

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

Thèse présentée par Sabine VIEIRA REINERT FRELLO

Encadrement :

Nouredine HADJSAID (directeur)

Yvon BESANGER (co-directeur)

David FREY (co-encadrant)

Jury :

Jean-Paul GAUBERT (rapporteur)

Marc PETIT (rapporteur)

Corinne ALONSO (présidente)

Nouredine HADJSAID (examineur)

Marie-Cécile ALVAREZ-HERAULT (invitée)

David FREY (invité)





1. Introduction

2. Les besoins du réseau

3. Le convertisseur matriciel

4. Implémentations Pratiques

5. Conclusions et Perspectives





1. Introduction

2. Les besoins du réseau

3. Le convertisseur matriciel

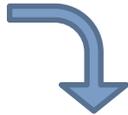
4. Implémentations Pratiques

5. Conclusions et Perspectives



Contexte

Programmations Pluriannuelles de l'Énergie (PPE)



Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)



Plan de Développement de Réseau (PDR) d'Enedis



Outils pour orienter la politique énergétique vers la diversification du mix de production d'électricité

Éclairer la trajectoire des investissements

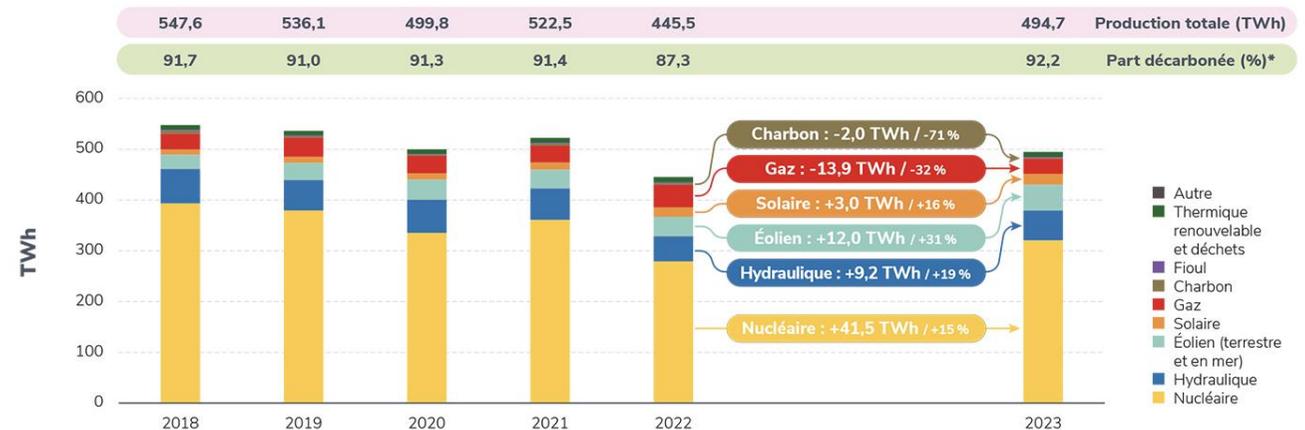
Établit la tendance au for développement des VE et des EnR

Bilan énergétique de RTE

Comparaison avec les prévisions de la PPE



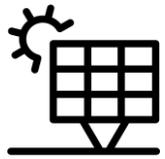
Évolution de la production totale d'électricité par filière, en France, entre 2018 et 2023, et part de production décarbonée



* La production à partir de déchets ménagers est considérée renouvelable à 50%. La production hydraulique est retranchée de 70% de la consommation de pompage des STEP selon la Directive européenne 2009/28/CE.

Figure 1 : Mix énergétique français en 2023 selon RTE

Contexte



Panneaux photovoltaïques



Véhicules électriques



Pompes à chaleur

Évolution du parc solaire photovoltaïque et comparaison avec les objectifs publics à l'horizon 2023

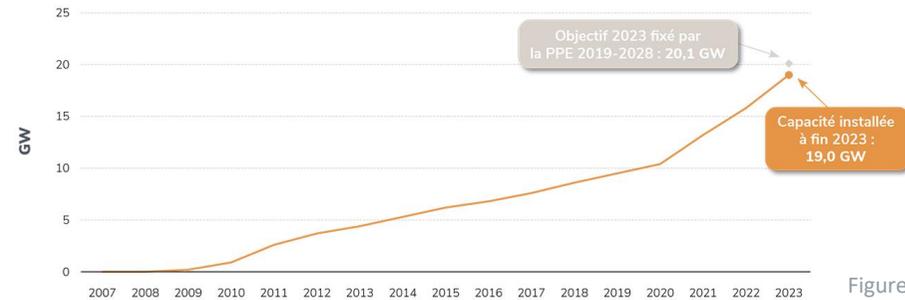


Figure 2

1 834 023 points de charge

au total, au T4 2023

709 070 (39%) / 1 006 944 (55%) / 118 009 (6%)

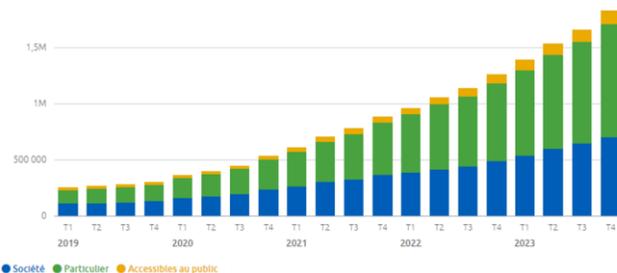


Figure 3

VENTES ANNUELLES DE POMPES À CHALEUR (PAC) INDIVIDUELLES

En milliers d'appareils

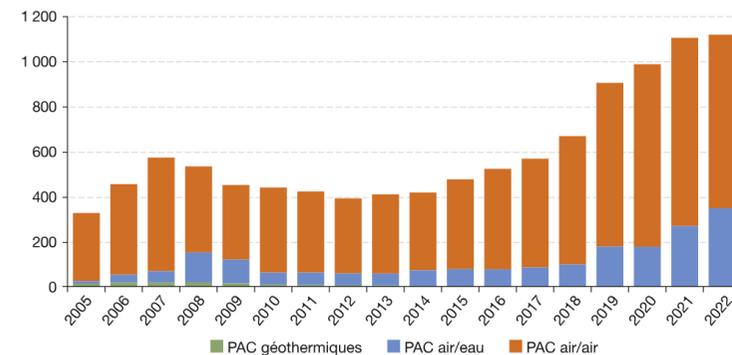


Figure 4

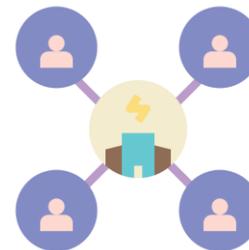
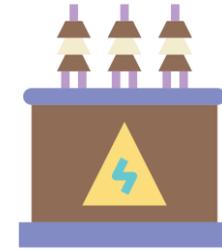
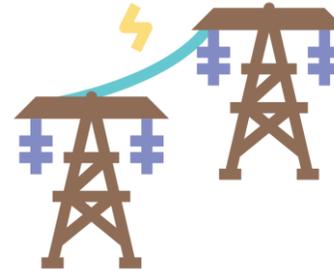
Figure 2 : Bilan électrique de RTE 2023.

Figure 3 : Enedis, Observatoire Français de la Transition Écologique.

Figure 4 : Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2023.

Contexte

- Flux de puissance **bidirectionnel**
- Transformateurs HTA/BT avec **réglage hors charge**
- **Contrôle** de la tension du coté **réseau HTA**
- Dispositifs à base d'électronique aux **extrêmes des lignes**
 - Bancs de condensateurs
 - Onduleurs + batteries
- Dispositifs de réglage de tension existent mais **très coûteux**
 - Possible implémentation du **régleur en charge (OLTC)**



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 EN50160

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



Contexte

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) :

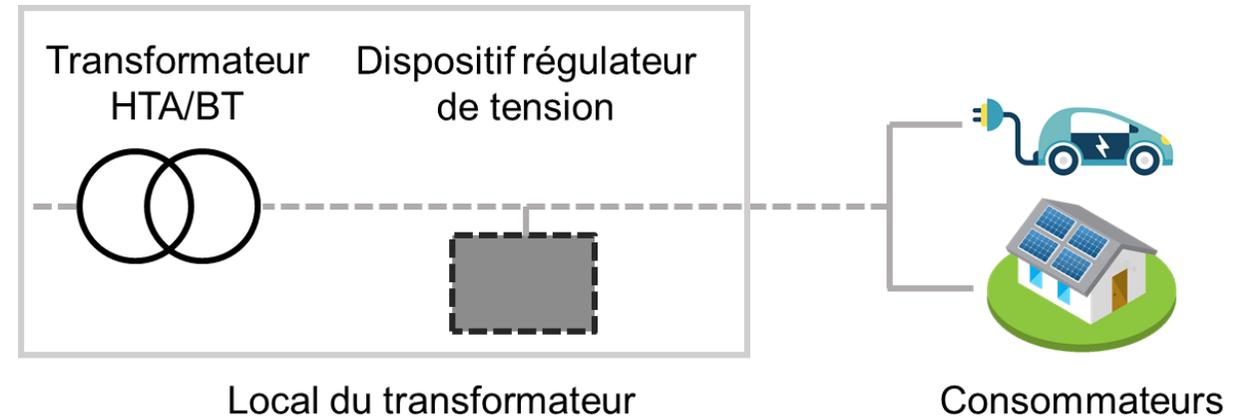
- Facilité de mise en œuvre
- Limiter les perturbations pendant les commutations



Objectifs

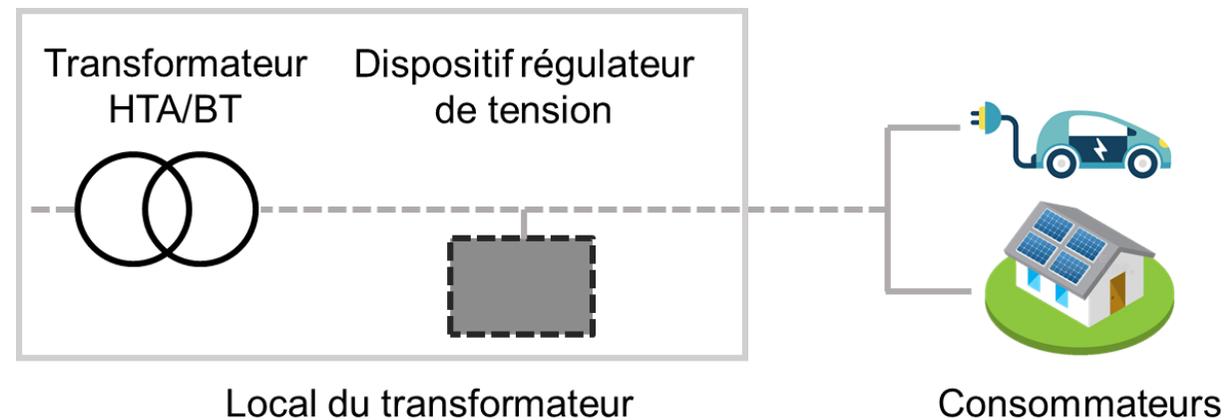
Ajouter des dispositifs de compensation à base d'électronique de puissance du côté secondaire du transformateur HTA/BT :

- Alternative efficace et économiquement réaliste pour le contrôle de la tension BT
- Dispositif qui peut être facilement connecté au réseau
- Émuler l'effet d'une prise en charge sans nécessiter de modifier le transformateur HTA/BT
- Contrôler la tension du réseau



Contraintes

- Volume
- Cout
- Pcc (limitation)
- Taux de défaillance
- Comportement en cas de panne
- Pertes en fonctionnement
- Comportement lors des commutations





1. Introduction

2. Les besoins du réseau

3. Le convertisseur matriciel

4. Implémentations Pratiques

5. Conclusions et Perspectives



Les besoins du réseau de distribution BT

Prise en compte du contexte de pénétration croissante de la production d'énergie distribuée et des bornes de recharge de VE



Inspiration dans la norme EN50160
($230V \pm 10\%$ pendant 95% du temps sur une semaine)



Analyse du comportement du réseau de distribution BT dans l'avenir

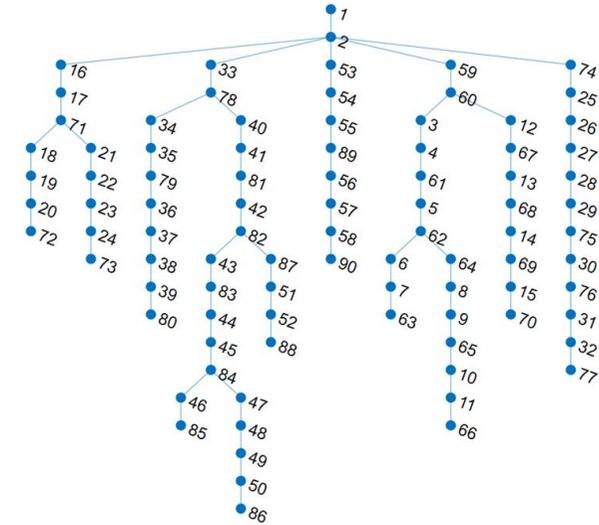
Un dispositif de régulation de tension est-il vraiment nécessaire dans le réseau BT du futur ?



Les besoins du réseau de distribution BT

Estimation des contraintes de tension dans le réseau

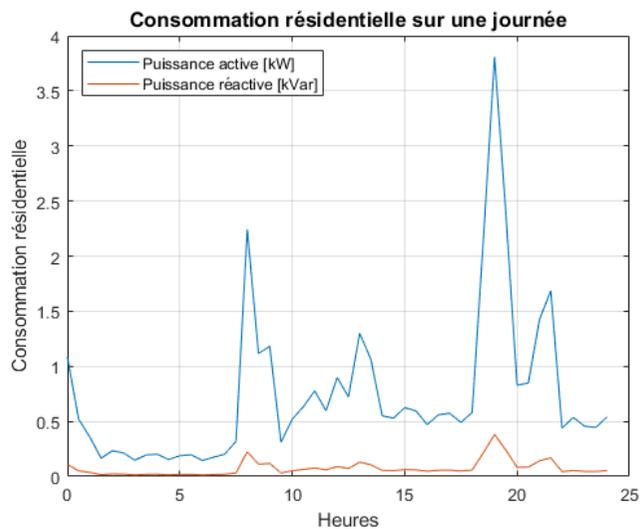
1. Élaboration des **cas d'étude**
 - Base sur scénarios de rapports Enedis et RTE à l'horizon 2050
 - Calculs de répartition de charge
2. Application d'une **simulation** basée sur la méthode de Monte Carlo
3. Calculs de répartition des charges
 - **Analyse de la tension** (V_R) à côté du transformateur HTA/BT sur 24 heures



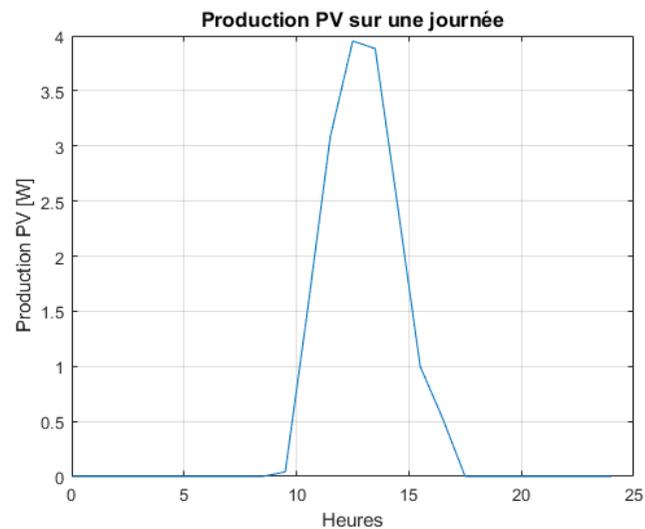
Cas	Foyers équipés de PVs sur le toit [%]	Foyers disposant de bornes de recharge pour VEes [%]
Stagnation	10,3%	33%
Intermédiaire	55,2%	57%
Rupture	100%	81%

Les besoins du réseau de distribution BT

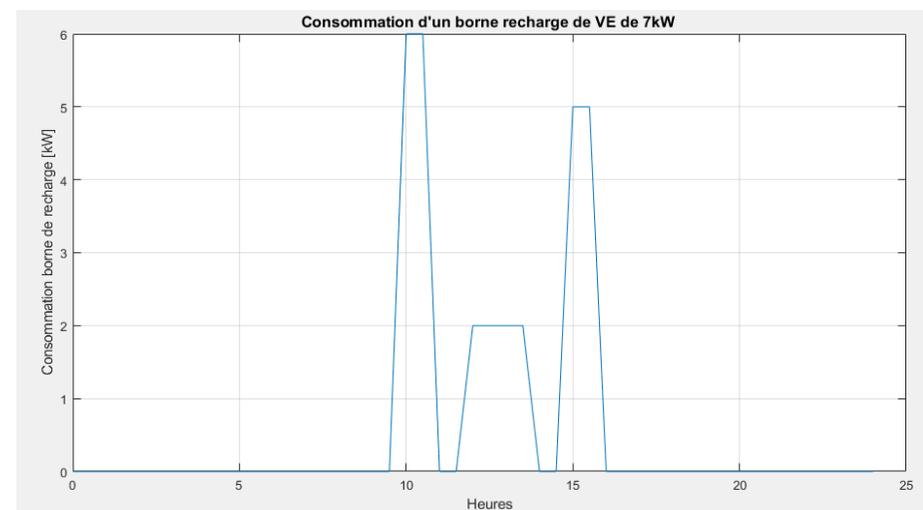
Exemple de courbes expérimentales pour les PV, VE et consommation résidentielle :



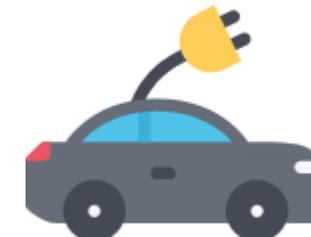
Consommation résidentielle



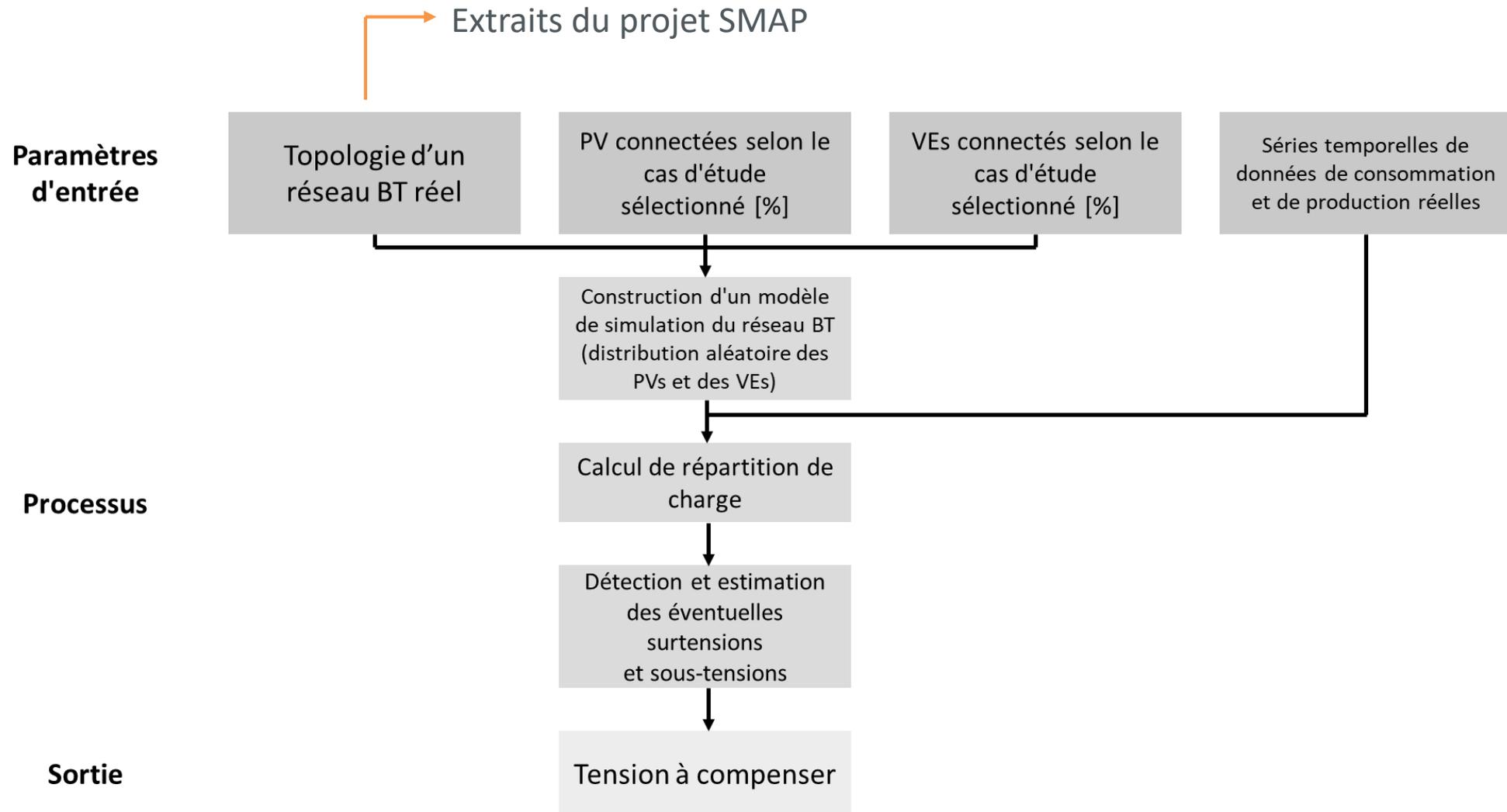
Production PV



Consommation VE



Les besoins du réseau de distribution BT



Les besoins du réseau de distribution BT

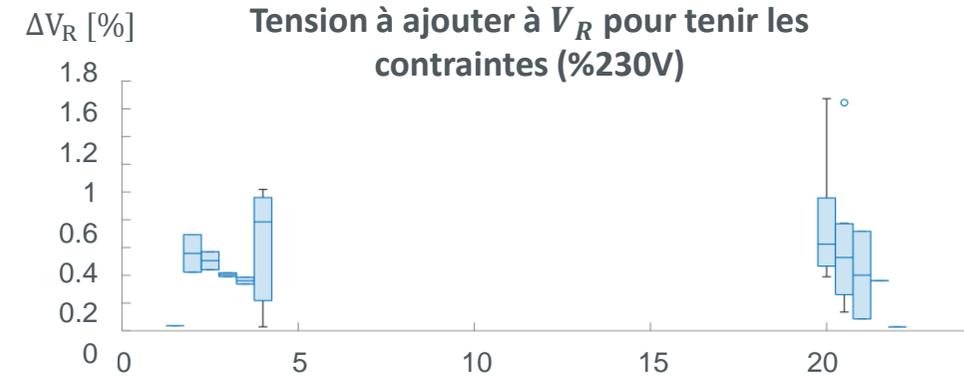
Résultats de simulations pour les trois cas d'études :

Composition du réseau BT testé:

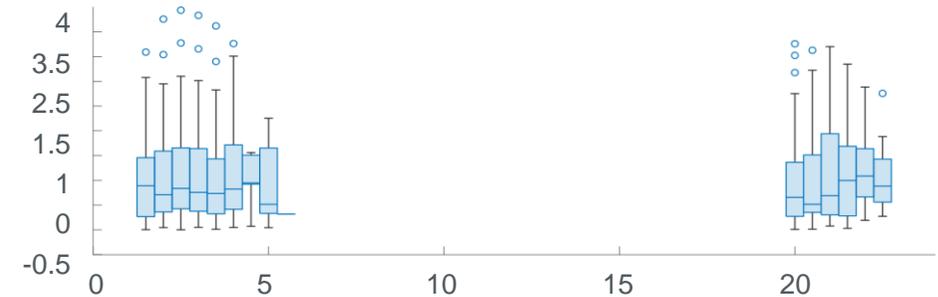
- 58 nœuds
- Poste HTA/BT de 250 kVA

Une compensation de $\pm 2,5\%$ semblerait convenir dans beaucoup de cas.

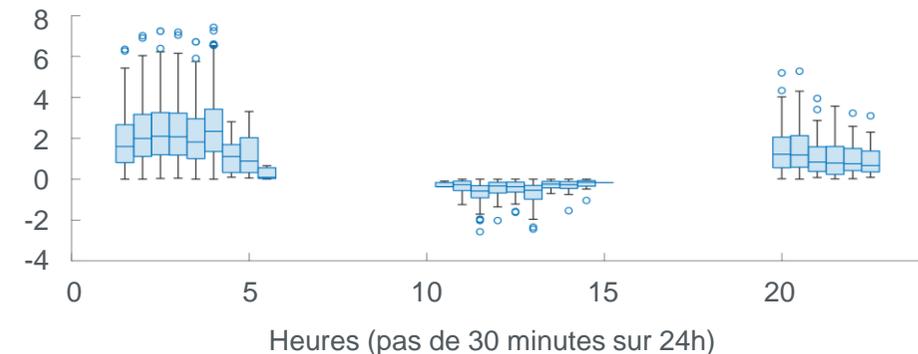
Cas Stagnation



Cas Intermédiaire



Cas Rupture



Méthodes de compensation de tension

Injecter de la puissance réactive



Injecter une tension

Structures EP classiques
(onduleurs de tension)

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

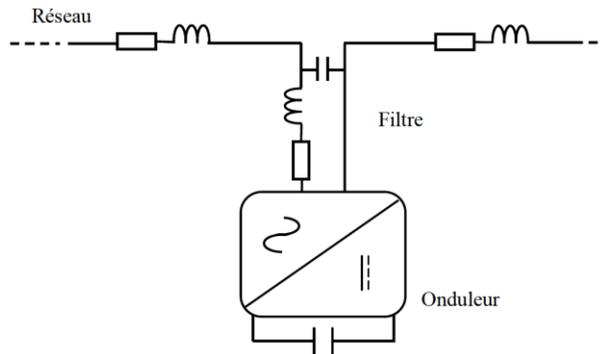


Figure 5 : Onduleur

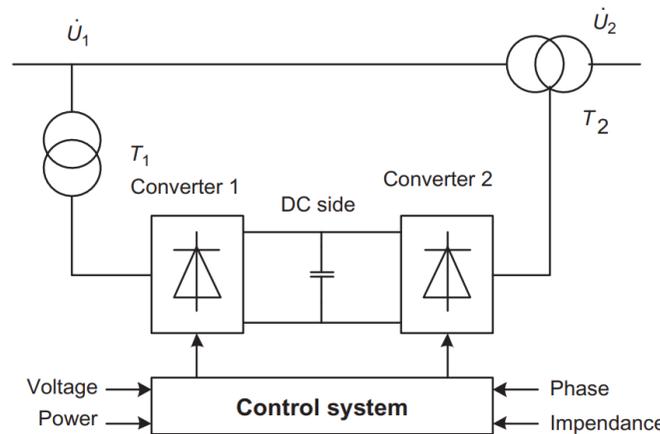
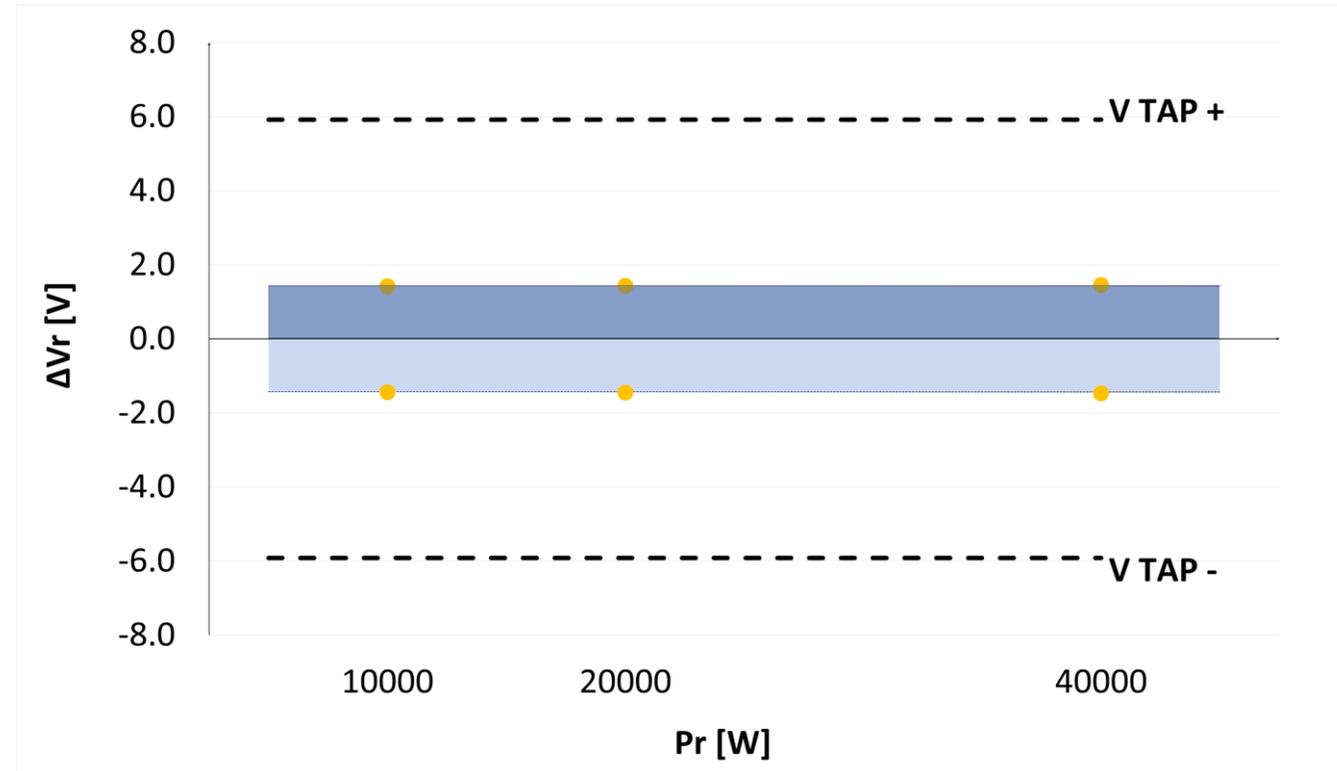
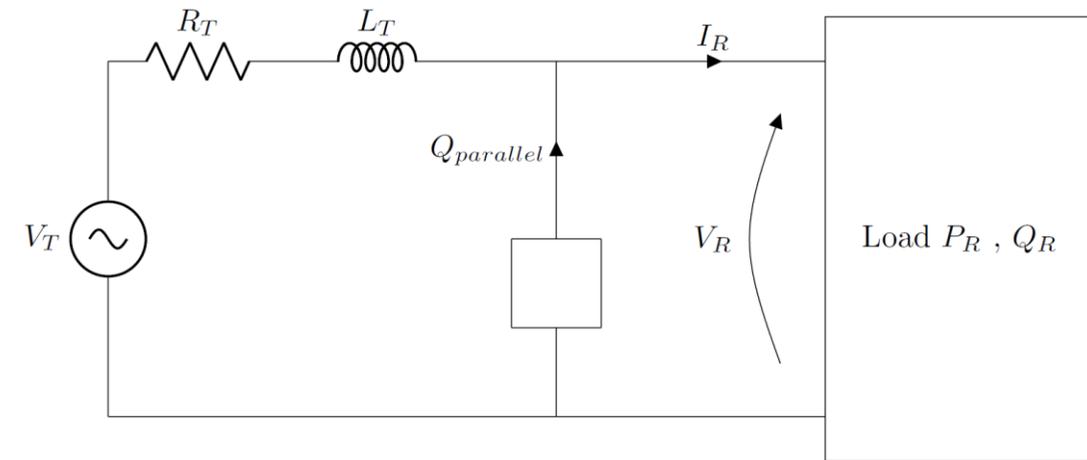


Figure 6 : « Unified Power Flow Controller » (UPFC)

Quelle est la méthode la plus efficace pour régler la tension du réseau BT ?

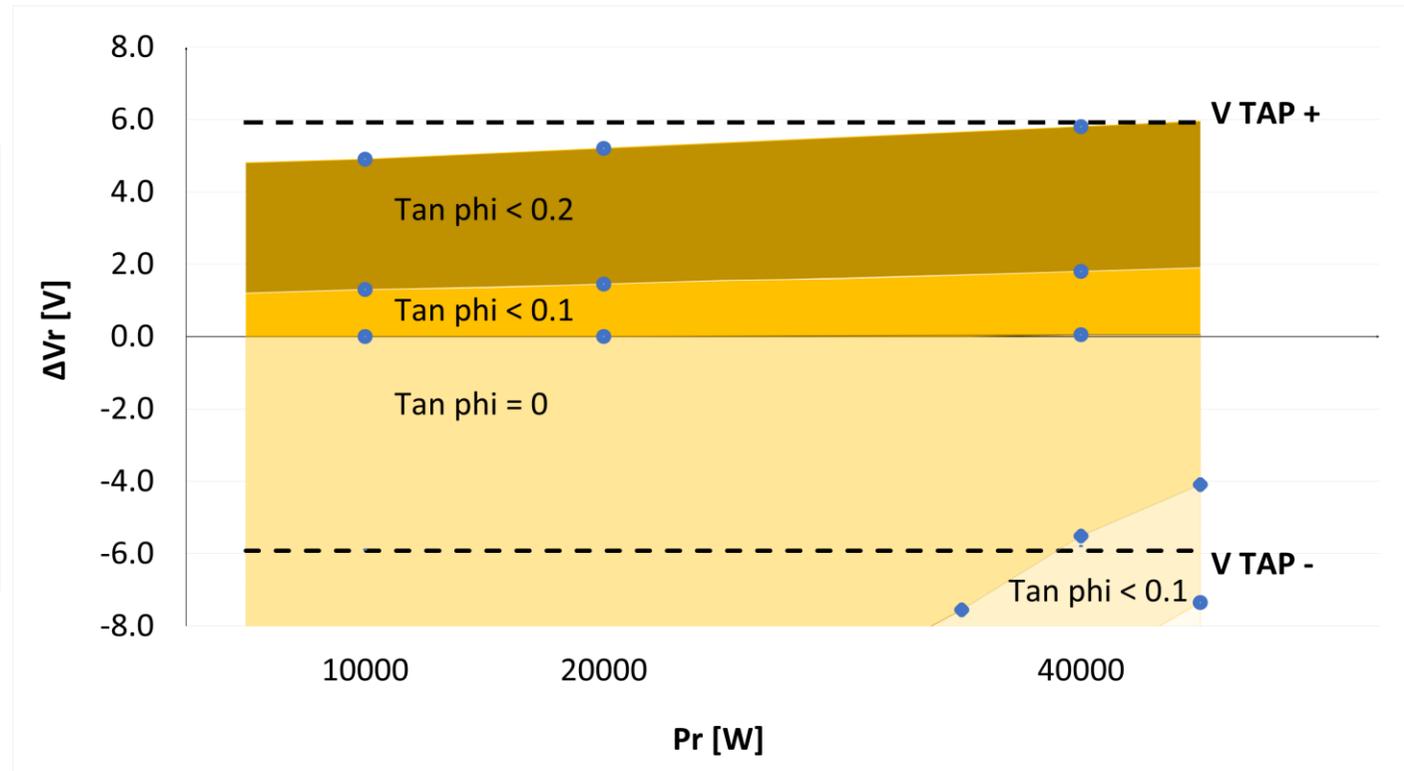
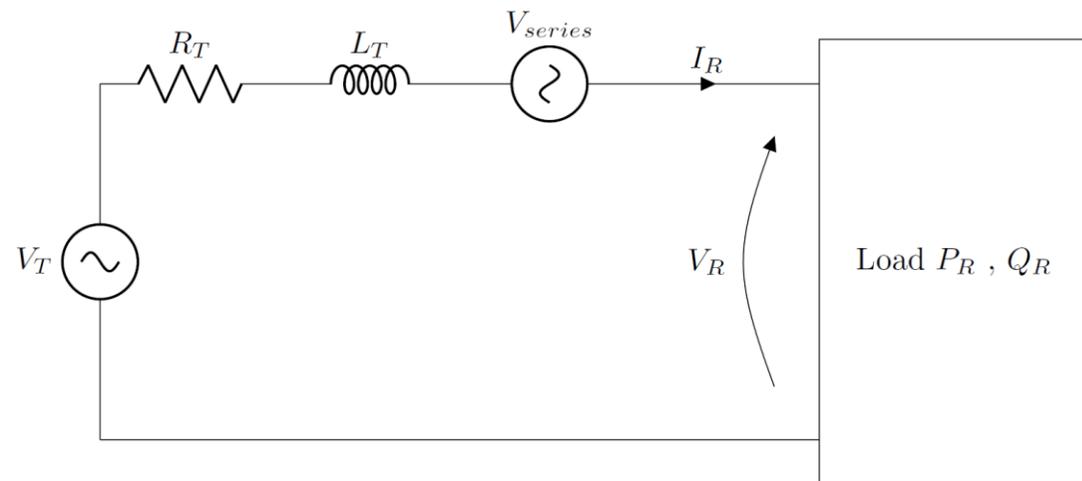
Injecter de la puissance réactive : parallèle



=> Nécessite d'impédance amont importante !

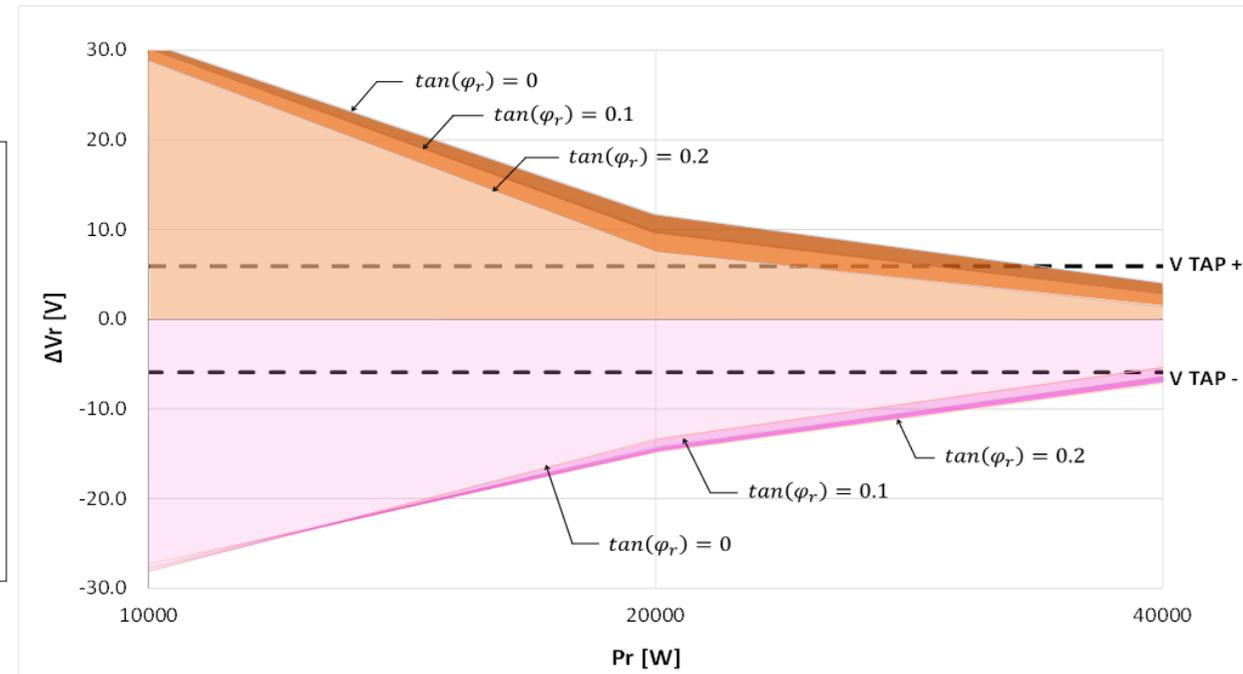
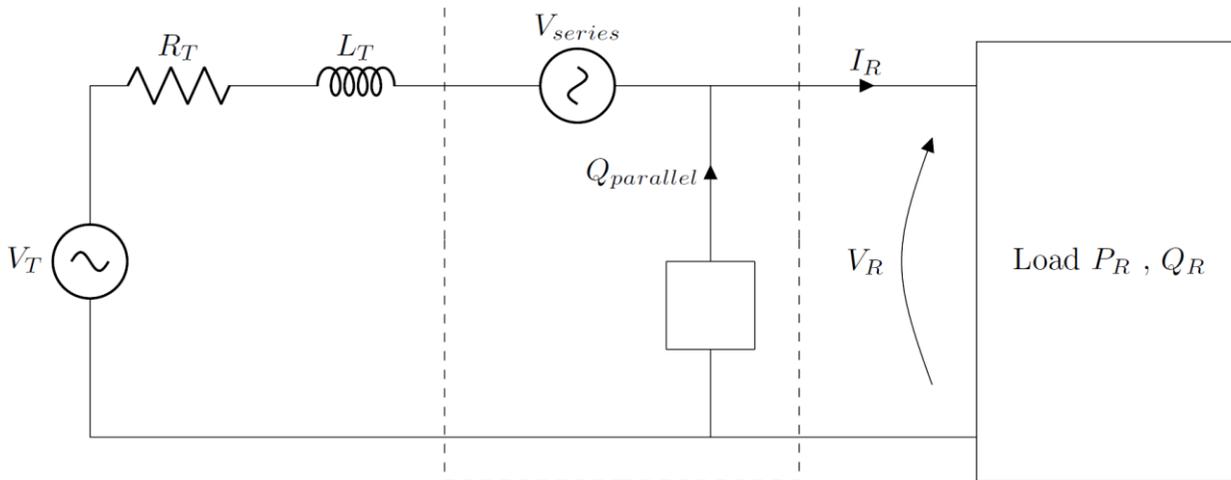
=> Solution potentiellement utilisable en bout de ligne

Injecter de la puissance réactive : série



=> Efficace, mais limite d'efficacité; liée au réactif disponible dans le réseau

Injecter de la puissance réactive : mixte



=> Solution potentiellement utilisable en bout de ligne

Méthodes de compensation de tension

Injecter une tension

(Structure plus proche du principe du régleur en charge)

- Dispositifs composés de **transformateurs ou d'autotransformateurs**
- Dispositifs à base d'**électronique de puissance**
 - Réglage **linéaire**
 - Solution à découpage haute fréquence (HF)
 - Réglage **par « crans »** similaire à un changement de prise (TAP)
 - Solution plus basique et robuste

Qu'est-ce qui existe ?

Dispositifs composés de transformateurs ou d'autotransformateurs

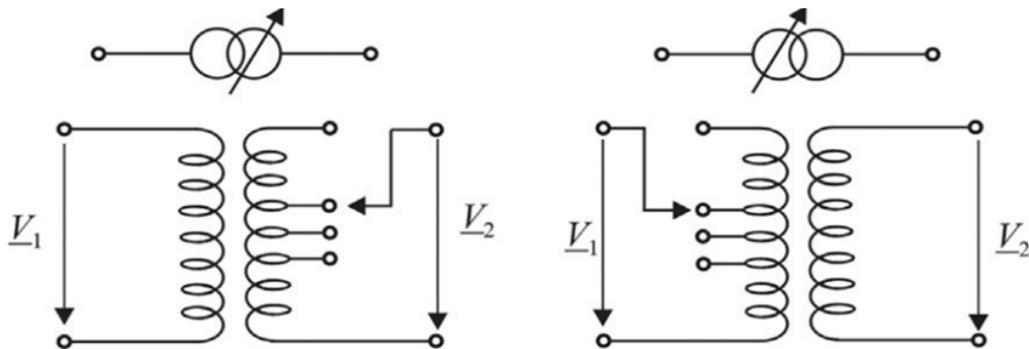


Figure 7 : Régleur en charge ou « On-Load Tap Changer » (OLTC)

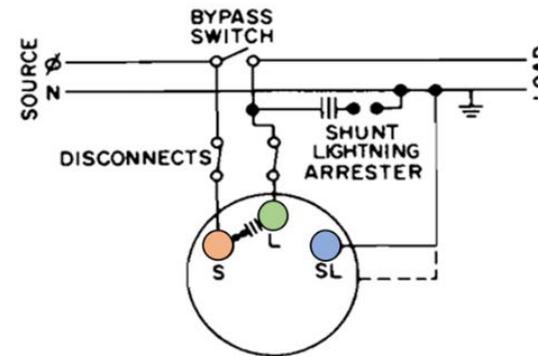
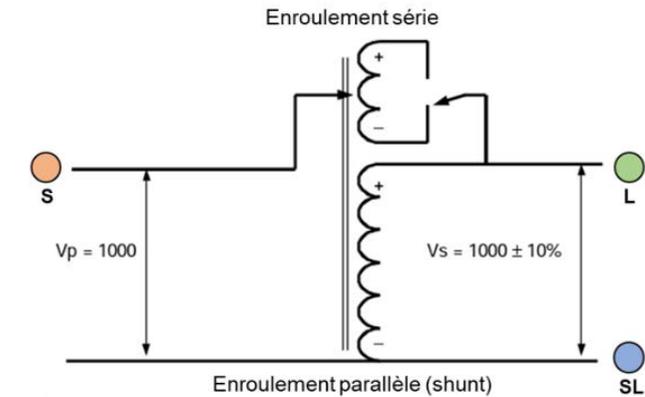


Figure 8 : Step Voltage Regulator



Qu'est-ce qui existe ?

Dispositifs à base d'électronique de puissance

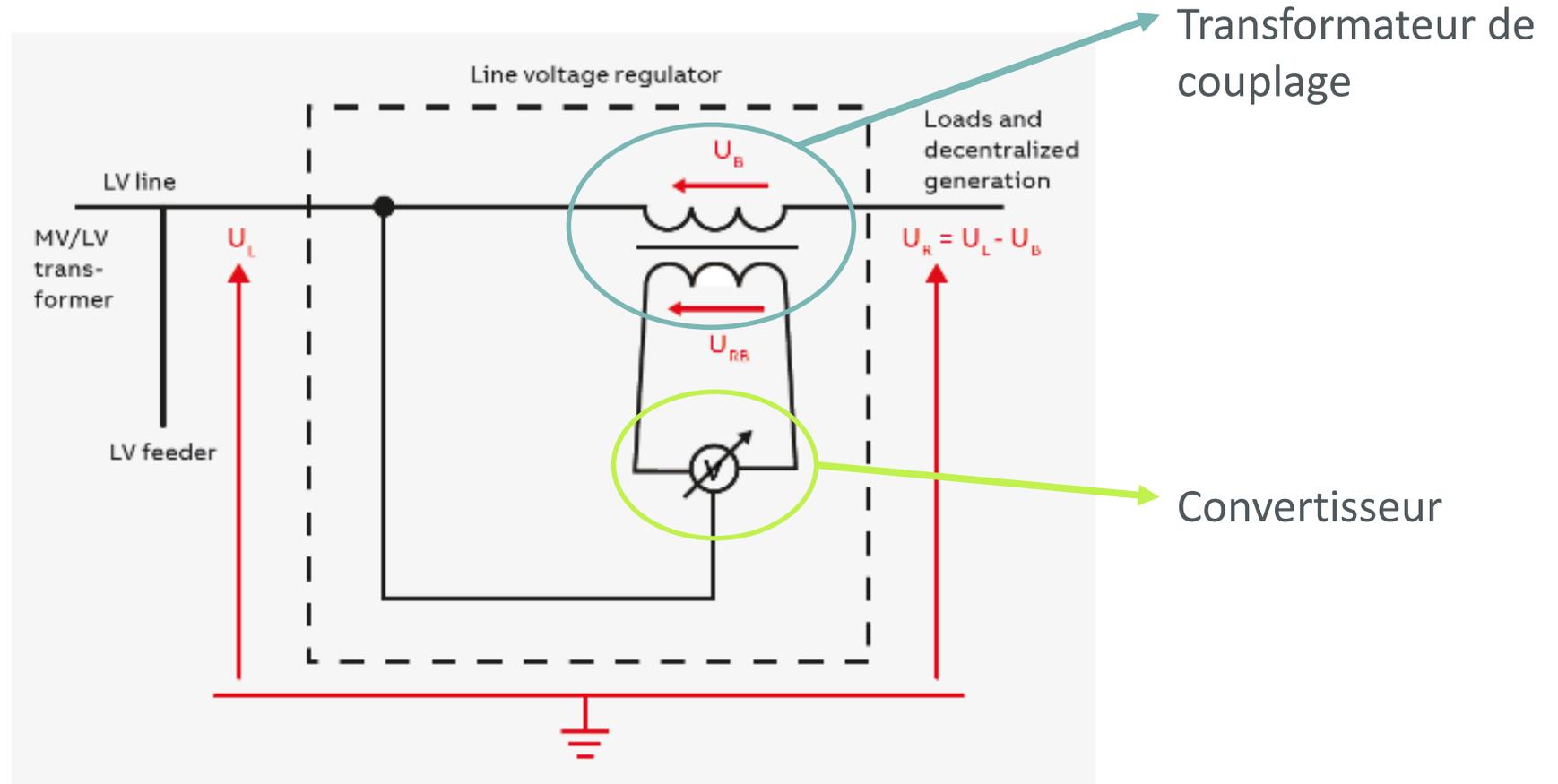
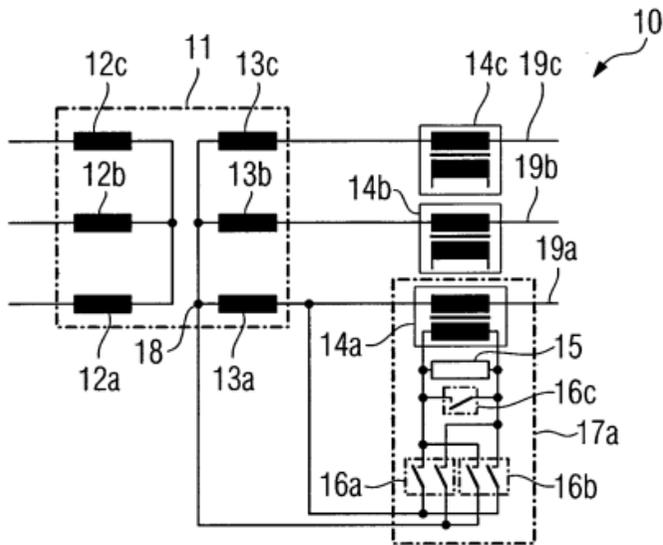


Figure 9 : « Line Voltage Regulator » de ABB

Qu'est-ce qui existe ?

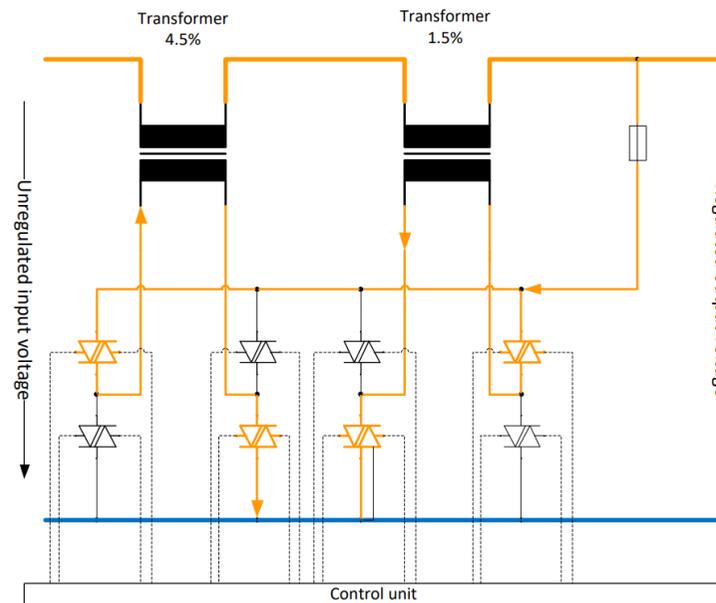
Solutions à base de contacteurs mécaniques



Brevet SIEMENS
(DE 10 2010 040 969 A1)

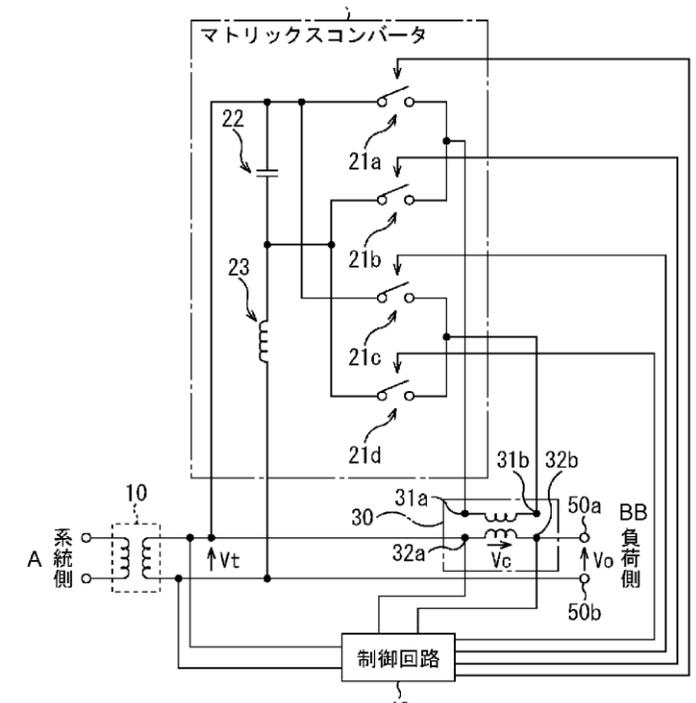
- ⇒ **Courts-circuits** soit des surtensions
- ⇒ Présence d'un parasurtenseur pour les commutations

Solutions à base de Triacs



LVRsyst de A. Eberle GmbH
⇒ Commande des **TRIACS**
commande à l'amorçage uniquement

Solutions à base de IGBTs



Brevet Université Kagoshima
(WO 2007 / 108427)
⇒ découpage HF **perturbations CEM**

Qu'est-ce qui existe ?

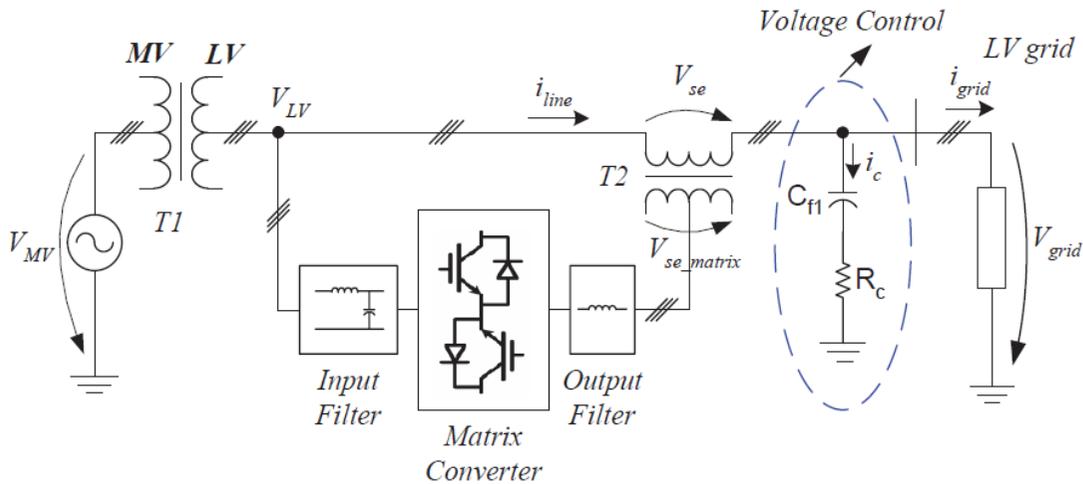


Figure 10 : Convertisseur Matriciel au réglage linéaire

- ⇒ Permet de moduler l'onde de tension basse fréquence (BF) afin de générer une tension de valeur efficace variable
- ⇒ Basé sur des semi-conducteurs et ne nécessitant qu'un **minimum d'éléments passifs**
- ⇒ Connexion **direct** sans bus intermédiaire
- ⇒ Volume attribué au transformateur de couplage BF

⇒ Et si on n'avait pas besoin de commuter tout le temps ?

⇒ Et si on pouvait assurer des transitions à zéro de courant pour avoir moins de pertes ?



Conclusion sur les méthodes de réglage de tension

Le réseau de distribution BT a un **ratio R/X plus élevé** que les réseaux moyenne tension.

Injecter de la puissance réactive X Injecter une tension

- Commande parfois complexe
- Peut-être volumineux
- Besoin de filtres CEM
- Synchronisation au réseau
- **Plus efficace en bout de ligne**

- **Commande peut être simplifié**
- Volume lié plutôt au transformateur BF
- Pas obligatoire filtres CEM
- **Pas obligatoire synchronisation au réseau**
- Peut être placé partout dans le réseau



1. Introduction

2. Les besoins du réseau

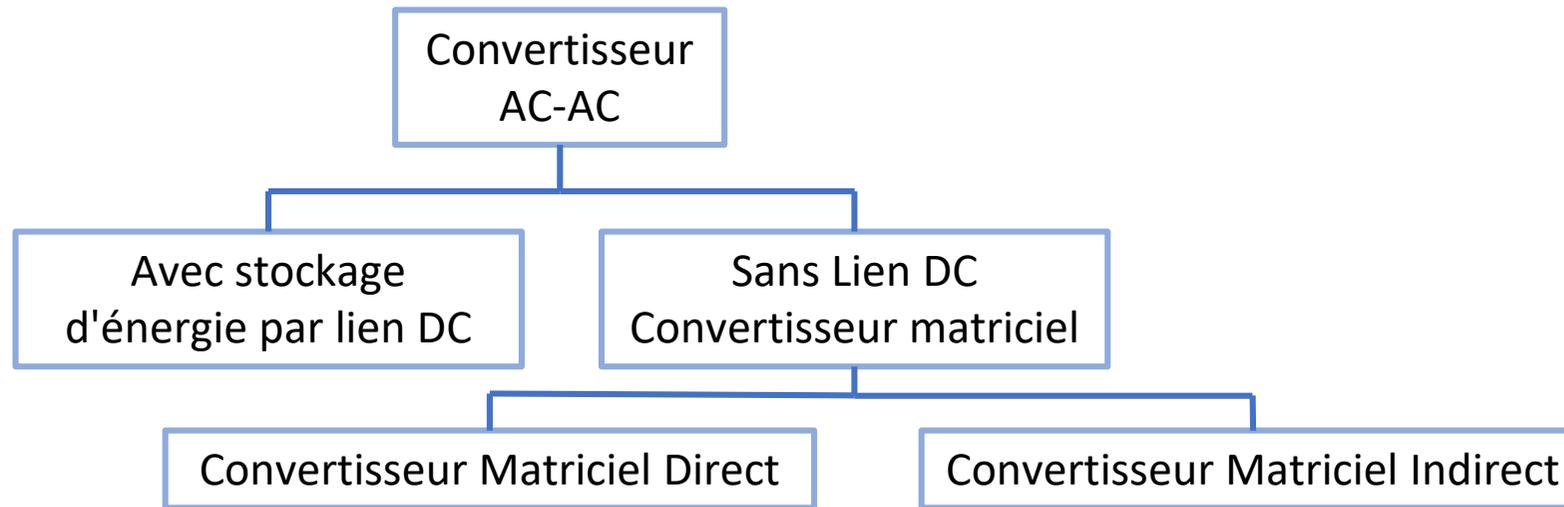
3. Le convertisseur matriciel

4. Implémentations Pratiques

5. Conclusions et Perspectives



Le convertisseur matriciel



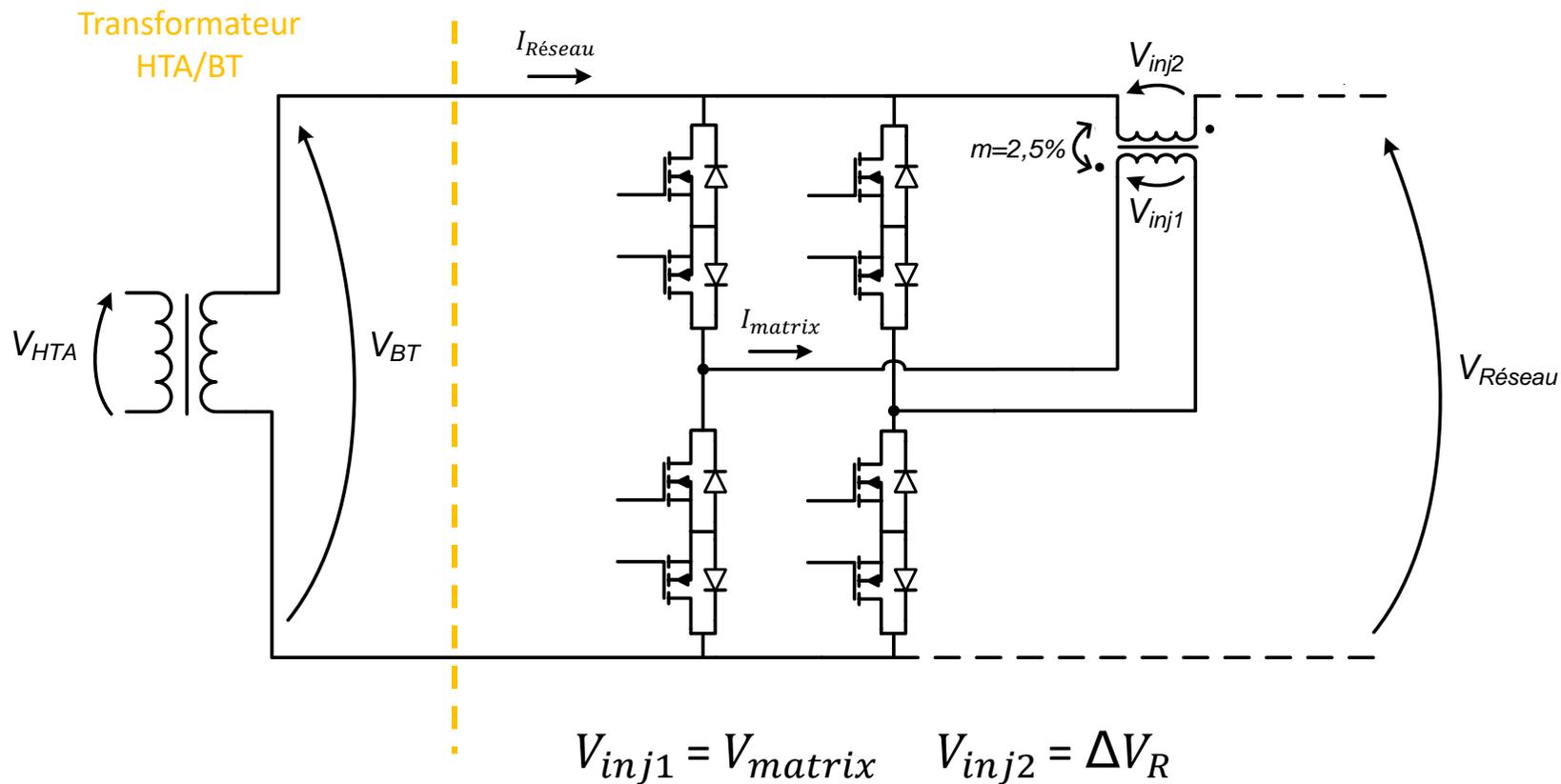
Le lien DC :

- Réduction des ondulations de tension
- Stockage de l'énergie
- Suppression des pics en cas de transitoires lors de la commutation
- Volume total de la structure
- Coût
- Durée de vie du condensateur
- Nécessité de loi de contrôles pour asservir la tension du bus intermédiaire

Le convertisseur matriciel

Structure de conversion AC/AC

Convertisseur matriciel monophasé relié au réseau par un transformateur BF avec des interrupteurs bidirectionnels



Composants

Interrupteurs

- Cette structure a besoin d'**interrupteurs quatre quadrants**
- Des ordres de commande différents par interrupteur
 - Plus de possibilités pour exploiter les **diodes**, commande simplifiée
- Source commune
 - Possibilité d'utilisation d'**un seul gate driver**

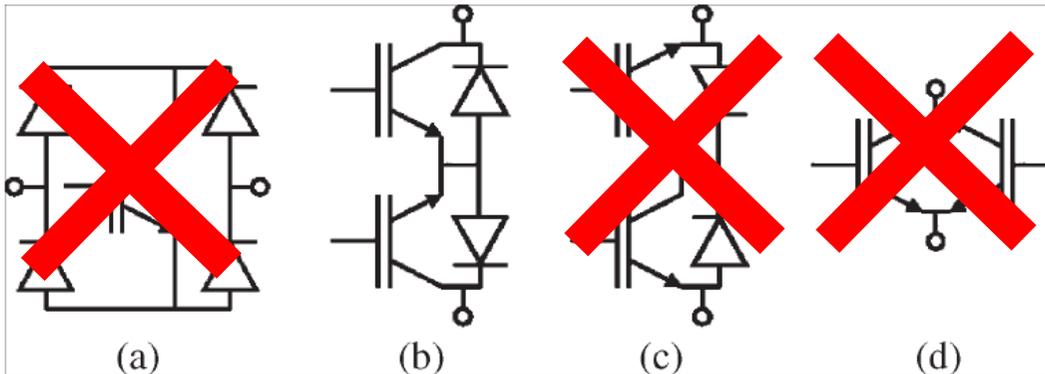
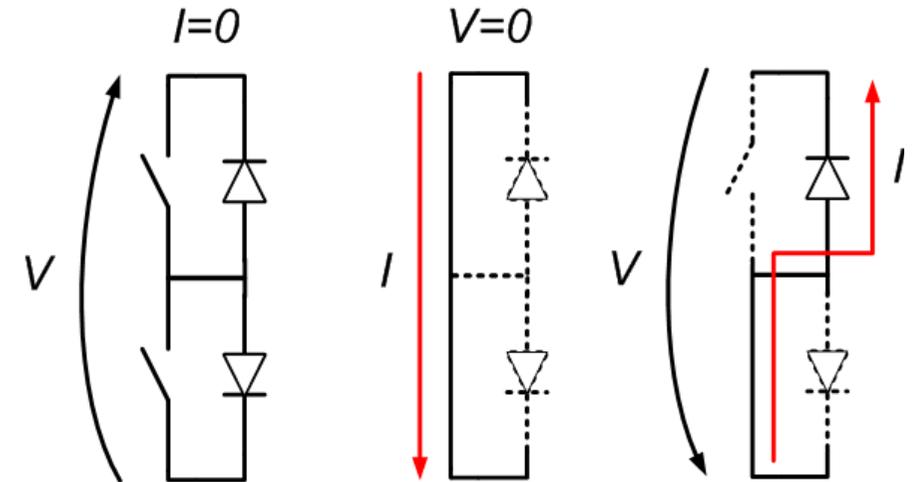
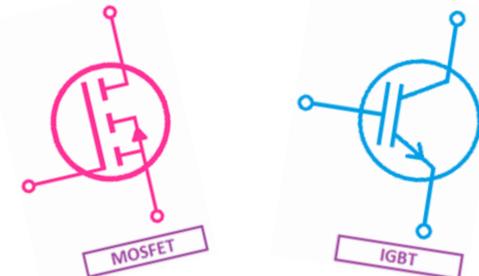


Figure 11

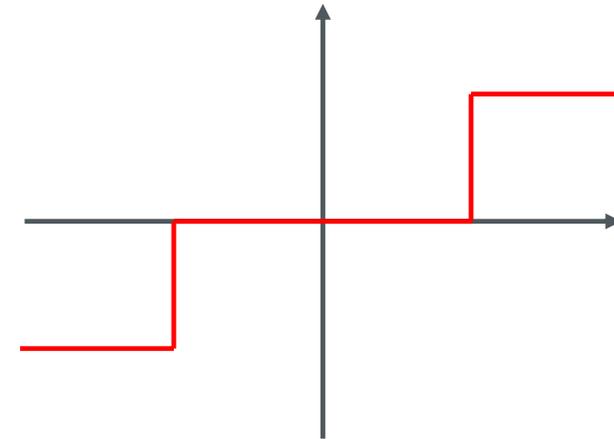
MOSFET X IGBT ?



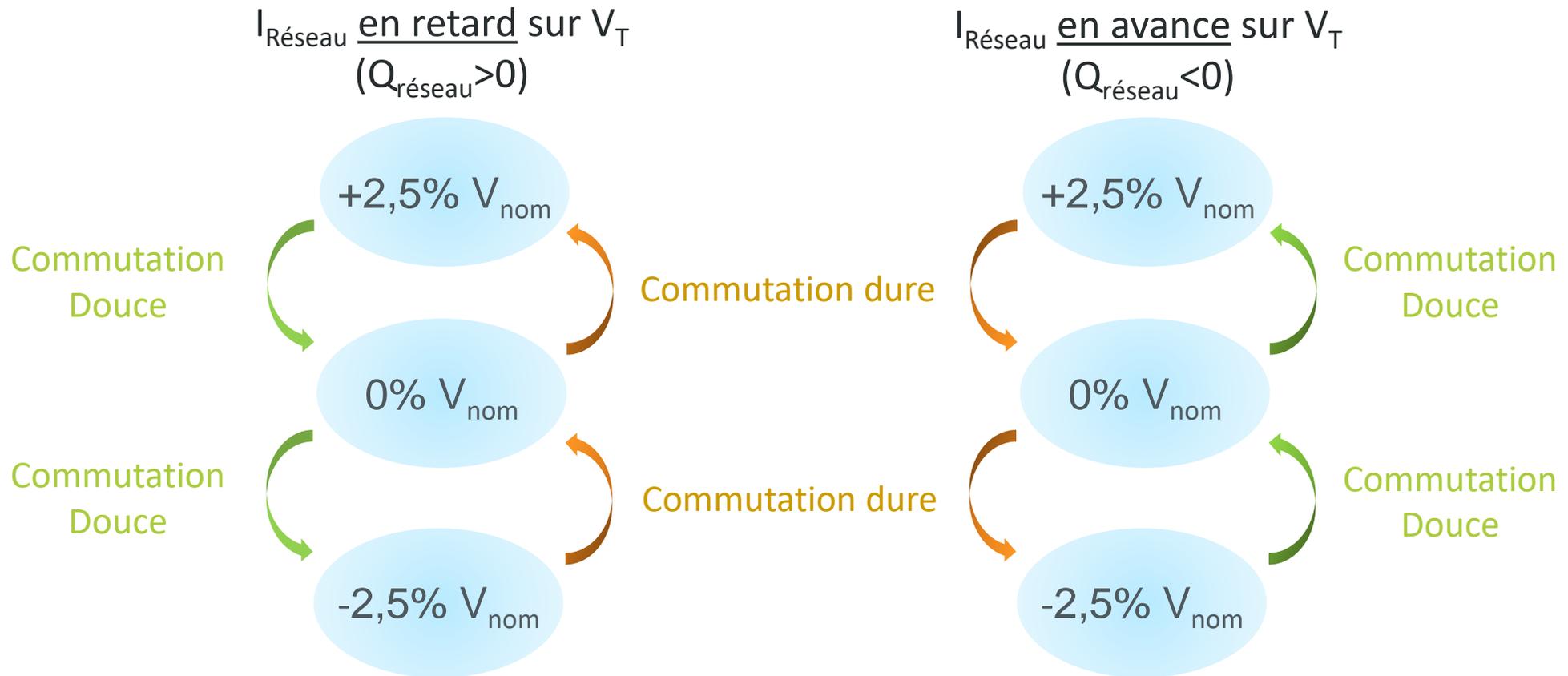
Stratégie de commande

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

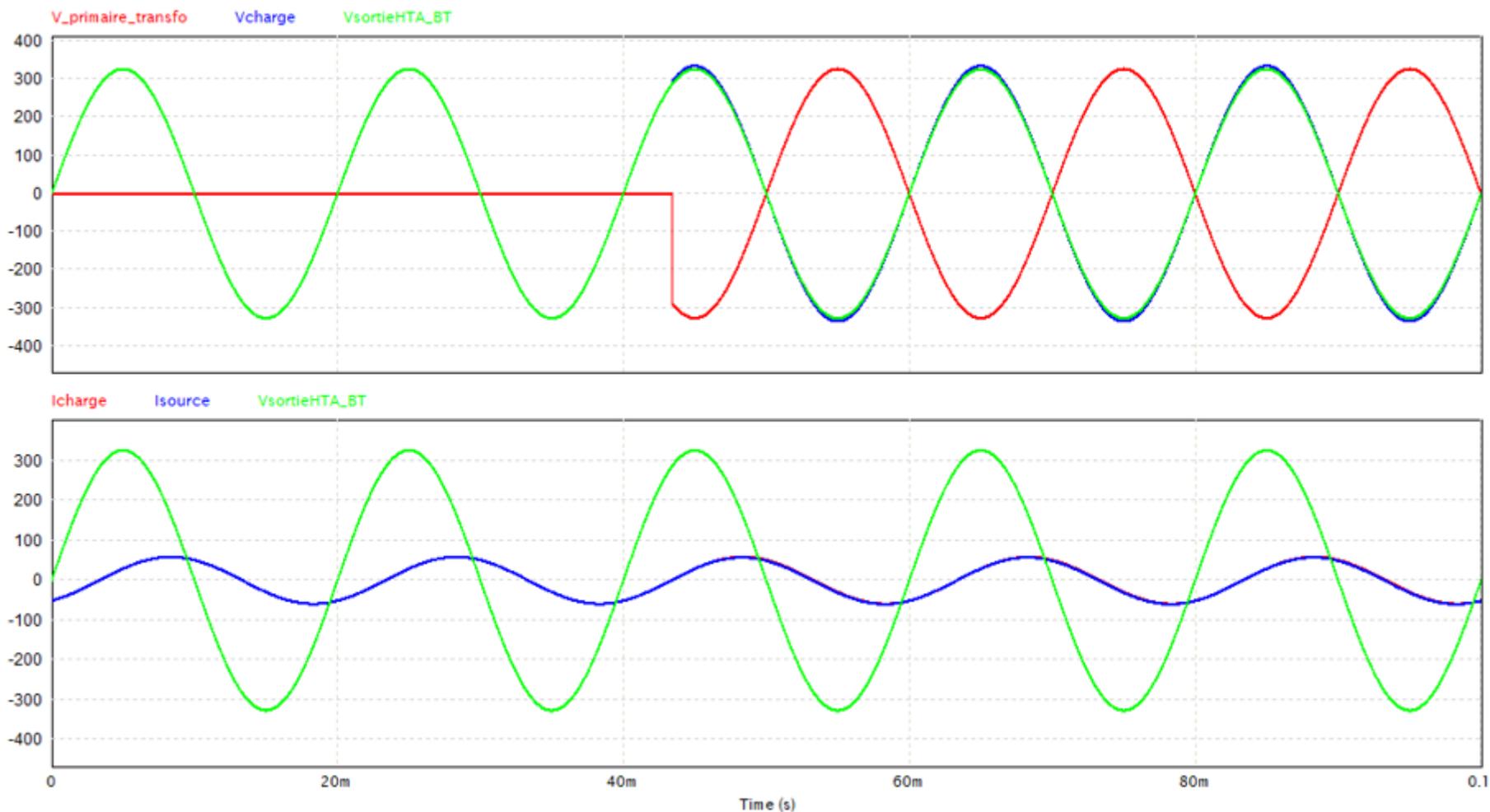


Commutation en mode « TAP classique »



Si la commutation sera dure ou douce **dépend de $I_{\text{Réseau}}$ et de l'état des interrupteurs** au moment précédant la commutation

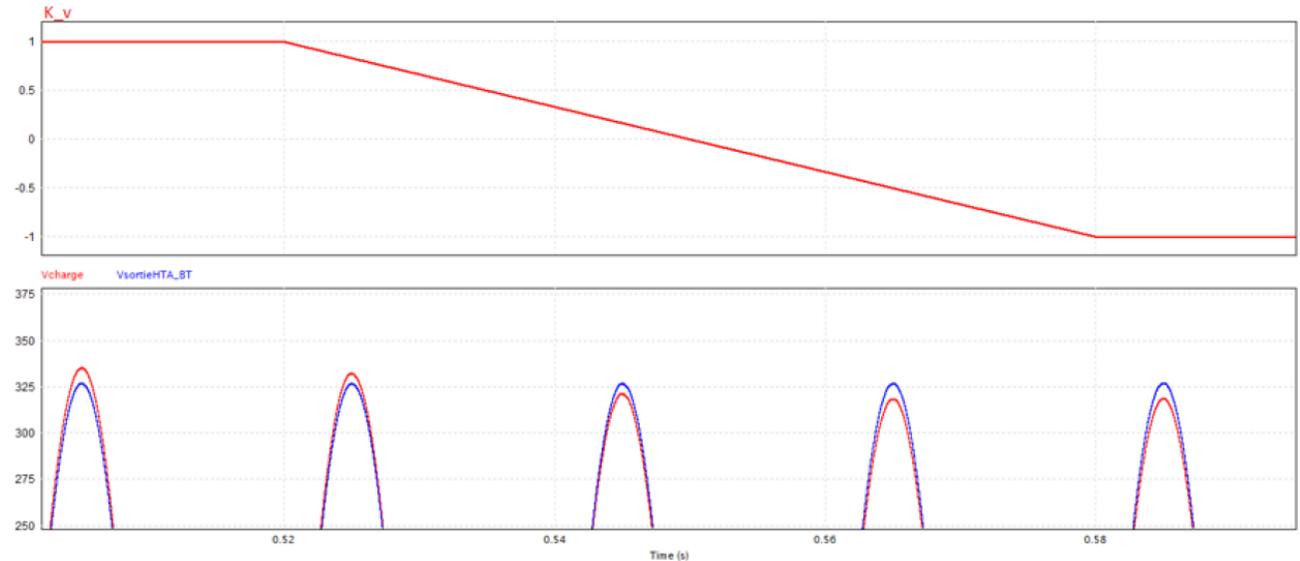
Simulation du mode « TAP classique »



La tension à la sortie du convertisseur passe de 0 à 230V et cette tension au secondaire du transformateur correspond à 5,75V (2,5% de 230V)

Mode d'opération en « réglage continu »

- Emploi de la **MLI**
- Passage entre états de tension se fait par la variation du **rapport cyclique**
- Découpage **HF**
- **Réglage fin** de la tension
- **Commutations dures** seulement
- Besoin de **filtres**



Quel est l'intérêt ?





1. Introduction

2. Les besoins du réseau

3. Le convertisseur matriciel

4. Implémentations Pratiques

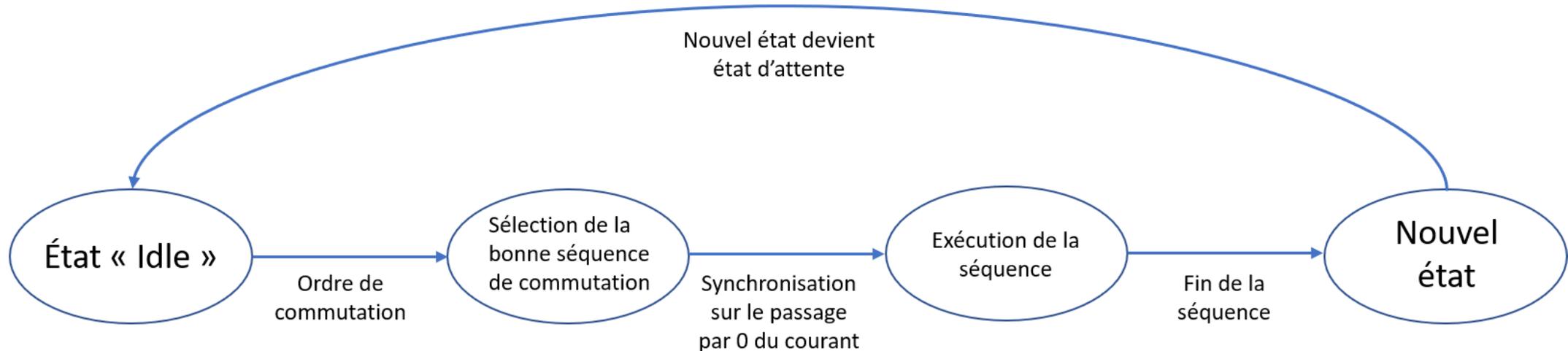
5. Conclusions et Perspectives



Contrôle du convertisseur par une machine à états

Fonctions de la machine à états dans le mode de fonctionnement « Tap Classique » :

- **Prédiction** du front descendant du courant ;
- **Sélection des états** de commutation possibles ;
- Sélection du type de changement d'état des interrupteurs ;
- Commande d'**exécution du changement d'état**.



Banc d'essai

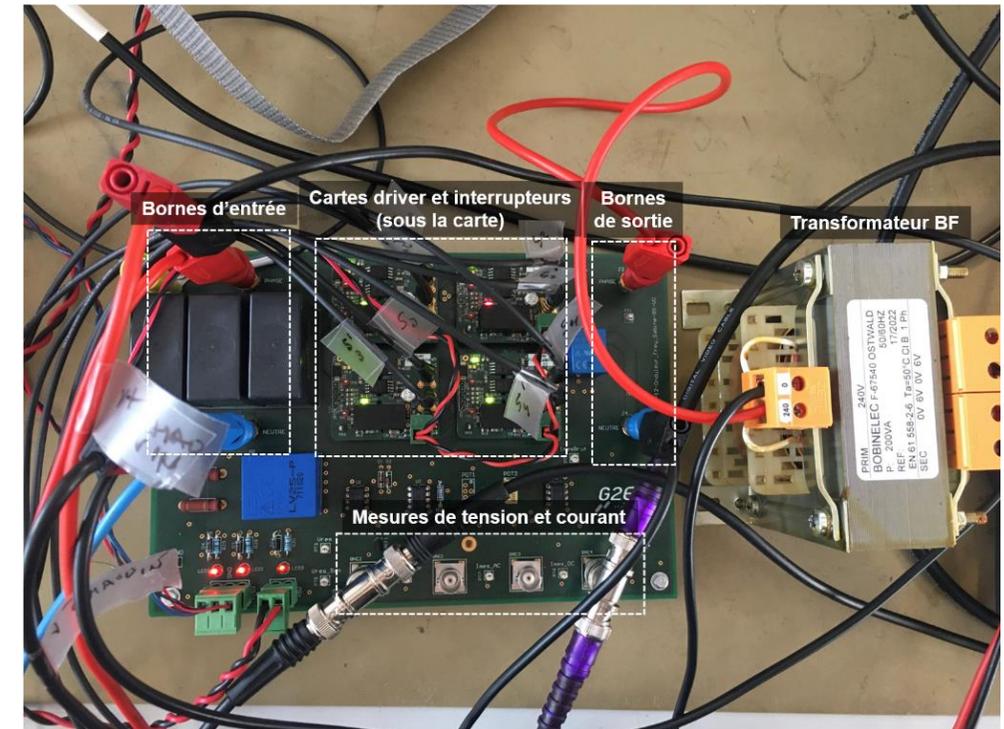
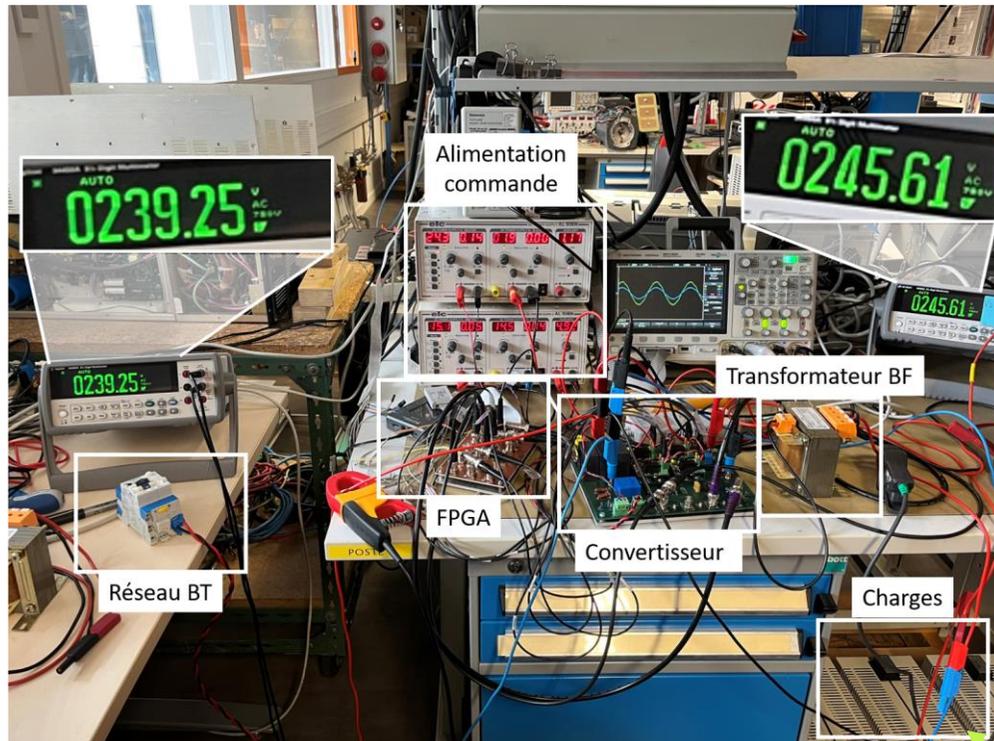
Prototype réalisé

Dispositif monophasé

Puissance Transformateur : 200VA

Courant de ligne max : 32A

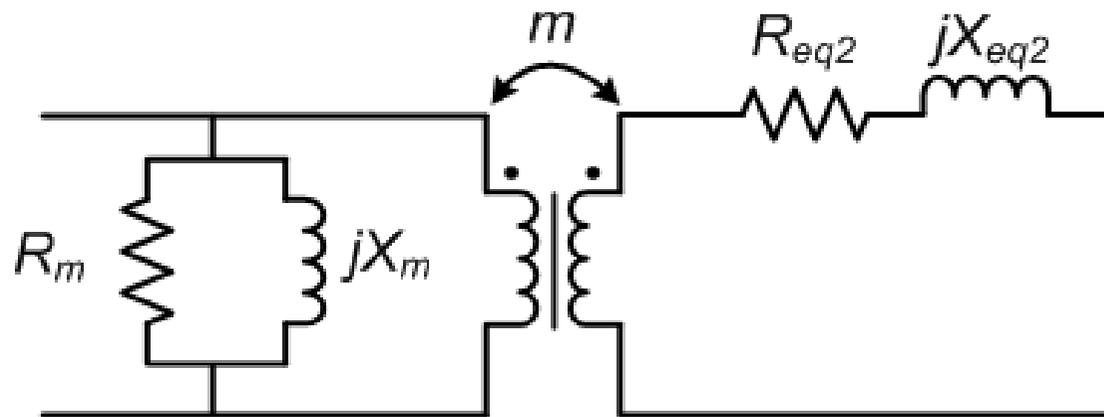
- Mesure des tension et courant du convertisseur
- Contrôle embarqué dans une carte FPGA
- Synchronisation sur les passage par zéro de courant



Charge R et L ($0 < \tan(\varphi) < 0,4$)

Caractérisation du transformateur de couplage

Détermination de l'impédance d'insertion du système dans le réseau



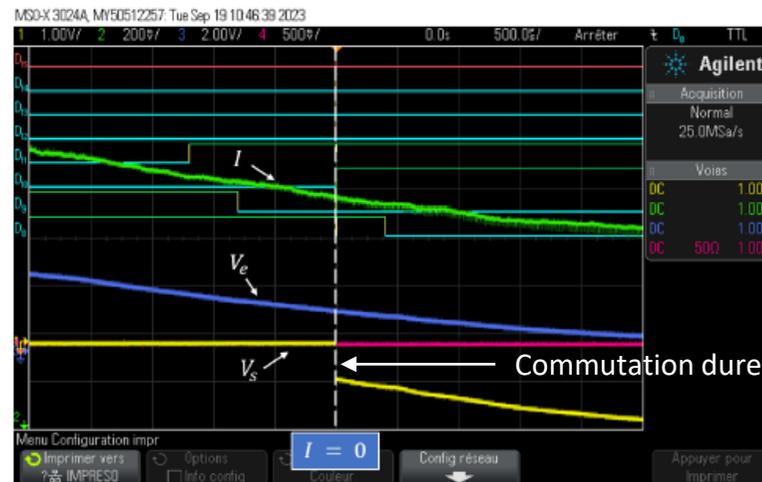
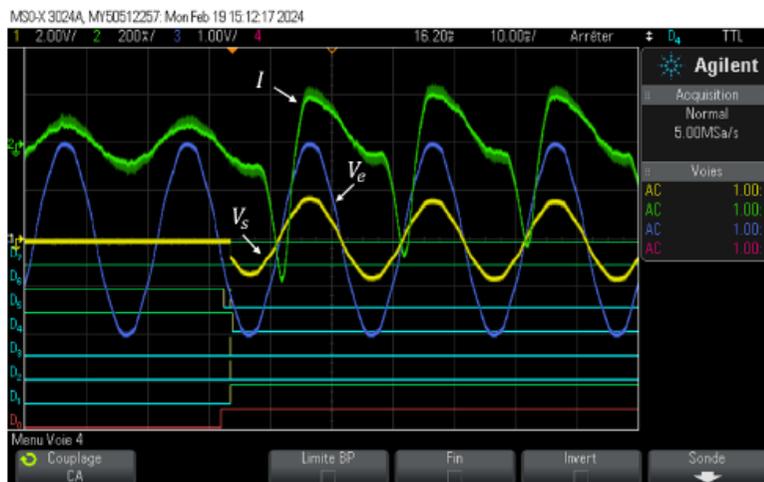
$$R_{eq2} = 15,4 \text{ m}\Omega$$

$$L_{eq2} = 5,4 \text{ }\mu\text{H}$$

Modèle équivalent de transformateur ramenée au secondaire

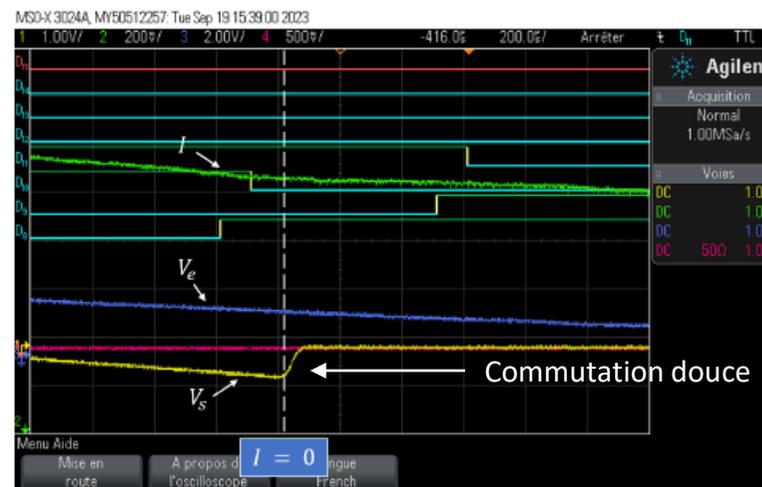
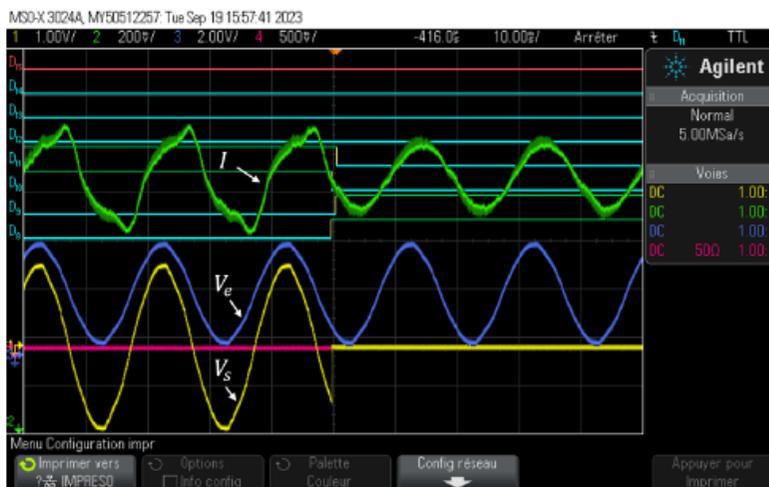
Analyse des commutations

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



Attente pour le changement de signe de I

Analyse des commutations

Robustesse vis-à-vis de la désynchronisation

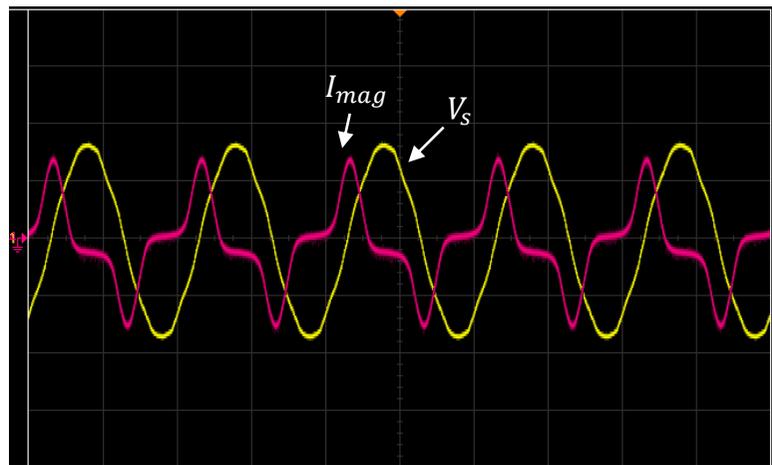
Changement de signe du courant pendant commutation dure 0 à +2,5%



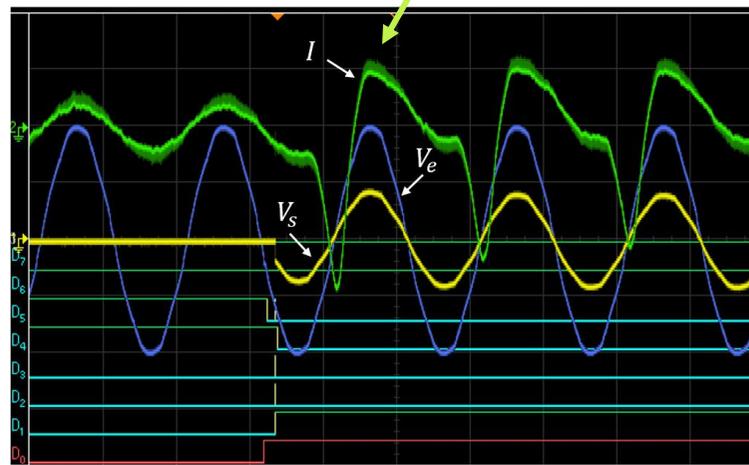
- Séquence de commutation lancé
- Trois « commutations »
- État final obtenu est celui attendu
- Pas de perturbations
- Pas de sur-contraintes sur les interrupteurs

Performances du système

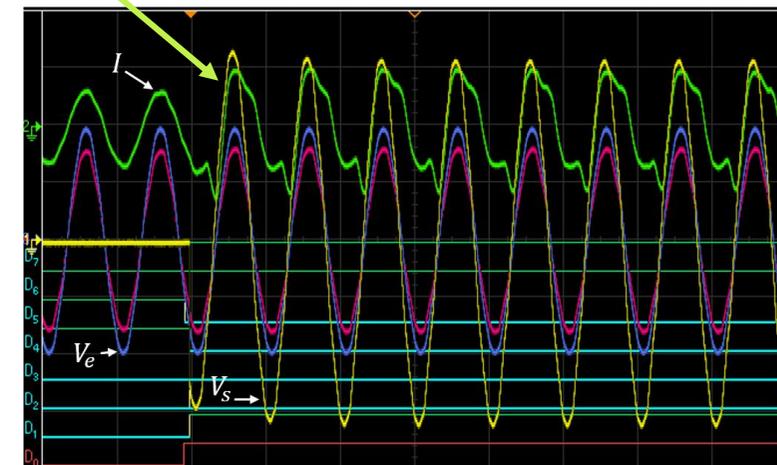
L'impact du courant magnétisant



Courant magnétisant



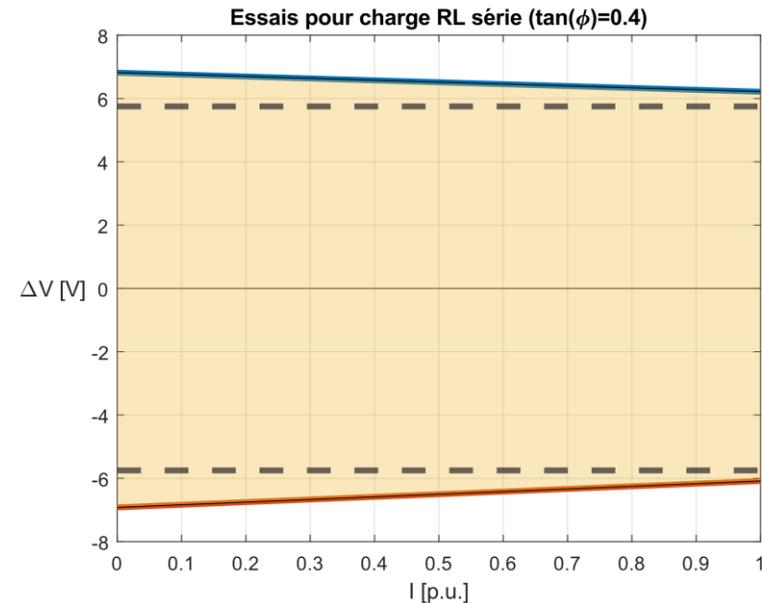
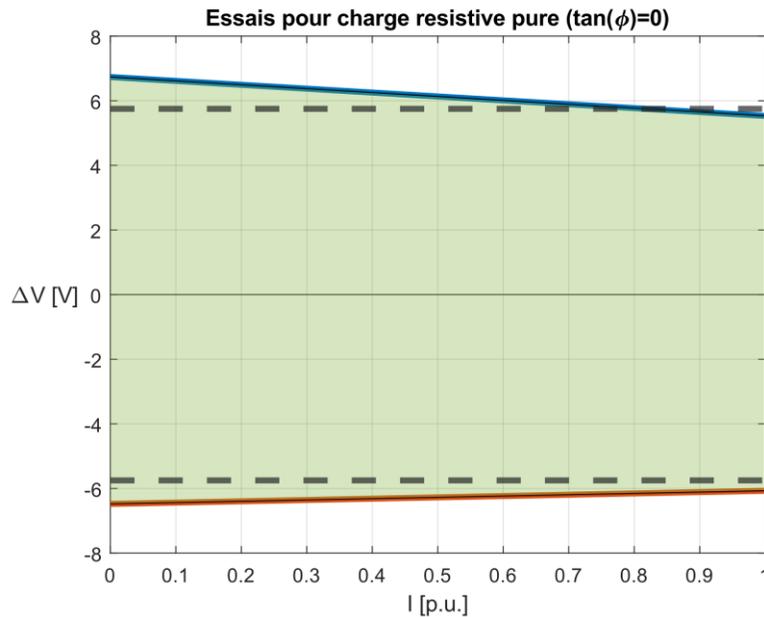
Transition 0 à +2,5%
Commutation proche
du **courant nul**



Transition 0 à +2,5%
Commutation proche
de la **tension nulle**

Performances du système

Capacité de compensation en relation à la puissance transitée

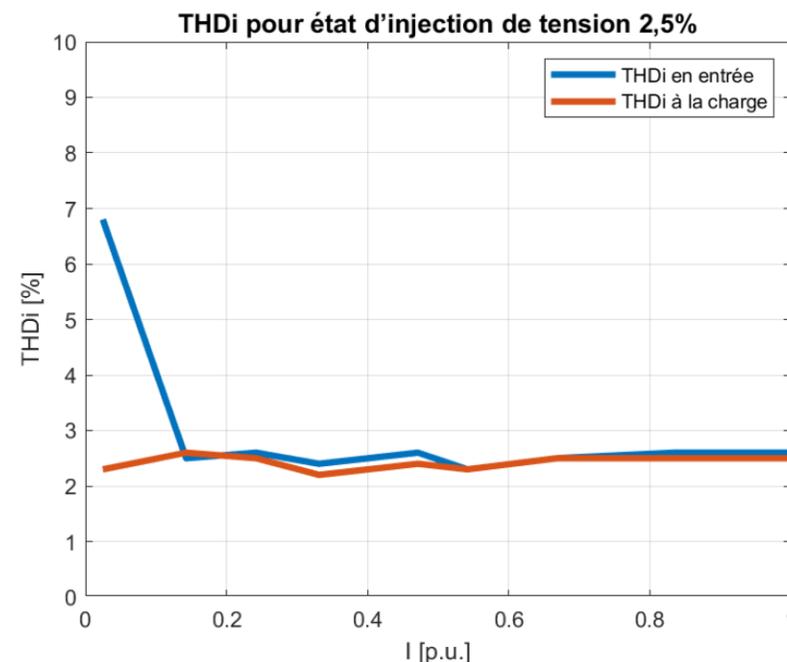
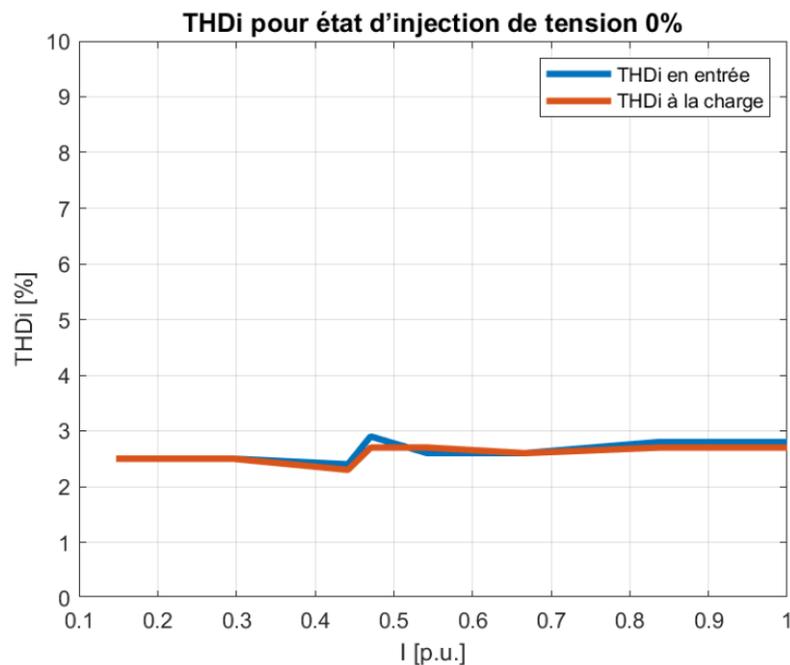


- Les performances en compensation sont tenues
- Pertes de performance liés aux impédances série du transformateur
- Résistance série un peu élevée => Optimisation du transformateur

$R_{eq2} = 15,4 \text{ m}\Omega$
 $L_{eq2} = 5,4 \text{ }\mu\text{H}$ (1,7mΩ à 50Hz)

Performances du système

Perturbations induites



Très légère dégradation du THDi à **basse puissance** liée au courant magnétisant du transformateur

Performances du système

Rendement pratique pour une charge résistive

État de l'injection de tension	Plage de variation du rendement [%]
État 0%	$94,1 \leq \eta \leq 100$
État +2,5%	$95,6 \leq \eta \leq 100$
État -2,5%	$92,3 \leq \eta \leq 100$



1. Introduction

2. Les besoins du réseau

3. Le convertisseur matriciel

4. Implémentations Pratiques

5. Conclusions et Perspectives



Conclusions

Réseau :

- **Analyse des réseaux** nous a permis de **comprendre les problématiques** qui pèsent sur le réseau distribution BT dans le contexte de **forte insertion de PVs et VEs**
- Le contexte dans lequel le régulateur de tension est le **plus utile** est celui des **réseaux ruraux**, où il y a des **lignes plus longues** qui provoquent des **chutes de tension** significatives et où il y a plus de consommateurs avec des PV
- **Dispositif de réglage de tension** proposé comme **solution à court terme** pour éviter/reporter le renforcement du réseau

Conclusions

Électronique de puissance :

- La solution d'injection de puissance réactive en **série** a montré son efficacité pour **baisser la tension**
- La solution d'injection de puissance réactive en **parallèle** peut être potentiellement utilisé en **bout de ligne**
- La **maitrise des commutations** du convertisseur matriciel 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

Perspectives

- Compensation limitée par l'impédance d'insertion => **Optimisation du design du transformateur**, la section de câble et mode de bobinage
- Le **découplage entre convertisseur et réseau** est envisageable en cas de défaut => Saturation du noyau magnétique du transformateur de couplage comme un moyen de découpler le système.
- **Interrupteurs mécaniques** peuvent être envisagés en parallèle des semiconducteurs pour éviter une sur sollicitation des semi-conducteurs en **régime permanent**
 - Les **semi-conducteurs** assurent la **transition** ;
 - Les interrupteurs mécaniques se ferment une fois la transition réalisée.
- Étude du convertisseur DAB AC-AC, dont l'intérêt est la **réduction du volume**
- Étude par simulation HIL de la **dynamique** d'interaction entre le **réseau** et un **convertisseur** inséré en série
- Analyse **coût-bénéfice** pour comparer les avantages de la structure développée aux options existantes sur le marché



Contributions

Brevet n° FR2307758

« Réglage de tension en aval de transformateur »

Articles de conférence internationale :

S. Vieira Reinert Frello et al., "**Sizing of a power electronics-based voltage regulating device to support the integration of photovoltaics and electric vehicles in LV grids,**" 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Rome, Italy, 2023.

S. Vieira Reinert Frello et al., "**Comparative study of voltage regulation in distribution grid based on power electronic devices connected on the LV side of the MV/LV transformer,**" 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Denmark, 2023.



Merci de votre attention !





Merci de votre attention !