

Emplacement Optimal de Réactances Variables en Shunt Combiné à une Reconfiguration Simplifiée des Réseaux de Distribution Électrique

Aghyles GRAINE^{1,2}
Jean-Paul GAUBERT¹
Didier LARRAILLET²

¹Université de Poitiers, LIAS, 86000 Poitiers, France

²SRD, 86000 Poitiers, France

RESUME – Avec l’intégration accrue des Énergies Renouvelables (EnR) dans le réseau de distribution (RD), des surtensions peuvent apparaître sur ce dernier. Dans cet article, deux méthodes sont utilisées simultanément pour résoudre ce problème : (i) la reconfiguration du réseau, qui consiste à modifier l’état des différents interrupteurs dans le but d’obtenir une nouvelle topologie, est utilisée dans une version simplifiée, et (ii) l’utilisation de Réactance Variable en Shunt (RVS), dont nous déterminons l’optimalité en termes d’emplacement, mais aussi en termes de puissance réactive qu’elles consomment. La méthode proposée est évaluée à travers un réseau IEEE 33-bus modifié. Les résultats obtenus confirment l’intérêt de la méthode simplifiée proposée, réduisant de manière très conséquente le temps de calcul, tout en obtenant exactement la même solution que la méthode sans simplification en ce qui concerne l’emplacement des RVS.

Mots-clés – Reconfiguration des réseaux de distribution, Optimisation des réseaux électriques, Réduction des pertes, Énergies renouvelables, Smart grids, Emplacement optimal des réactances variables en shunt, Complexité computationnelle réduite, Convergence accélérée.

1. INTRODUCTION

L’augmentation du taux de pénétration des Énergies Renouvelables (EnR) dans le réseau de distribution (RD) peut produire des surtensions. Dans ce travail, nous combinons deux leviers permettant d’agir sur ces surtensions, et ce de façon simultanée, à savoir :

1. la reconfiguration des RD, qui est un problème d’optimisation où les variables de décisions sont l’état des différents interrupteurs présents dans le RD, dont la modification permet d’obtenir une nouvelle topologie qui conditionne les grandeurs physiques associées au RD, telle que la tension en chaque point ;
2. l’emploi de Réactance Variable en Shunt (RVS) : équipements électriques qui ont la particularité d’avoir une consommation de puissance réactive réglable. Dans cet article, nous effectuons une optimisation en incluant, dans les variables de décision, à la fois l’emplacement des RVS, et la répartition de leur puissance réactive.

Cela revient à résoudre un problème d’optimisation de type Programmation Quadratique Mixte en Nombres Entiers. La fonction objectif considérée est la minimisation des pertes par effet Joule dans les branches du RD. Comme contrainte, nous prenons, entre autres, une plage de tension autorisée pour tous les bus, avec pour but que le réseau final, obtenu après convergence de l’optimisation, ne présente aucune surtension.

Pour les RD réalistes de grande taille, le problème de reconfiguration peut être un défi en termes de résolution, dû au nombre

important d’interrupteurs, et donc de variable binaire. La recherche de l’emplacement optimal des RVS peut également être un défi en matière de résolution pour ce type de RD, car il faut associer un nombre binaire à chaque bus, de façon à ce que le solveur puisse sélectionner ceux qui doivent bénéficier de RVS. La combinaison de ces deux problèmes peut provoquer une explosion combinatoire, rendant ainsi l’implémentation d’une telle optimisation impossible en pratique, à cause du temps de calcul bien trop longs.

Les méthodes de résolution du problème de reconfiguration en fonction du type d’optimisation sont classées en cinq groupes : les méthodes classiques, les méthodes heuristiques, les méthodes métaheuristiques, les méthodes hybrides et les méthodes basées sur l’apprentissage automatique [1]. En termes de méthodes exactes : dans [2], une formulation en Programmation Linéaire Mixte en Nombres Entiers (PLMNE) est exploitée. Dans [3], une formulation qui est basée sur le problème du flot de coût minimum est employée. Les auteurs de [4] explicitent les méthodes heuristiques. Par rapport aux méthodes méta-heuristiques, [5] propose une optimisation par essais particuliers binaire assistée par un coefficient d’accélération variable dans le temps. En ce qui concerne la recherche de l’emplacement optimal d’équipements en shunt : dans [6], les auteurs réalisent une optimisation en termes de planning, à savoir, la détermination de l’emplacement optimal des EnR (sources photovoltaïque), et de D-STATCOM (Distributed Static Synchronous Compensator) qui sont placés en shunt et qui permettent d’injecter ou d’absorber de la puissance réactive, en considérant également la reconfiguration des réseaux. Les méthodes métaheuristiques Modified Ant Lion Optimizer (MALO) et BAT sont utilisées. Dans [7], l’emplacement optimal des D-STATCOM et des EnR est également recherché de façon simultanée, tout en intégrant la reconfiguration des RD. La fonction objectif choisie par les auteurs est la minimisation des pertes par effet Joule, et la résolution s’effectue à l’aide de l’algorithme GSA (Gravitationnal Search Algorithm). Cependant, aucun des deux articles précédemment cité n’emploie de méthode de simplification du problème via une réduction du nombre d’interrupteurs. La contribution de cet article est donc d’accélérer la convergence en utilisant une version simplifiée de la reconfiguration [8] d’une façon bien particulière, réduisant ainsi le nombre de combinaisons possibles. La méthode proposée est évaluée à l’aide d’un réseau IEEE 33-bus modifié par l’ajout d’EnR. D’après les résultats obtenus, la méthode proposée permet d’obtenir une solution identique à celle sans simplification, et ce, en un temps largement réduit (jusqu’à **-92.02%**).

Cet article est organisé comme suit : la Section 2 présente la formulation mathématique du problème d'optimisation, à savoir la formulation du problème de la reconfiguration du RD, ainsi que celle de l'emplacement des RVS et la répartition optimale de leur puissance réactive. La Section 3 présente les principaux résultats obtenus ainsi que leur discussion. Enfin, la Section 4 présente la conclusion ainsi que les axes potentiels pour des recherches futures.

2. FORMULATION MATHÉMATIQUE

La formulation mathématique de la reconfiguration utilisée dans cette étude partage des similarités avec celle utilisée dans [9] et [10]. Pour des raisons de simplification, la puissance consommée par chaque RVS est modélisée par une variable continue. Les contraintes de radialité sont obtenues à partir de [11] (avec une légère modification).

$$\min Z = \epsilon_{RVS} \sum_{u \in N} b_{RVS}(u) + \quad (1)$$

$$\frac{1}{U_n^2} \sum_{(u,v) \in A} \left(R(u,v) \left[yp(u,v)^2 + yq(u,v)^2 \right] \right)$$

$$\sum_{(u,v) \in A} d(u,v) = |N| - |N_{src}| \quad (2)$$

$$\forall u \in N :$$

$$\sum_{u \in N} b_{RVS}(u) \leq n_{max-RVS} \quad (3)$$

$$yps(u) + \sum_{v \in N^{in}(u)} yp(v,u) - \sum_{v \in N^{out}(u)} yp(u,v) = \quad (4)$$

$$Pl(u) - P_{dg}(u)$$

$$yqs(u) + \sum_{v \in N^{in}(u)} yq(v,u) - \sum_{v \in N^{out}(u)} yq(u,v) = \quad (5)$$

$$Ql(u) - Q_{dg}(u) + Q_{RVS}(u)$$

$$yfs(u) + \sum_{v \in N^{in}(u)} yf(v,u) - \sum_{v \in N^{out}(u)} yf(u,v) = feq(u) \quad (6)$$

$$0 \leq Q_{RVS}(u) \leq b_{RVS}(u) Q_{max-RVS}(u) \quad (7)$$

$$\forall (u,v) \in A :$$

$$Us_{min} d(u,v) \leq yUs(u,v,u) \leq Us_{max} d(u,v) \quad (8)$$

$$Us_{min} d(u,v) \leq yUs(u,v,v) \leq Us_{max} d(u,v) \quad (9)$$

$$Us_{min} (1 - d(u,v)) \leq Us(u) - yUs(u,v,u) \leq Us_{max} (1 - d(u,v)) \quad (10)$$

$$Us_{min} (1 - d(u,v)) \leq Us(v) - yUs(u,v,v) \leq Us_{max} (1 - d(u,v)) \quad (11)$$

$$f_{min} d(u,v) \leq yf(u,v) \leq f_{max} d(u,v) \quad (12)$$

$$-S_{max}(u,v) d(u,v) \leq yp(u,v) \leq d(u,v) S_{max}(u,v) \quad (13)$$

$$-S_{max}(u,v) d(u,v) \leq yq(u,v) \leq d(u,v) S_{max}(u,v) \quad (14)$$

$$\forall u \in N_{src} :$$

$$Us(u) = U_n^2 \quad (15)$$

$$-S_{max-source}(u) \leq yps(u) \leq S_{max-source}(u) \quad (16)$$

$$-S_{max-source}(u) \leq yqs(u) \leq S_{max-source}(u) \quad (17)$$

$$0 \leq yfs(u) \leq f_{max} \quad (18)$$

$$\forall u \in N_{non-src} :$$

$$\begin{aligned} & \sum_{v \in N^{out}(u)} (yUs(u,v,u) - yUs(u,v,v)) \\ & + \sum_{v \in N^{in}(u)} (yUs(v,u,u) - yUs(v,u,v)) = \\ & 2 \left[\sum_{v \in N^{out}(u)} R(u,v) yp(u,v) + X(u,v) yq(u,v) \right. \\ & \left. - \sum_{v \in N^{in}(u)} R(v,u) yp(v,u) + X(v,u) yq(v,u) \right] \quad (19) \end{aligned}$$

$$yps(u) = yqs(u) = yfs(u) = 0 \quad (20)$$

$\forall u \in N_{zi-non-source} : feq(u) = 1$; $\forall u \in N_{non-src}$, si $Peq(u) < 0$ alors $feq(u) = 1$; pour les autres bus $u : feq(u) = 0$.

Avec :

- $G = (N, A)$: graphe orienté représentant le RD;
- N : ensemble des bus du graphe G ;
- A : ensemble des arcs du graphe orienté G ;
- $N_{src} \subset N$: ensemble des bus source;
- $N_{non-src} \subset N$: ensemble des bus non-source;
- $N_{zi-non-source} \subset N$: ensemble des bus non-source à injection nulle;
- pour un bus u , $N^{in}(u)/N^{out}(u)$: ensemble des prédécesseurs directs / successeurs directs de u ;
- Z : fonction objectif;
- ϵ_{RVS} : coefficient de très faible valeur représentant une pénalité en cas d'assignation d'une RVS à un bus;
- $d(u,v)$: variable binaire qui correspond à l'état de l'arc (u,v) (1 si ON(fermé), 0 si OFF(ouvert));
- $yf(u,v)$: puissance fictive de l'arc (u,v) ;
- $feq(u)$: puissance fictive consommée au bus u ;
- $yfs(u)$: puissance fictive qui est injectée dans la source u ;
- f_{min}/f_{max} : puissance fictive minimale/maximale;
- $yp(u,v)/yq(u,v)$: puissance active/réactive transitant dans l'arc (u,v) ;

- $S_{max}(u, v)$: puissance apparente maximale de l'arc (u, v) ;
- $y_{ps}(u)/y_{qs}(u)$ puissance active/réactive, qui est injectée/absorbée par la source u ;
- $S_{max-source}(u)$: puissance apparente maximale qui peut circuler dans la source u ;
- $U_s(u)$: carré de la tension au bus u ;
- $yU_s(u, v, u)$: carré de la tension au bus u si l'arc (u, v) est ON, sinon 0 ;
- U_n : tension nominale ;
- U_{smin}/U_{smax} : carré de la tension minimum/maximum ;
- $R(u, v)/X(u, v)$: résistance/réactance de l'arc (u, v) ;
- $P_l(u)/Q_l(u)$: puissance active/réactive de la charge au bus u ;
- $P_{dg}(u)/Q_{dg}(u)$: puissance active/réactive de l'EnR au bus u ;
- Q_{RVS} : puissance réactive consommée par les RVS (valeur positive) ;
- $b_{RVS}(u)$: variable d'optimisation de type binaire, avec une valeur de 1 si le bus u bénéficie de RVS, 0 sinon ;
- $Q_{max-RVS}(u)$: puissance réactive maximale pouvant être consommée par les RVS ;
- $n_{max-RVS}$: nombre maximum de RVS que l'optimisation peut introduire dans le réseau.

3. SIMULATIONS ET RÉSULTATS

Le solveur utilisé pour résoudre les problèmes d'optimisation est Gurobi Optimizer version 11.0.3. Une valeur de 0 est donnée au paramètre MIPGap du solveur. Les caractéristiques du PC sont les suivantes : 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz, 2.42 GHz 8.00 GB de RAM. Les calculs d'écoulement de puissance sont effectués à l'aide de la librairie Python Pandapower [12]. La méthode est évaluée sur un réseau IEEE 33-bus¹ obtenu de [13], qui a été modifié à travers l'ajout d'EnR, comme indiqué dans le Tableau 1.

Les limites de tension sont ici prises à $\pm 5\%$ autour de la tension nominale.

La puissance maximale que les RVS peuvent consommer est de $Q_{max-RVS}(u) = 2$ MVAR pour tous les bus.

Le nombre maximum de RVS que l'optimisation peut introduire est de $n_{max-RVS} = 5$.

Les RVS sont modélisés par des réactances placées en shunt, et sont donc sensibles aux variations de tension, mais sont considérés comme des puissances constantes dans les modèles d'optimisation.

TABLEAU 1. Productions EnR ajoutées au réseau IEEE 33-bus.

Bus	1	8	16	20	23	27
Puissance (MW)	2.0	2.5	1.0	3.0	0.5	3.5

Les simulations s'effectuent sur deux phases : la première dite d'entraînement, et la deuxième dite de déploiement.

3.1. Phase d'entraînement

TABLEAU 2. Points de Fonctionnements (PF) d'entraînement.

j	0	1	2	3	4	5	6	7
$k_{load}(j)$	0.15	0.5	0.75	0.5	0.9	0.2	0.2	1
$k_{DG}(j)$	0.15	0.35	0.6	0.9	0.1	0.8	0.5	1

Dans cette phase, la recherche des interrupteurs les plus utiles est effectuée. Les Points de Fonctionnement (PF) d'entraînement sont exprimés de façon tabulaire dans le Tableau 2, et sont également représentés sous forme de nuage de point

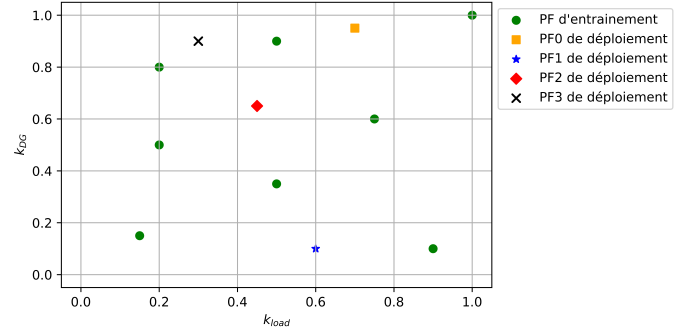


FIG. 1. Nuage de points.

dans la Figure 1

Remarque : La phase d'entraînement est effectuée sans l'utilisation des RVS.

Si l'entraînement est effectué avec les contraintes de tension, il existe alors certains PF d'entraînement pour lesquels l'optimisation ne converge pas, rendant ainsi impossible l'entraînement avec ce modèle. Par contre, en effectuant l'entraînement avec le modèle sans contraintes de tension, alors l'optimisation réussit à converger sur tous les PF. Toutefois, en appliquant ces différentes solutions au réseau puis en calculant l'écoulement de puissance, nous remarquons que la tension ne respecte pas les limites dans certains cas. Ce résultat peut être visualisé dans la Figure 2, où nous observons que les contraintes de tension sont respectées pour les PF d'entraînement (0,1,2,4,6), et violés pour (3,5,7).

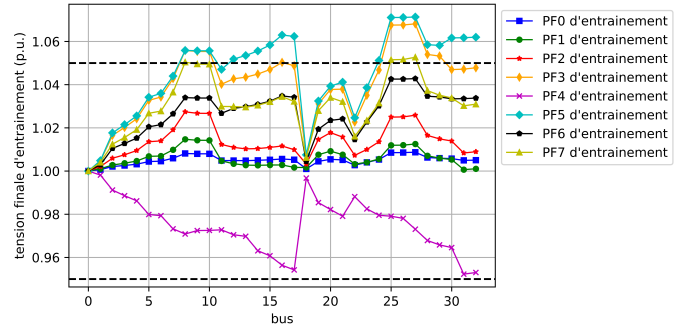


FIG. 2. Tension finale d'entraînement sans contraintes de tension.

L'intuition derrière cette méthode réside dans le fait que l'entraînement s'effectue sans les RVS (contrairement au modèle réel) et que des violations de contraintes de tension apparaissent (toujours durant la phase d'entraînement). Le résultat en terme de sélection des interrupteurs les plus importants peut être utile pour l'optimisation réelle (effectuer avec les RVS).

La durée totale de l'entraînement est de **4.37 s**.

Pour calculer la moyenne que chaque interrupteur passe en état fermé (ON) durant l'entraînement, nous définissons cette équation :

$$\forall(u, v) \in A_{SW} :$$

$$SW_ON(u, v) (\%) = 100 \cdot \frac{\sum_{j \in J} \tilde{d}(u, v, j)}{|J|} \quad (21)$$

Avec :

1. Les bus sont numérotés ici de 0 à 32.

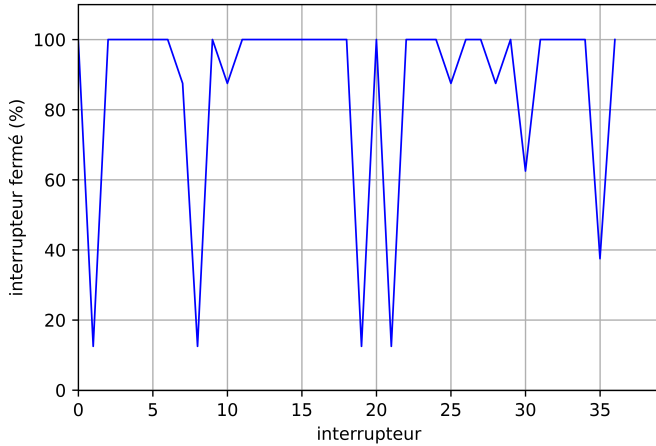
- $SW_ON(u, v)$: variable indiquant la valeur moyenne (en pourcentage) que l'interrupteur de la branche (u, v) passe fermé;
- j : indice permettant de sélectionner un des Points de Fonctionnements (PF) d'entraînement;
- $k_{load}(j)/k_{DG}(j)$: coefficient du j -ième PF d'entraînement permettant d'ajuster la puissance de la charge/production EnR située au bus u , par rapport à la puissance maximale de la charge/production EnR située à ce même bus;
- $\tilde{d}(u, v, j)$: état de l'interrupteur (u, v) obtenue durant la phase d'entraînement pour le PF j ;
- J : ensemble des PF d'entraînement.

Le tracé de cette variable pour tous les interrupteurs est représenté dans la Figure 3. La classification des interrupteurs est la suivante :

- nombre total d'interrupteurs : **37**;
- nombre d'interrupteurs qui varient² : **10** (27.03 %);
- nombre d'interrupteurs fixe : **27** (72.97 %);
- nombre d'interrupteurs toujours ON : 27 (72.97 %);
- nombre d'interrupteurs toujours OFF : 0 (0.0 %).

Nous observons donc bien que seule une minorité (**27.03 %**) d'interrupteurs varient.

FIG. 3. Courbe représentant la valeur moyenne (en pourcentage) que chaque interrupteur passe fermé durant la phase d'entraînement.



3.2. Phase de déploiement

Dans cette phase, une comparaison est effectuée entre trois cas :

- **cas_SD** : cas Sans Diminution du nombre d'interrupteurs du modèle de la reconfiguration, et avec emploi des RVS ;
- **cas_SD_SRVS** : cas Sans Diminution du nombre d'interrupteurs du modèle de la reconfiguration, et Sans RVS ;
- **cas_AD** : cas Avec Diminution du nombre d'interrupteurs du modèle de la reconfiguration, utilisant la liste des interrupteurs qui varient, obtenue à partir de la phase d'entraînement, comme variable d'optimisation, et avec emploi des RVS.

Les optimisations effectuées pour le **cas_SD** a un nombre de binaire total de 37 interrupteurs + 33 bus = 70 binaires ; alors que **cas_AD** en a 10 interrupteurs + 33 bus = 43 binaires.

Les reconfigurations sont effectuées sur quatre PF, dit PF de déploiement, dont les données sont présentées dans le Tableau 3,

2. Interrupteurs placés dans les branches : (7, 20), (8, 9), (5, 25), (13, 14), (8, 14), (10, 11), (6, 7), (24, 28), (29, 30), (30, 31).

et également représenté graphiquement dans la Figure 1.

TABEAU 3. PF de déploiements (l'indice i permet de sélectionner les PF de déploiements).

i	0	1	2	3
$k_{load}(i)$	0.7	0.6	0.45	0.30
$k_{DG}(i)$	0.95	0.1	0.65	0.90

Les pertes initiales pour les **PF (0,1,2,3)** de déploiement sont respectivement de **(0.60, 0.04, 0.30, 0.66)** (MW).

Les quatre courbes représentant la valeur de la tension initiale pour les PF de déploiement (donc avant reconfiguration/ajout de RVS), pour chaque bus, est représenté dans la Figure 4. Bien que PF1 soit le seul à respecter initialement les limites de tension, il a malgré tout été choisi pour observer le comportement du modèle dans un tel cas. Pour ce qui est des autres PF, nous apercevons des surtensions, surtout pour PF3.

FIG. 4. Tension initiale.

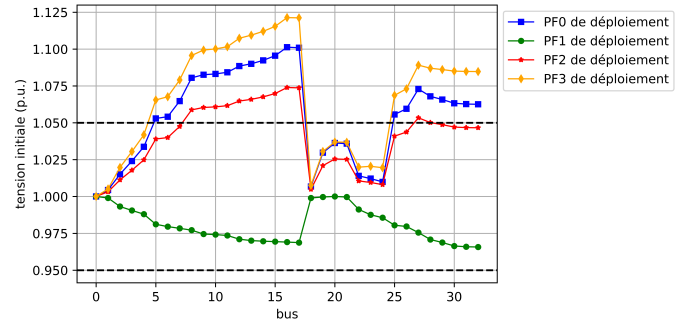
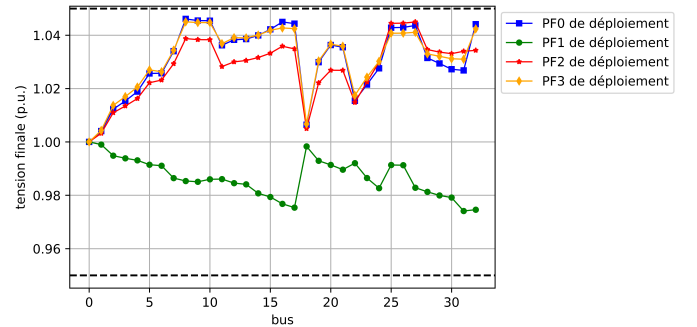


FIG. 5. Tension finale cas_SD.

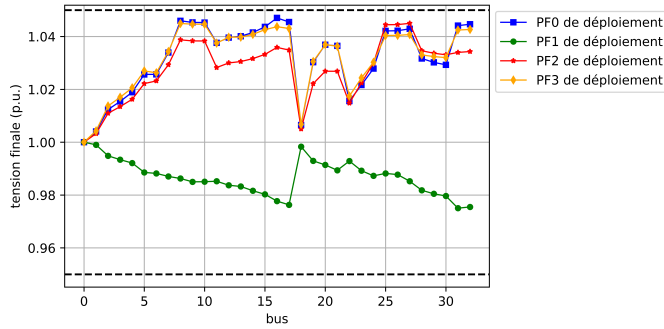


Pour ce qui est du réseau final, comme nous pouvons l'observer dans la Figure 5 et la Figure 6 : les contraintes de tension sont toujours respectées pour les cas **cas_SD** et **cas_AD**, et ce, pour tous les PF. En revanche, en ce qui concerne le **cas_SD_SRVS**, le modèle est faisable et respecte les limites de tension dans seulement deux PF : PF1 et PF2, les deux autres PF étant infaisables.

Les résultats en termes de temps de calcul et des pertes sont présentés dans les Tableaux 4-7. La réduction des pertes est calculée par rapport au réseau initial pour chaque PF, et la réduction en terme du temps de calcul est calculée par rapport à **cas_SD**.

Remarque : Nous parlons dans cette phase de la réduction des pertes pour les différents PF, mais ces valeurs sont à

FIG. 6. Tension finale cas_AD.



interpréter avec précaution, du fait que dans la majorité des PF de déploiement : le réseau initial est considéré comme étant **infaisable** (à cause des dépassements des limites de tension), et est comparé avec des réseaux **faisable**.

Pour ce qui est de l'emplacement et de la puissance des RVS : pour le **cas_SD** comme pour le **cas_AD** : le solveur a recours aux RVS uniquement pour PF0 et PF3. Ces résultats sont exposés dans les Tableaux 8 et 9, où les puissances affichées sont les puissances nominales des RVS, et non leur puissance réellement consommée dans le réseau, qui elle dépend du niveau de tension du bus auquel est connectée la RVS.

TABLEAU 4. Résultats pour le PF0 de déploiement.

Cas	Réduction des pertes (%)	Temps	
		T (s)	Réduction (%)
cas_SD	-8.38	1.05	—
cas_AD	-7.76	0.20	-80.95
cas_SD_SRVS	infaisable	infaisable	infaisable

TABLEAU 5. Résultats pour le PF1 de déploiement.

Cas	Réduction des pertes (%)	Temps	
		T (s)	Réduction (%)
cas_SD	-32.98	0.57	—
cas_AD	-32.49	0.16	-71.93
cas_SD_SRVS	-32.98	0.90	+57.89

TABLEAU 6. Résultats pour le PF2 de déploiement.

Cas	Réduction des pertes (%)	Temps	
		T (s)	Réduction (%)
cas_SD	-20.21	0.61	—
cas_AD	-20.21	0.16	-73.77
cas_SD_SRVS	-20.21	1.07	+75.41

TABLEAU 7. Résultats pour le PF3 de déploiement.

Cas	Réduction des pertes (%)	Temps	
		T (s)	Réduction (%)
cas_SD	+3.47	2.38	—
cas_AD	+3.71	0.19	-92.02
cas_SD_SRVS	infaisable	infaisable	infaisable

En termes du temps de calcul, nous remarquons que :

- pour tous les PF, le **cas_AD** est bien plus rapide que le **cas_SD**, atteignant même une réduction de **-92.02%** pour le PF3 ;

TABLEAU 8. Emplacement et puissance des RVS pour PF0 de déploiement.

Cas	RVS		
	bus	Q_RVS (MVAR)	Total (MVAR)
cas_SD	8	0.31	1.17
	16	0.23	
	27	0.63	
cas_AD	8	0.32	1.17
	16	0.02	
	27	0.83	

TABLEAU 9. Emplacement et puissance des RVS pour PF3 de déploiement.

Cas	RVS		
	bus	Q_RVS (MVAR)	Total (MVAR)
cas_SD	6	0.06	2.51
	8	0.56	
	16	0.46	
	27	1.43	
cas_AD	6	0.06	2.52
	8	0.57	
	16	0.37	
	27	1.52	

- le **cas_SD_SRVS** est plus lent que le **cas_SD**, par exemple **+75.41%** de temps de calcul pour PF2, ce qui est contre-intuitif car le **cas_SD** contient des variables d'optimisation binaires et continues supplémentaires (pour représenter les RVS) qui ne sont même pas utilisées pour PF1 et PF2. Donc intuitivement, cet ajout de variables d'optimisation non utilisées auraient du ralentir le **cas_SD** par rapport au **cas_SD_SRVS**.

En termes de réduction des pertes :

- nous observons que le **cas_AD** est légèrement moins performant que le **cas_SD**, par exemple **-7.76%** par rapport à **-8.38%** pour PF0, sauf pour PF2 où la réduction est identique dans les deux cas ;
- pour le PF3, nous observons une augmentation des pertes pour le **cas_SD** et le **cas_AD** par rapport au réseau initial, ce qui peut s'expliquer par le fait que dans les deux cas, le solveur est obligé de placer des RVS et de les activer pour réduire la tension jusqu'à un seuil acceptable dans tous les bus, même au prix de payer une petite pénalité (Eq 1) et d'augmenter les pertes³ sinon il ne pourrait pas converger ;
- nous observons également que le **cas_SD_SRVS** obtient exactement la même réduction de pertes que le **cas_SD** dans les deux PF où il converge (PF1 et PF2), ce qui peut s'expliquer par le fait que pour ces deux PF : le **cas_SD_SRVS** n'a pas eu à utiliser les RVS car la reconfiguration a été suffisante pour réduire la tension à un seuil acceptable dans les deux cas ;
- par contre, le **cas_SD_SRVS** est infaisable pour PF0 et PF3 car la reconfiguration a elle seule n'est pas suffisante pour réduire convenablement la tension dans ces deux PF.

En termes des RVS :

- pour PF0 et PF3, nous observons que les résultats du **cas_SD** et du **cas_AD** sont très proches. Les deux modèles ont placé exactement le même nombre de RVS dans

3. Dans ce cas précis, car le réseau ne comporte aucune production de puissance réactive (ni charge capacitive, ni capacitance shunt des lignes), donc à topologie fixe, une augmentation de consommation de puissance réactive de la part des RVS ne peut même pas servir à compenser la production de réactif : cela engendrerait seulement une surconsommation de puissance réactive, et donc une augmentation des pertes.

- le réseau final, à savoir **3** pour PF0, et **4** pour PF3;
- notons également que les bus **8**, **16** et **27** sont sélectionnés pour y disposer des RVS dans les deux PF. Pour ce qui est de la puissance réactive totale consommée, elle est identique pour les deux cas dans le PF0 (**1.17 MVAR**), et très proche pour le PF3 (**2.51 MVAR** pour le **cas_SD**, contre **2.52 MVAR** pour le **cas_AD**);
- en nous concentrant sur la puissance réactive consommée par chaque RVS de façon individuelle, nous notons quelques différences, par exemple pour PF0 au niveau du bus 27, nous obtenons **0.63 MVAR** pour le **cas_SD**, contre **0.83 MVAR** pour le **cas_AD**.

Si nous considérons appliquer la méthode proposée en phase de planification du RD, et que la seule variable d'optimisation réellement pertinente est le nombre ainsi que l'emplacement optimal des RVS (la puissance qu'elles consomment ainsi que la topologie du réseau pouvant être modifiée durant la phase d'exploitation⁴). Il est alors possible de dire, en se basant sur les résultats obtenus, que la méthode proposée avec phase d'entraînement sans contraintes de tension puis déploiement avec un nombre d'interrupteurs réduits, représentée par le **cas_AD**, donne exactement la même solution que la méthode dite classique, sans diminution du nombre d'interrupteurs, représentée par le **cas_SD**. **Ce résultat identique en termes de qualité est obtenu de façon bien plus rapide, ce qui démontre la supériorité de la méthode proposée**, pour le réseau étudié, et avec la fonction objectif considérée⁵.

4. CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude est de proposer une méthode permettant de déterminer l'emplacement optimal des RVS, combinée avec la RRD, avec un temps de calcul réduit.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la méthode de simplification a permis de réduire le temps de calcul, jusqu'à atteindre **-92.02 %** de réduction, ce qui est dû à la diminution du nombre de binaires présent dans le problème d'optimisation. Ces résultats montrent également que dans certains cas, la reconfiguration à elle seule réussit à éliminer les surtensions, mais dans certains cas, la reconfiguration doit obligatoirement être accompagnée de l'utilisation des RVS.

Comme perspective future de recherche, nous pensons qu'il serait intéressant de tenter d'appliquer cette méthode à un RD de plus grande taille, ce qui résultera potentiellement en une réduction (en pourcentage) du temps de calcul encore plus importante. Également, l'utilisation d'une fonction objectif prenant en compte le coût réel des RVS ainsi que leur durée de vie, et en associant un coût lié aux pertes, permettrait de trouver un compromis entre le coût d'investissement et d'exploitation, cela constitue une piste de recherche possible pour approfondir cette étude.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par l'ANRT, la Région Nouvelle-Aquitaine et SRD dans le cadre du projet LabCom @LIENOR, France.

Les auteurs tiennent à remercier M. F. Petit (SRD) pour ses précieux commentaires et suggestions.

6. RÉFÉRENCES

- [1] M. R. Behbahani, A. Jalilian, A. Bahmanyar, and D. Ernst, "Comprehensive review on static and dynamic distribution network reconfiguration methodologies," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 9510–9525, 2024.
- [2] L. A. Gallego Pareja, J. M. López-Lezama, and O. Gómez Carmona, "A mixed-integer linear programming model for the simultaneous optimal distribution network reconfiguration and optimal placement of distributed generation," *Energies*, vol. 15, no. 9, 2022. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3063>
- [3] A. A. Zazou, E. Grolleau, E. Chevrier, P. Richard, J.-P. Gaubert, and L. Bellatreche, "Power distribution network reconfiguration based on min-cost flow problem," in *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2016, pp. 286–291.
- [4] F. Gomes, S. Carneiro, J. Pereira, M. Vinagre, P. Garcia, and L. Araujo, "A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1373–1378, 2005.
- [5] H. Hizarci, O. Demirel, and B. E. Turkey, "Distribution network reconfiguration using time-varying acceleration coefficient assisted binary particle swarm optimization," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 35, p. 101230, 2022. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098622001392>
- [6] S. B. C., U. A., and G. R. S., "Optimal planning of pv sources and d-statcom devices with network reconfiguration employing modified ant lion optimizer," *Energies*, vol. 17, no. 10, 2024. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/10/2238>
- [7] S. R. Salkuti, "An efficient allocation of d-statcom and dg with network reconfiguration in distribution networks," *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, vol. 9, pp. 299–309, 03 2022.
- [8] A. Graine, N. Karnib, J.-P. Gaubert, and D. Larraillet, "A statistics-based simplification method to the distribution network reconfiguration problem for large-scale networks," *Mathematics and Computers in Simulation*, 2025. Accepted for presentation at ELECTRIMACS 2024; extended version currently under review for publication in *Mathematics and Computers in Simulation*.
- [9] A. Graine, N. Karnib, J.-P. Gaubert, A. Bertout, E. Grolleau, and D. Larraillet, "A mixed integer linear programming model for the distribution network reconfiguration problem," in *2023 IEEE 11th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, 2023, pp. 70–75.
- [10] A. Graine, J.-P. Gaubert, and D. Larraillet, "Tso-dso coordination for voltage regulation based on the distribution network reconfiguration and variable shunt reactors," in *2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE)*, 2024, pp. 1–5.
- [11] M. Lavorato, J. F. Franco, M. J. Rider, and R. Romero, "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 172–180, 2012.
- [12] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer, J.-H. Menke, J. Dollichon, F. Meier, S. Meinecke, and M. Braun, "Pandapower—an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6510–6521, 2018.
- [13] M. Baran and F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, 1989.

4. En choisissant, bien évidemment, la bonne fréquence de commutation des RVS et des interrupteurs du réseau, car une fréquence de commutation exagérément élevée engendrerait un coût d'usure bien trop important.

5. Qui, de part la faible valeur donnée à la variable ϵ_{RVS} , ne prend pas du tout en compte le coût des RVS de façon réaliste.