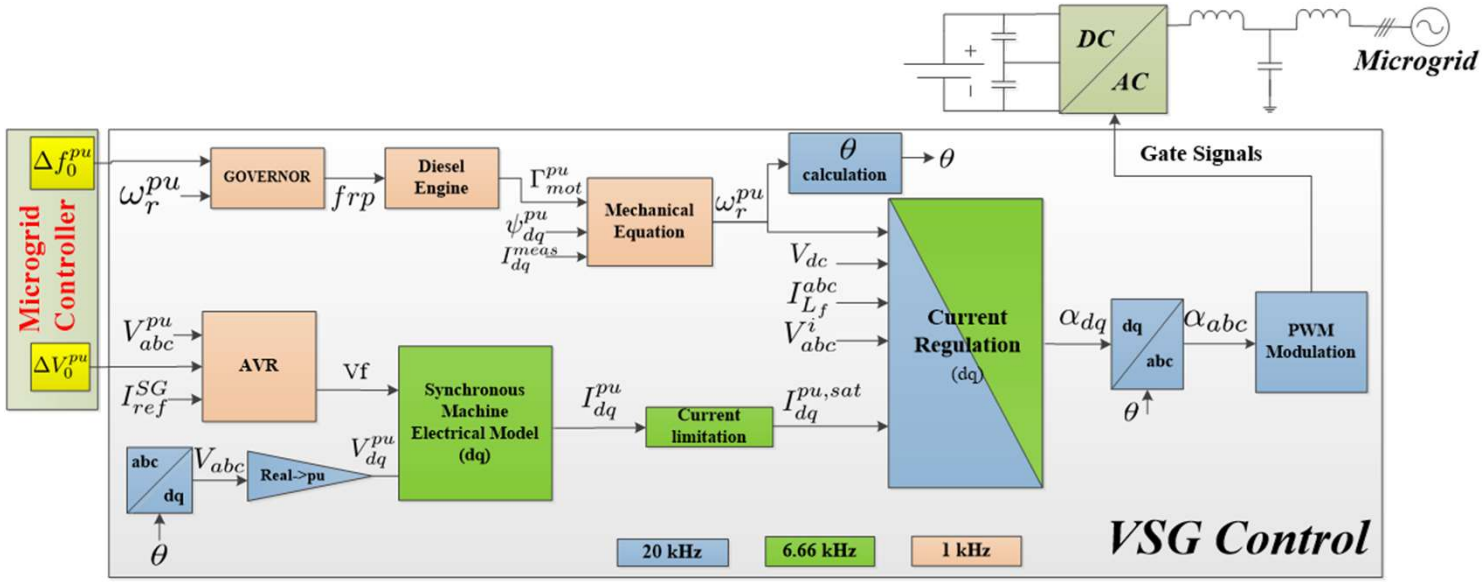
- Apprend depuis un ensemble réduit d'exemples
- De la "connaissance auxiliaire" doit compenser:
  - Données d'une tâche auxiliaire/similaire
  - Contraintes sur la tâche
  - Modèle pré-entraîné sur une tâche auxiliaire
  - Exemples sans sorties attendues (données non étiquetées)
- Utile lorsque peu de données (étiquetées) sont disponibles
- Utile pour déporter une partie des calculs

Applications

- IA présente à toutes les échelles de temps
  - Long terme : Planification des réseaux de distribution et de leur évolution
    - Planification Automatique
  - Court terme : Prédiction de consommation, contrôle de batteries
    - Modèles statistiques, ANN...
  - Quasi-instantané : Commande de l'électronique de puissance pour les réseaux à faible inertie
    - ANN

Contrôle d'onduleur par IA pour la faible inertie

- Emulation d'un VSG* par ANN pour diminuer son coup pour le contrôle de réseaux à faible inertie
- Démonstration de la faisabilité d'un contrôle par IA

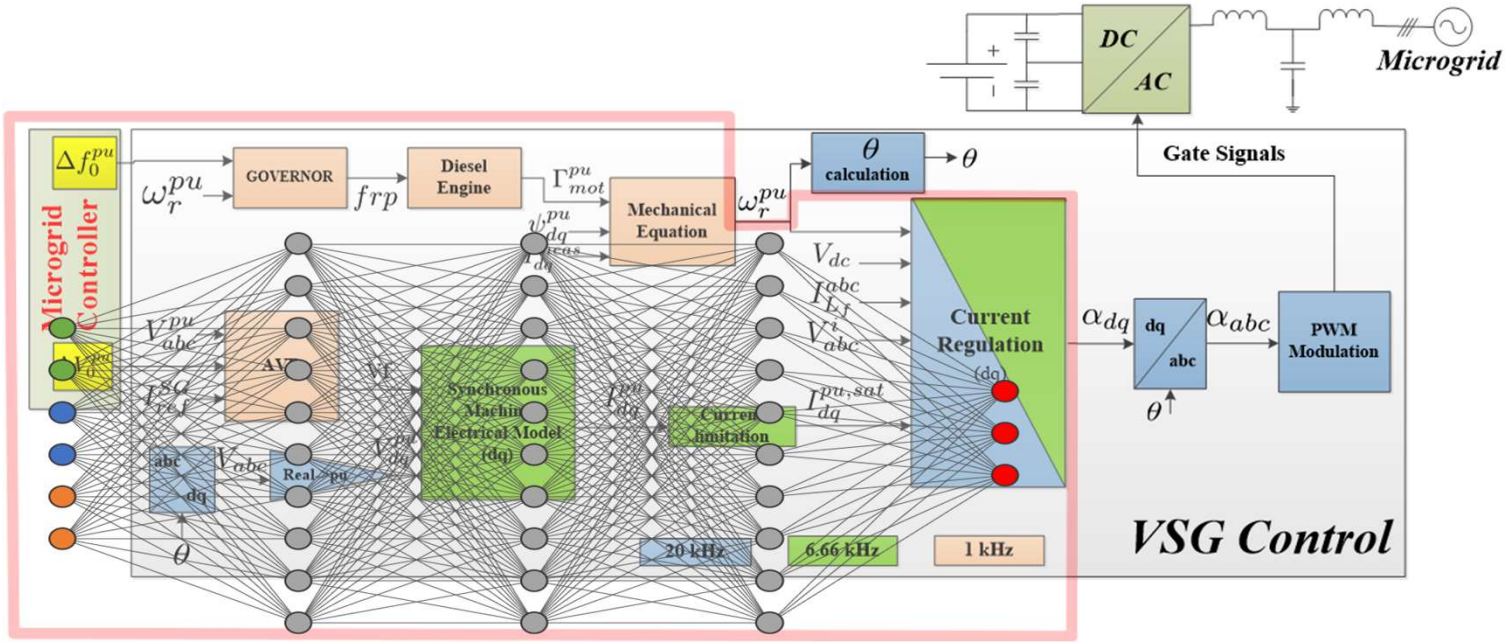


*Virtual Synchronous Generator

Thèse de M. Hassan Issa

Contrôle d'onduleur par IA pour la faible inertie

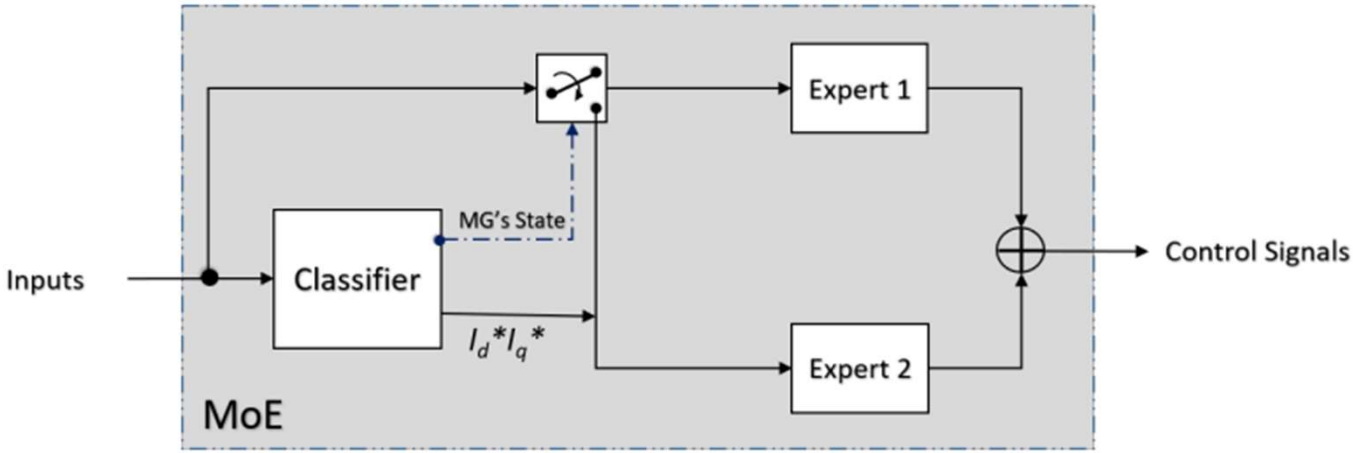
- Emulation d'un VSG par ANN pour diminuer son coup pour le contrôle de réseaux à faible inertie
- Démonstration de la faisabilité d'un contrôle par IA



Thèse de M. Hassan Issa

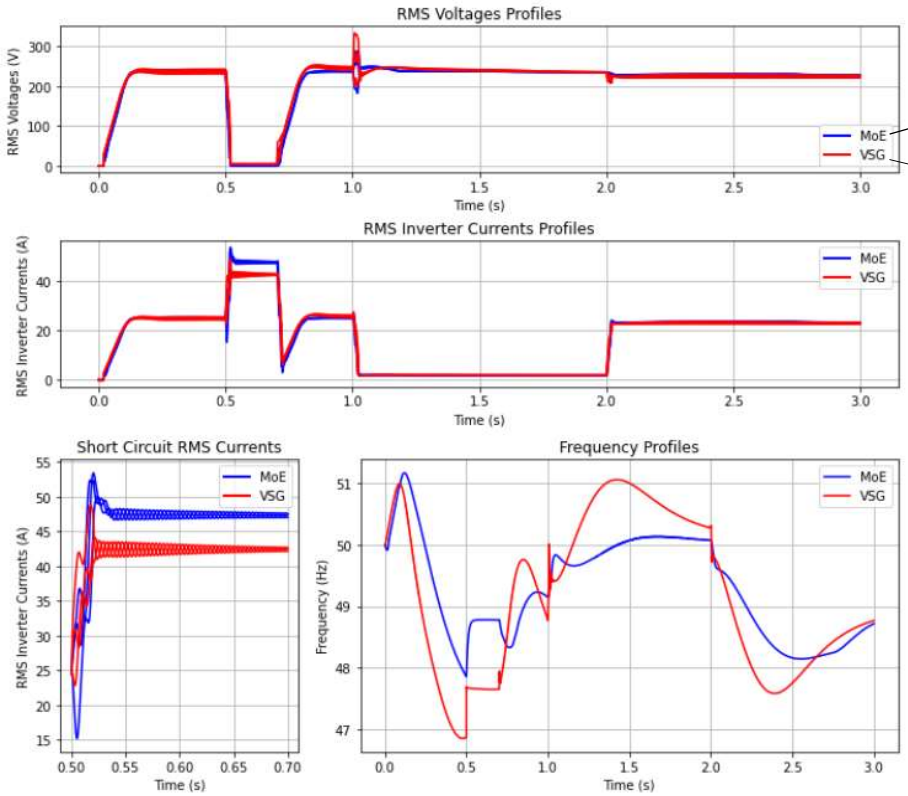
Contrôle d'onduleur par IA pour la faible inertie

- Demande une solution avancée pour reproduire fidèlement le comportement du contrôleur : la mixture d'experts
  - Réseaux convolutionnels spécialisés dans la commande en régime transitoire ou permanent



Contrôle d'onduleur par IA pour la faible inertie

- Comportement dynamique reproduit fidèlement
- Preuve de concept convaincante sur une MG élémentaire



MoE : solution avancée d'ANN avec mixture d'experts

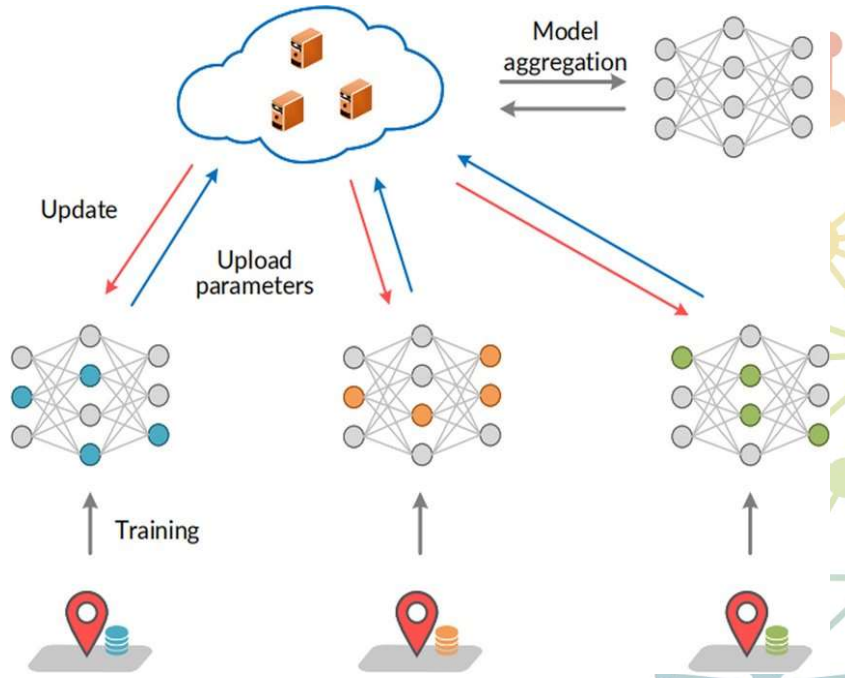
VSG : modèle physique validé expérimentalement

Contrôle d'onduleur par IA pour la faible inertie

- Perspectives
  - Mixture d'experts pour grid forming/grid following
  - Contrôle d'onduleurs multiples
    - Emulation d'un contrôle centralisé par de multiples contrôleurs décentralisés et auto-coordonnés
  - Modèles d'IA de contrôle à adaptation rapide
    - Modèles entraînés par méta apprentissage pouvant s'adapter rapidement aux conditions du réseau

Estimation du réalisé au poste HTA/BT

- Reconstruction au pas 30 minutes
- Accès partiel aux courbes de charges au niveau du poste
- Collaboration des différents postes pour l'estimation



Merci de votre attention !

Romain ROMBOURG

romain.rombourg@g2elab.grenoble-inp.fr

Apport des Mesures Linky pour la Connaissance des Charges du Réseau BT

Guilherme RAMOS MILIS

Encadrants G2Elab : Marie-Cécile ALVAREZ-HERAULT, Raphaël CAIRE

Encadrants Enedis : Christophe GAY, Bruno GOURGUECHON

Objectifs

Concevoir une nouvelle approche de la modélisation des charges

Modélisation « Disruptive »

- Enrichir la modélisation des charges du réseau BT (en parallèle des travaux en cours d'actualisation des modèles):
  - Donnés de comptage Linky

- A partir des études sur :

- Le périmètre des données ;

- L'utilisation des données par les distributeurs étrangers ;

- Et des discussions avec des experts métier d'Enedis

Division du sujet en deux thématiques centrales

1. Étude du foisonnement **2023** ;

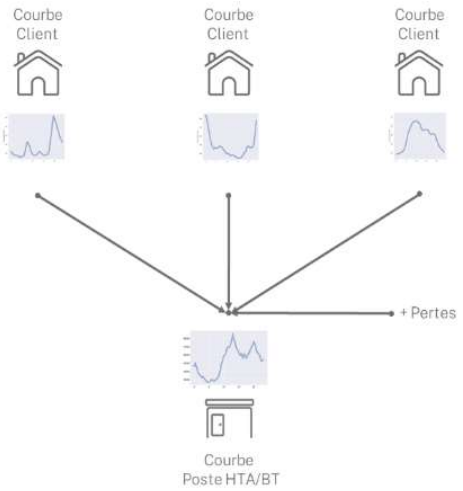
2. Reconstruction des profils **2024**.

Modélisation par désagrégation

Une contribution novatrice, fournissant un point de départ pour de nouvelles recherches

Le chemin habituel

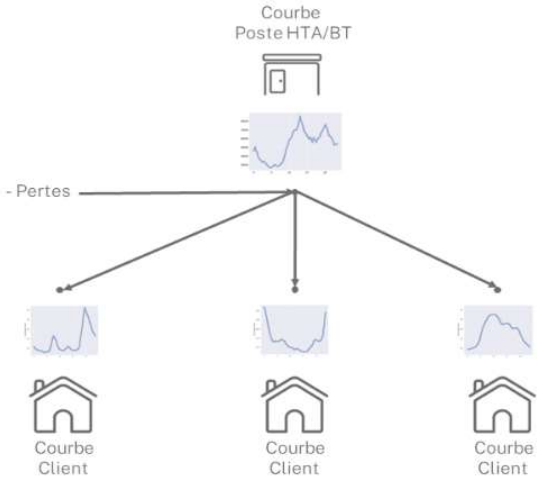
- Des profils de consommation sont estimés pour les consommateurs…



- A partir de l'**agrégation** des ces profils on est capable d'estimer la consommation à maille du Poste.

Le chemin inverse

- Grâce à Pinky, la courbe à maille du poste est disponible.
- Donc, il est possible de partir de la courbe du poste…



- **Pour estimer les profils à la maille des consommateurs à partir de la désagrégation.**

Le Pourquoi

- Les profils de charge BT sont les entrées des outils de calcul électrique du réseau
- Proposer une modélisation basée sur la consommation réelle mesurée à travers les compteurs intelligents du GRD
- Respect de la vie privée des consommateurs

Pmax

Principe du modèle

Le processus en 2 étapes et les données utilisées

Segmentation des Consommateurs

Etape 1

N

Conso. d'un poste HTA/BT

Il existe des caractéristiques ou comportements similaires parmi les clients

K

Groupes de conso. similaires parmi les N consommateurs

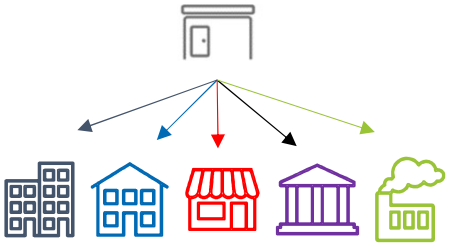
Désagrégation de la Courbe du Poste

Etape 2

K

Courbes qui représentent les K groupes des conso.

Courbe Poste HTA/BT



Recalage en énergie

N

Courbes pour chaque consommateur

Données

Période de 03/2022 à 03/2023

Courbes de charge mesurées par Pinky

48

Postes HTA/BT

Sans clients Entreprise

Puissance maximale

(valeur et moment de la journée)

&

Énergie

5318

Consommateurs en aval des Postes

Panel réseau

Etape 1 segmentation des Consommateurs

Le processus en 2 étapes et les données utilisées

Jeu de données

Conso.	Pmax au J	Horodate au J	Pmax au J+1	Horodate au J+1	...	Pmax au J+T	Horodate au J+T
1	valeur	(HH:MM)	valeur	(HH:MM)	...	valeur	(HH:MM)
2	valeur	(HH:MM)	valeur	(HH:MM)	...	valeur	(HH:MM)
...	...	...	...	...	...	...	...

Jeu de données construit par saison pour être plus représentatif des habitudes de consommation

Traitement des cas particuliers (« outliers ») :

- Les résidences secondaires seront considérées comme des outliers dans notre jeu de données.
- Le critère choisi pour dire qu'un client est une résidence secondaire :

Client a passé plus de la moitié de la saison avec Pmax = 0

Méthodes

Analyse en composants principales

Kmeans clustering

Méthode du Coude

- **ACP** réalisée pour réduire la redondance des données ;
- **Kmeans** choisi grâce à sa simplicité de compréhension et de fonctionnement + efficacité computationnel ;
- **Coude** avec la libraire python Kneed pour faire la détection automatique des coudes et éviter la subjectivité.

Résultats pour un Poste HTA/BT

Poste HTA/BT Exemple

Saison « d'hiver » : 01/12/2022 – 31/03/2023

217

Consommateurs en aval du poste où :

19

Consommateurs identifiés comme résidence secondaire

6 *Groupes de consommateurs*

Groupe	Nb clients
0	72
1	74
2	5
3	3
4	24
5	20
Rés Sec.	19

Etape 2 Désagrégation de la courbe du poste

La définition du problème à résoudre

LE PROBLÈME

$$\text{Courbe Charge}_{\substack{poste \\ HTA/BT}} = \sum_{k=1}^{K} \text{courbe cluster } (k)$$

Ce problème peut être résolu avec l'application d'une méthode d'ajustement de courbe (curve fitting)

L'AJUSTEMENT DE COURBES

$$\min \sum_{i=1}^{M} \left(y_i - f\left(x_i, \theta_{optimal}\right)\right)^2$$

$(x_i, y_i$ où $1 \leq i \leq M)$ $\qquad f(x, \theta)$

Libraire python lmfit avec méthode optimisation L-BFGS-B

LA FONCTION $f(x, \theta)$

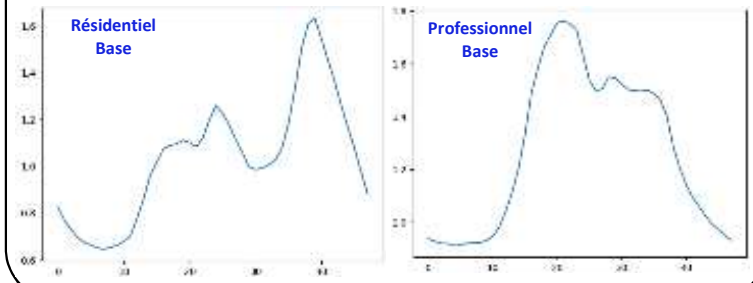
Somme de Gaussiennes

$$f(x, a, b, c) = \sum \left(a * exp^{\frac{-(x-b)^2}{2*c^2}}\right)$$

- a : détermine la hauteur de la courbe ;
- b : détermine la position du centre de la courbe;
- c : détermine la largeur de la courbe.

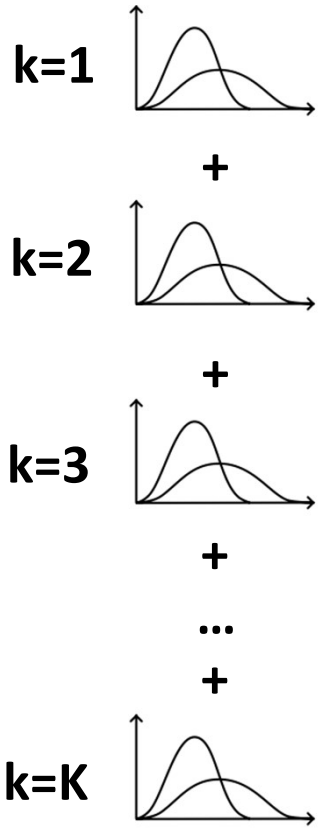
LE POURQUOI

La forme des profils de charge actuels (Profils Recoflux) rappellent un comportement gaussien



Fonction $f(x,\theta)$ purement mathématique

Deux gaussiennes par cluster



$f(x,\theta)$

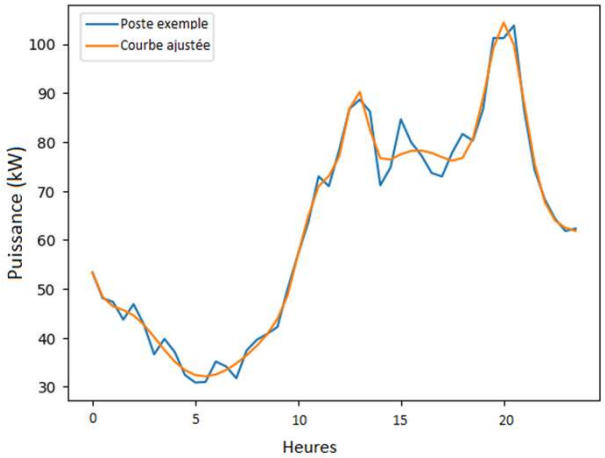
$$f(x,a,b,c) = \sum_{k=1}^{K}\left(a1_k * exp^{\frac{-(x-b1_k)^2}{2*c1_k^2}} + a2_k * exp^{\frac{-(x-b2_k)^2}{2*c2_k^2}}\right)$$

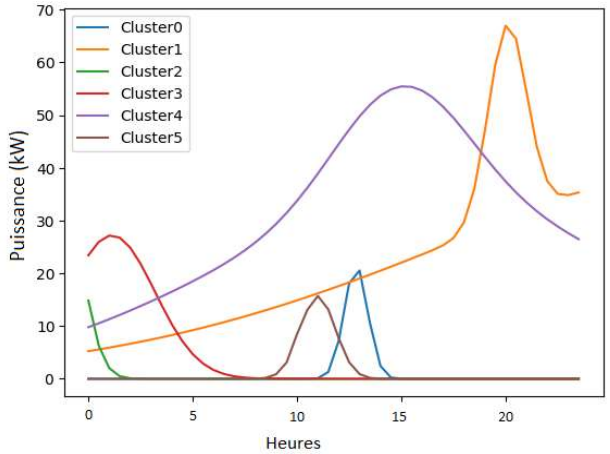
$0 < a < \max(\text{Courbe Pinky})$

RÉSULTAT POUR LE POSTE EXEMPLE

Hypothèse appliquée pour le même jour aléatoire de la saison d'hiver :

Erreur	
SMAPE	3,15 %



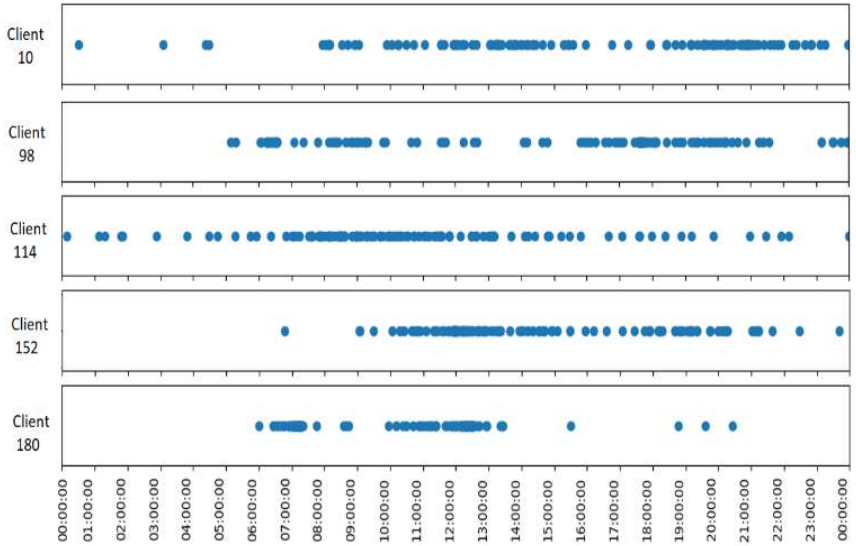


Ajout propriétés électriques au modèle

Pour rapprocher le modèle d'un comportement réel des clients du réseau

HEURES DE LA PMAX PAR CONSOMMATEUR

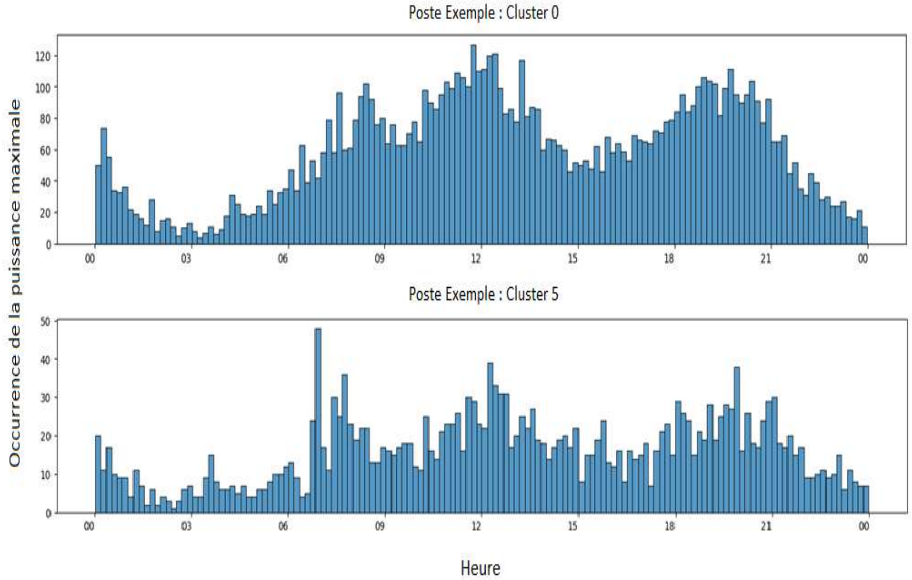
Tous les horaires auxquels la Pmax a été enregistrée au cours de la saison d'hiver :



Chaque client présente des tendances de consommation différentes et qui varient considérablement tout au long de la saison.

HEURES DE LA PMAX PAR GROUPES DE CONSOMMATEURS

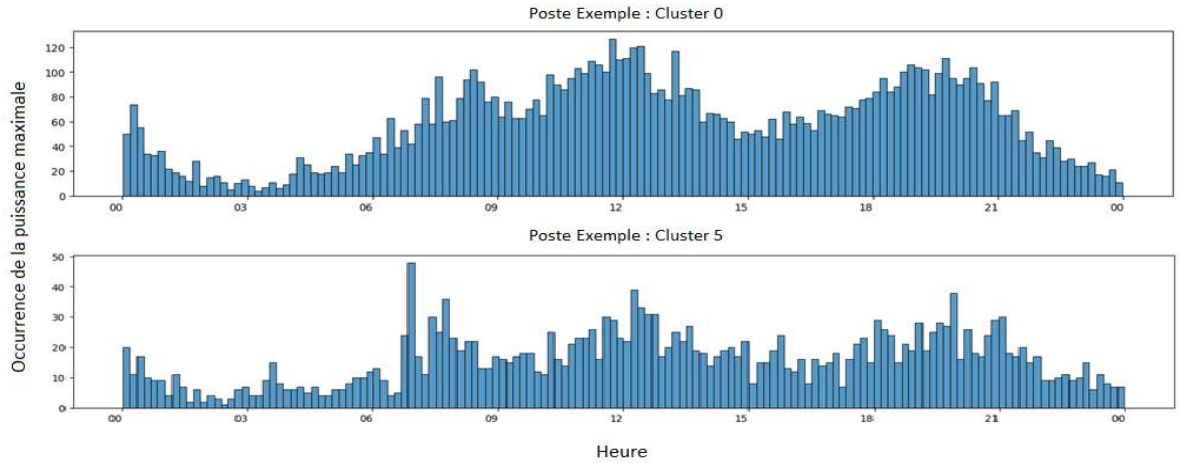
Occurrences de la Pmax pendant toute la saison d'hiver pour tous les clients des clusters 0 et 5, à partir d'un histogramme où chaque barre correspond à un intervalle de 10 minutes.

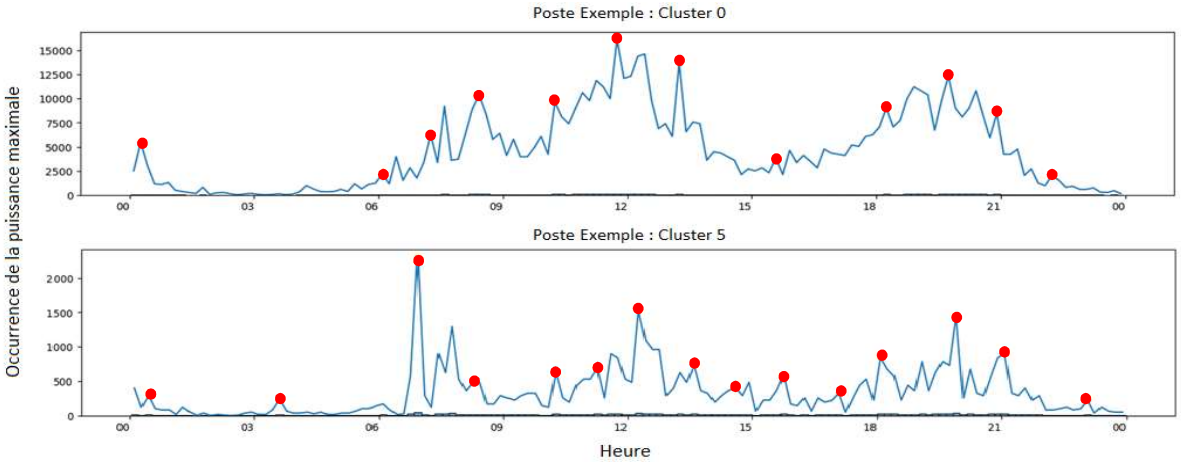


En observant les occurrences par groupe, les tendances deviennent plus évidentes.

Somme de gaussiennes corrélées avec Pmax

Définition du nombre de gaussiennes par cluster





Les concentrations de puissance maximales à une période donnée indiquent si c'est une période importante pour le cluster, méritant une bonne résolution pour ajuster plus finement les pointes.

Traitement du signal afin d'identifier les pics

IDENTIFICATION DES POINTES

- Libraire python SciPy avec la fonction ***find_peaks***

Identification et localisation des maximas locaux dans un ensemble de données unidimensionnelles, par comparaison des valeurs voisines.

- Paramètres ajustables :

D

Distance entre pointes

P

Proéminence entre pointes

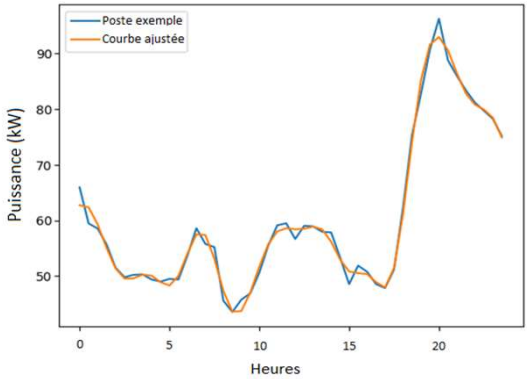
Somme de gaussiennes corrélées avec Pmax

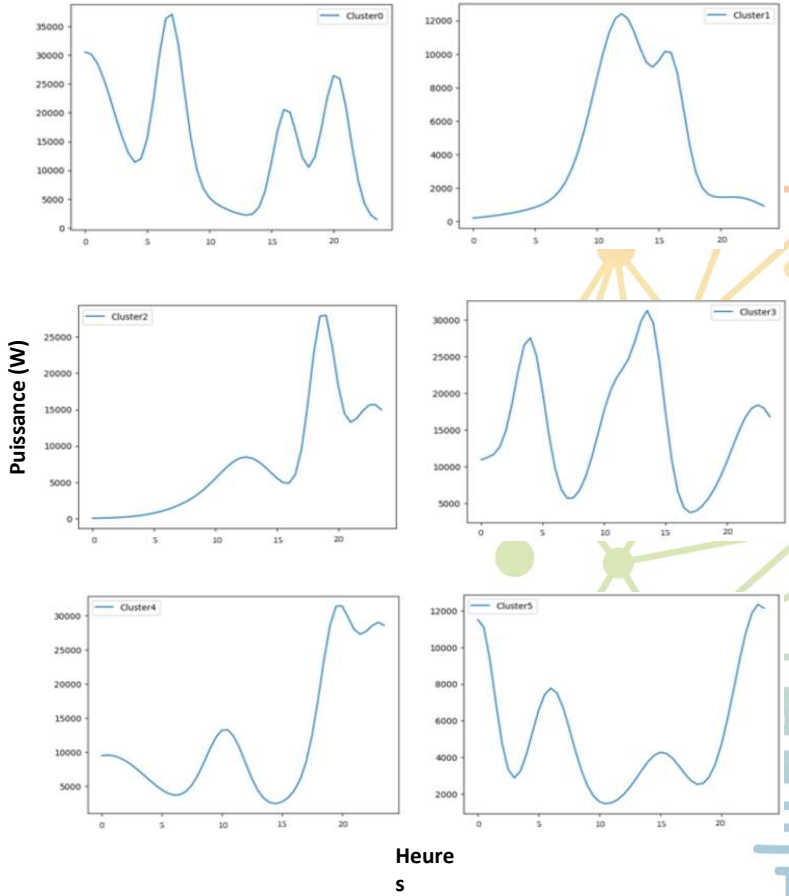
Modèle de performance qui distingue les groupes de clients en fonction des caractéristiques du réseau

$$\boldsymbol{f(x,\theta)}$$

$$f(x,a,b,c) = \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T}\left(a_{t,k} * \ exp^{\frac{-(x-b_{t,k})^2}{2*c_{t,k}^2}}\right)$$

$$0 \ \leq \ \boldsymbol{a_{t,k}} < \max(Courbe\ Pinky)$$
$$h_t - 1 \ \leq \ \boldsymbol{b_{t,k}} \ \leq h_t + 1$$
$$2 < \ \boldsymbol{c_{t,k}} < 12$$





COMPARAISON DES RÉSULTATS

- En appliquant les 3 modèles pour tous les jours de la saison d'hiver :

SMAPE	Modèle 1 : « gaussienne simple »	Modèle 2 : « somme de gaussiennes »	Modèle 3 : « somme de gaussiennes-Pmax »
minimal (%)	4,09	1,16	1,60
moyen (%)	6,36	2,81	2,64
maximal (%)	10,81	6,11	3,99

Conclusions

Bilan du modèle

- Les résultats du **modèle purement mathématique** nous ont confirmé **l'intérêt de la méthodologie construite** ;
- En **ajoutant des caractéristiques électriques** qui distinguent les groupes de clients, nous avons pu introduire un élément qui nous **rapprochent de la réalité du réseau** sans dégrader les performances ;
- Pour assurer la **cohérence entre les énergies réelles** des clients et les énergies des courbes désagrégées, des adaptations ont été nécessaires. Elles nous fournissent un **compromis** entre **la performance** et la conservation de l'énergie.

Contribution

C3.

- Développement d'une méthodologie innovante pour la modélisation des profils de charge des consommateurs BT ;
- Comme il s'agit d'une modélisation basée sur la consommation réelle, elle pourrait venir compléter la façon classique (pire scénario de consommation) utilisée par le planificateur pour les modèles de charge.

Cette étude a fait l'objet d'une publication *(acceptée le 01/03/2024)* dans MDPI « Special issue : Big Data Analytics and Mobile Cloud Computing in the Internet of Things »

Merci de votre attention !

Raphaël CAIRE

raphael.caire@g2elab.grenoble-inp.fr

Contexte

Déploiement généralisé des compteurs communicants pour répondre aux enjeux d'évolution du réseau

Déploiement des Compteurs Intelligents

LINKY

2006 : Lancement du projet ;

…

01/12/2015 : Généralisation ;

…

2022 : +36 millions de compteurs déployés.

- Index de consommation et production journaliers
- Pmax soutirée ou injectée avec l'horaire de l'événement
- Courbe de charge quand autorisé
- Evénements de (non) qualité de fourniture

Evolution des Usages du Réseau

ENR/VE

Des usages nouveaux consommateurs d'électricité : 1 102 975 VE et VHR roulaient fin 2022

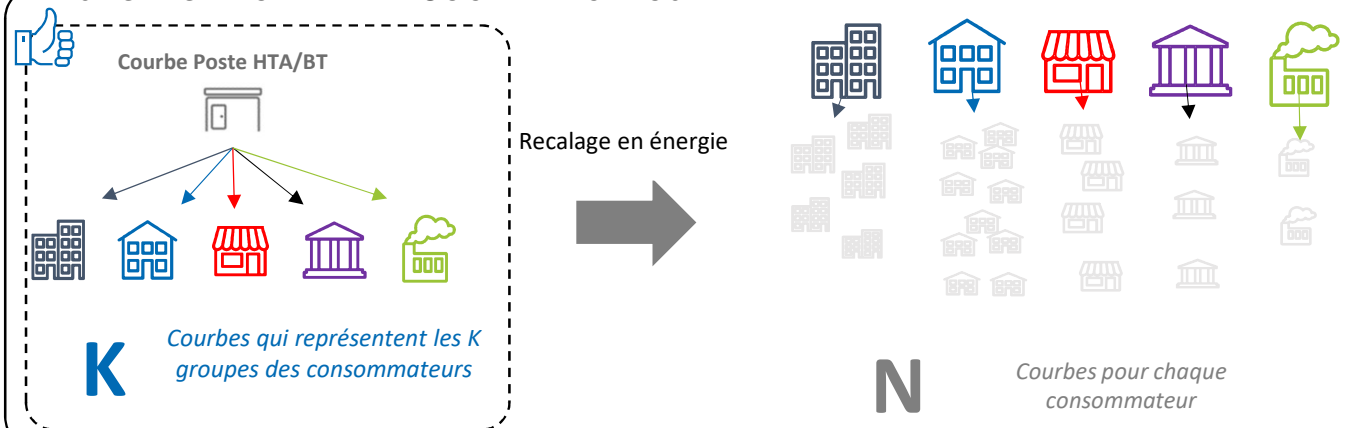
L'insertion massive d'ENR sur le réseau augmente la tension. Au 4er trimestre 2022, 634 733 sites de production raccordés au réseau public de distribution

Au 4er trimestre de 2022, Enedis a 239 598 clients raccordés en autoconsommation individuelle

Ajout d'une contrainte

Liée aux énergies des clients

Désagrégation de la Courbe du Poste



Adaptation de la formulation du problème

$$\text{Courbe Charge}_{\substack{poste \\ HTA/BT}} = \sum_{k=1}^{K} \text{courbe cluster}\ (k)$$

&

$$\boldsymbol{Ecourbe\ cluster_k = Ecluster_k}$$

L'ajustement de courbes

$$\min \left(\sum_{i=1}^{M} \left(y_i - f\left(x_i, \theta_{optimal}\right) \right)^2 + \boldsymbol{\lambda * Pénalité} \right)$$

$$\boldsymbol{Pénalité = \sum_{k=1}^{k} (Eprofils_k - Ecluster_k)^2}$$

Somme des gaussiennes

Liée aux énergies des clients et les Pmax

$f(x, \theta)$

$$f(x,a,b,c) = \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T}\left(a_{t,k} * exp^{\frac{-(x-b_{t,k})^2}{2*c_{t,k}^2}}\right) + \boldsymbol{l_k} * \boldsymbol{Ecluster_k}$$

$$0 \leq \boldsymbol{a_{t,k}} < \max(Courbe\ Pinky)$$
$$h_t - 1 \leq \boldsymbol{b_{t,k}} \leq h_t + 1$$
$$2 < \boldsymbol{c_{t,k}} < 12$$
$$0 < \boldsymbol{l_k} < 1$$

Comparaison des résultats

- En appliquant les 4 modèles pour tous les jours de la saison d'hiver :

SMAPE	Modèle 1 « gaussienne simple »	Modèle 2 « somme de gaussiennes »	Modèle 3 « somme de gaussiennes-Pmax »	Modèle 4 « somme de gaussiennes-Pmax-énergies »
minimal (%)	4.09	1.16	1.60	2.06
moyen (%)	6.36	2.81	2.64	4.86
maximal (%)	10.81	6.11	3.99	11.30

Erreurs SMAPE des énergies

- *L'erreur entre les énergies des courbes produites et les énergies de clusters :*

SMAPE	Cluster 0	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster Rés. Secondaire
minimal (%)	0,01	0,01	0,28	0,10	0,02	0,01	0,33
moyen (%)	0,29	0,21	26,27	44,38	0,50	0,47	95,89
maximal (%)	1,03	0,62	127,79	200,00	1,92	1,75	200,00

Groupe	Nb clients
0	72
1	74
2	5
3	3
4	24
5	20
Rés Sec.	19

Les clusters avec une consommation énergétique faible (2,3, Rés secondaire) sont les endroits où les erreurs sont plus élevés

Modélisation de séries temporelles de consommation à l'échelle locale en utilisant des données hétérogènes

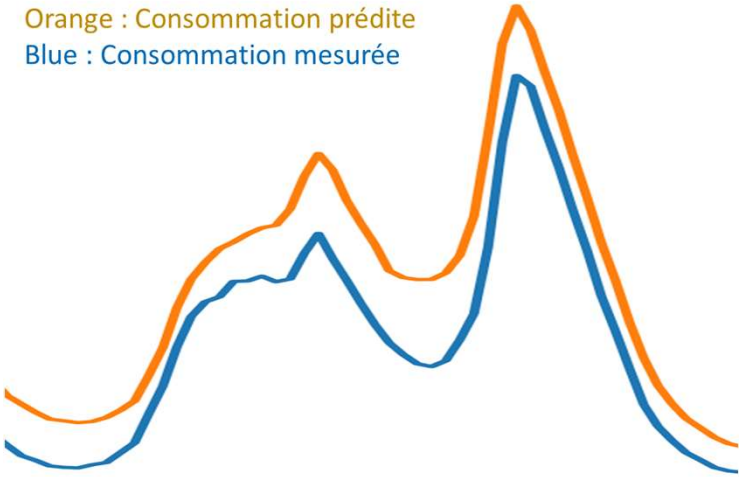
Muhammad Salman SHAHID

Encadrants G2Elab : Benoît DELINCHANT

Encadrants Enedis : Anne DE MOLINER et Pierre CAUCHOIS

Remerciements : Yidi HUANG, Frédéric WURTZ, Xavier ARNAULD DE SARTRE

Contexte (1/2)



Estimations locales de consommations électriques au pas de temps demi horaire, à partir de panels représentatifs de clients

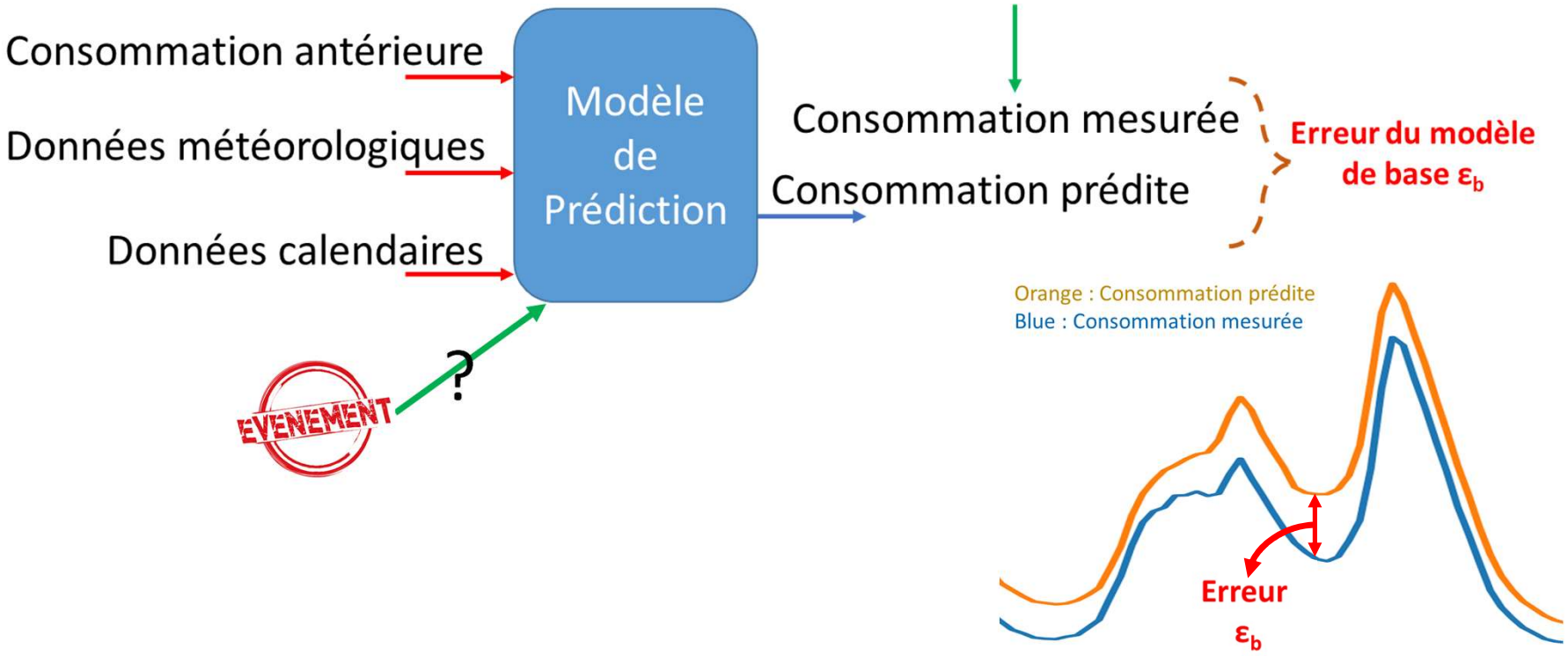
Maintenance de réseau

Transition énergétique

Echelle locale : Régions, départements, communautés d'agglomérations

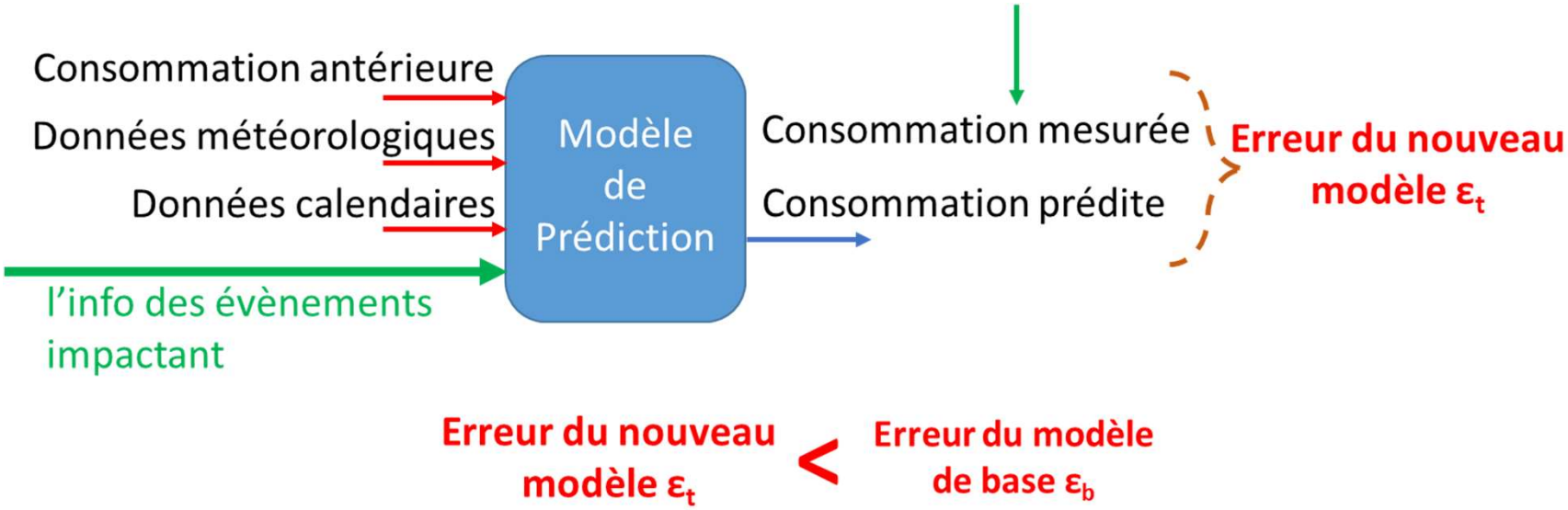
Contexte (2/2)

- Les prévisions actuelles d'ENEDIS :



Objectif

- À l'échelle locale:
  - Amélioration du modèle de base en incorporant l'info des évènements impactant sur la consommation locale.



Erreur du nouveau modèle ε_t < Erreur du modèle de base ε_b

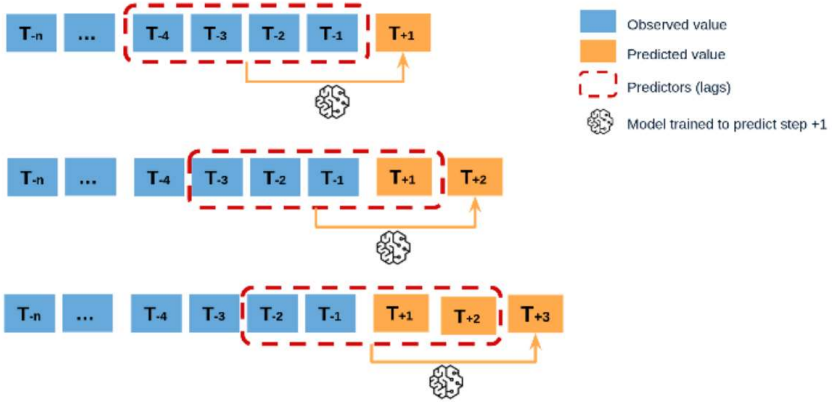
Travaux antérieurs

- Une étude a été réalisée dans la chaire à la maille nationale (Alyafi et al., 2023).
  - Les grands événements, visibles au niveau national sont détectés.

Event	Number of occurrences
Marathonnantes	99
Giletsjaunes	90
srfcpsg	84
journeedelafemme	75

Table 1 Hashtags count in 29 of April 2019 between 9 am and 10 am.

  - Méthode de prévision développée



Référence: Alyafi, A., Cauchois, P., Delinchant, B., & Berges, A. (2023, June). Time series machine learning augmented with social network events to improve national electricity consumption profile estimation. 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023) (Vol. 2023, pp. 2283-2288). IET.

Travaux antérieurs

- Une étude a été réalisée dans la chaire à la maille nationale (Alyafi et al., 2023).
  - Résultat principal : l'ajout de données des réseaux sociaux permet de diminuer l'erreur maximale

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%

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

Référence: Alyafi, A., Cauchois, P., Delinchant, B., & Berges, A. (2023, June). Time series machine learning augmented with social network events to improve national electricity consumption profile estimation. 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023) (Vol. 2023, pp. 2283-2288). IET.

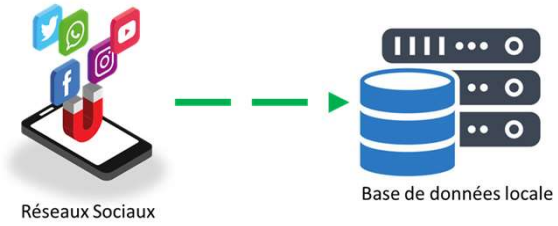
Pourquoi au niveau local ?

Peu de foisonnement : à cette échelle, la consommation est directement impactée par des activités humaines difficilement prédictibles par les approches classiques.

La déformation des consommations induite par le déroulement d'un grand évènement.

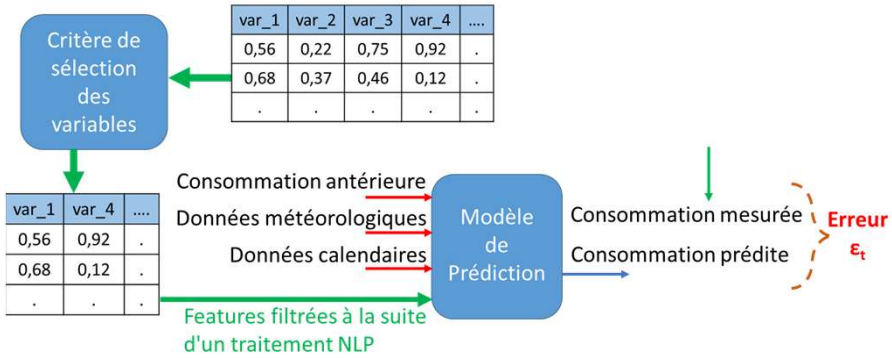
Programme de travail

1. Mise en place de la chaîne **d'extraction automatique** de données de **réseaux sociaux** et du stockage associé

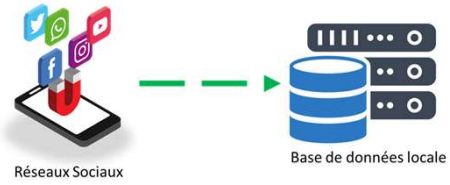


2. Construction de **variables explicatives** à partir des données de **réseaux sociaux** par des méthodes de NLP

3. Méthodologie de **sélection** et d'intégration de **variables** pour **l'amélioration** des modèles

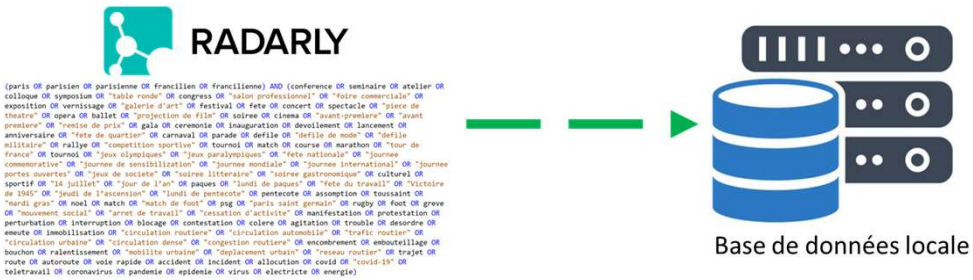


Collecte de données (1/2)



- 3 villes : **Paris**, **Lyon** et **Grenoble**
  - Des événements **récurrents** e.g. Noël
  - Des événements **occasionnels** e.g. manifestations, grèves, jeux olympiques

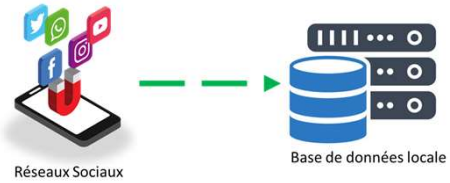
- Les sources :
  - Website, Blog, Media, Forum, Comment
  - Facebook, Twitter/X, Instagram, Pinterest, LinkedIn

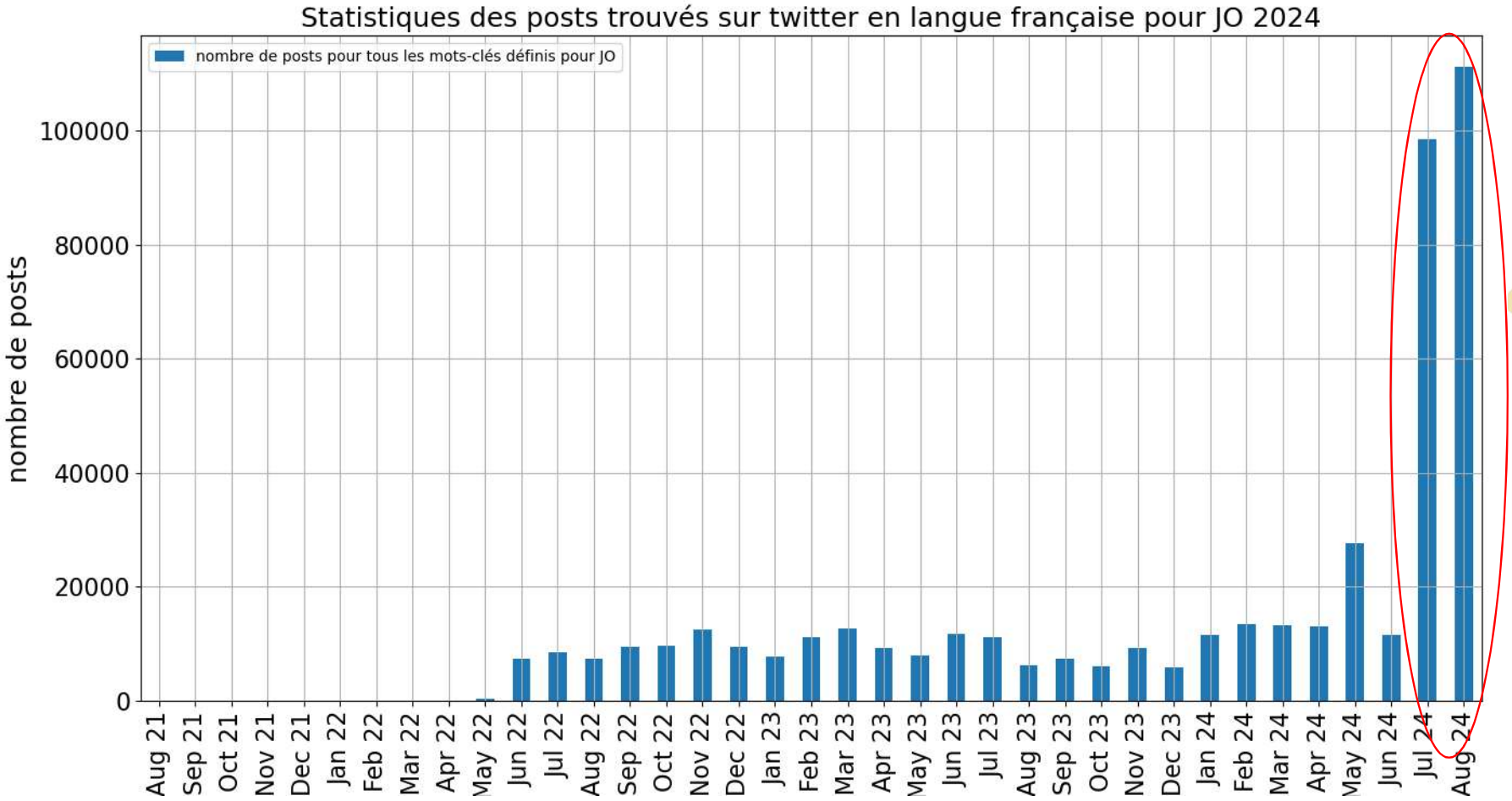


Ville	Taille des données
Paris	93,15 Go
Lyon	22,9 Go
Grenoble	6,35 Go
Au total	**122,4 Go**

Référence: Copet, J., de Carvalho, C., Mouilleron, V., Tabutiaux, B., & Zanghi, H. (2016). Radarly: écouter et analyser le web conversationnel en temps réel (Real time listening and analysis of the social web using Radarly). In Actes de la conférence conjointe JEP-TALN-RECITAL 2016. volume 5: Démonstrations (pp. 40-42).

Collecte de données (2/2)

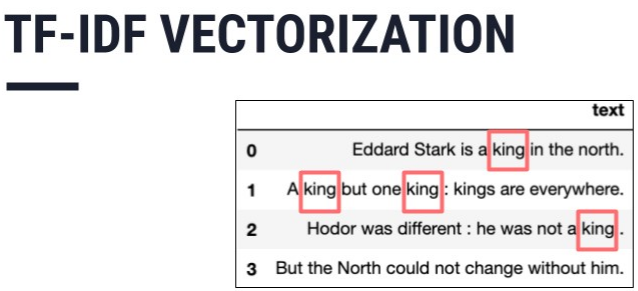




NLP (traitement des langues naturelles) pour extraction des variables

- Reconnaissance d'entités nommées (NER)

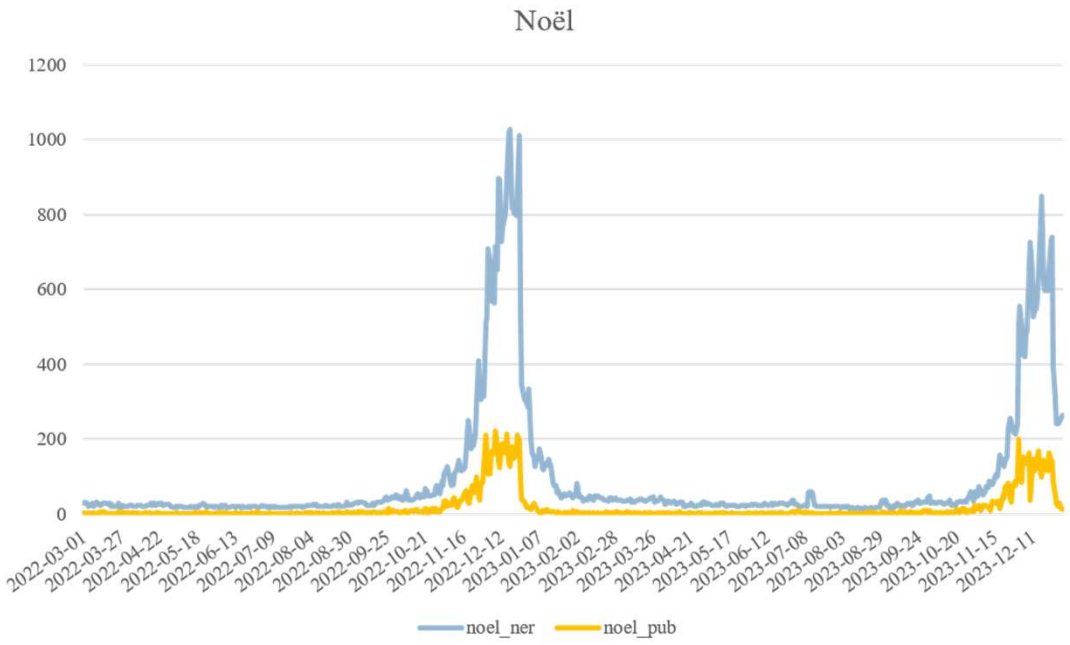
- Fréquence pondérée: (TF : term frequency et IDF : Inverse document frequency)



Source: Dataèiku Academy

Construction manuelle de variables explicatives par des méthodes de NLP (1/2)

Approche supervisée
On fixe ce que l'on cherche (exemple Noël)



Construction à partir des réseaux sociaux de la Variable « Noel », plus importante fin décembre

Approche non-supervisée
L'algorithme cherche les thématiques en lien avec un thème (par exemple sapin, guirlandes, cadeaux)

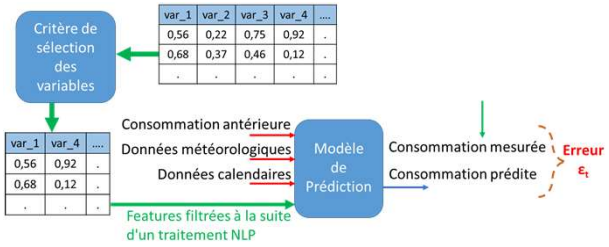
Construction manuelle : Résultats sur les courbes journalière de Lyon (2/2)

- Comparaison du Modèle du base sans données de réseaux sociaux avec le modèle développé avec données (variables NLP)
- 3 variables ajoutées : foot, fête de lumières et expositions
- Résultats

Modèle	RMSE
Du base	1051 unités puissances
Avec variables NLP	973 unités de puissances
Baisse	**7,38%**

Prochaines Etapes

- Détection automatique de thématiques en fonction des jours de forte erreur du modèle,
- Etude de corrélation entre erreurs et variables extraites des réseaux sociaux



Modèle de base avec *lag features* de la consommation, du calendrier et de la météo → Trier les dates par ordre décroissant par rapport à l'erreur → Vérifier la corrélation entre *les features textuelles* et la consommation le jour J → Sélectionner les éléments textuels pour lesquels une corrélation a été établie → Ajouter *les features* sélectionnées au modèle de base → Comparer si l'erreur de prédiction diminue en ajoutant *les features*

Features extraites de données textuelles grâce au NLP → Vérifier la corrélation entre *les features textuelles* et la consommation le jour J

Merci de votre attention !

Muhammad Salman SHAHID

muhammad-salman.shahid@g2elab.grenoble-inp.fr