

Modélisation et simulation d'un relais UFLS pour Smart Grid appliqué aux réseaux ONEE et SENELEC

Birane Diaw

<https://bdiaw.lovable.app/>



Résumé — Ce rapport présente un modèle système d'un relais de délestage fréquence-métrique (Under-Frequency Load Shedding, UFLS) appliqué à deux cas africains: le réseau interconnecté ONEE au Maroc et le réseau SENELEC au Sénégal. Le projet combine une dynamique fréquence-puissance agrégée, un gouverneur à statisme, une action secondaire AGC et un automate Stateflow à seuils temporisés. Les simulations montrent que le délestage est déclenché avant l'effondrement fréquentiel, puis retiré automatiquement lorsque la fréquence revient dans la zone de restauration.

Mots-clés—Smart Grid, UFLS, délestage, fréquence, Stateflow, Simulink, stabilité transitoire.

I. Introduction

La baisse de fréquence après une perte de production est l'un des mécanismes les plus critiques pour la sûreté d'un réseau électrique. Lorsque la réserve primaire et l'amortissement naturel ne suffisent pas à rétablir l'équilibre production-consommation, un relais UFLS déleste une fraction de charge selon des seuils prédéfinis. L'objectif du projet est de construire un banc de simulation reproductible, capable de comparer deux réseaux équivalents et de visualiser le comportement de l'automate.

II. Architecture et modèle dynamique

Le réseau est représenté par une machine équivalente. La fréquence est calculée par une équation de swing agrégée, exprimée en grandeur relative autour de 50 Hz. La perturbation est une perte de production appliquée à $t = 10$ s. La puissance délestée est retranchée de la perturbation active, ce qui ferme la boucle entre l'automate UFLS et la dynamique réseau.

Le gouverneur suit une loi à statisme avec constante de temps T_g . Le signal mécanique de réserve primaire est saturé par P_{gov_max} , et l'AGC intègre lentement l'écart de fréquence afin de ramener le système vers la consigne nominale. L'automate comporte six états: NORMAL, ALERT, SHED1, SHED2, SHED3 et RESTORE. Chaque seuil de délestage est validé après une temporisation de confirmation; la restauration exige une fréquence supérieure à $f_{restore}$ pendant une durée minimale.

III. Paramètres et scénarios

Les paramètres ci-dessous ne constituent pas des données officielles d'exploitation. Ils sont choisis comme hypothèses d'ingénierie plausibles pour obtenir des scénarios comparables, stables et lisibles dans un projet de démonstration.

Tableau I. Paramètres principaux des deux cas d'étude.

Paramètre	ONEE	SENELEC
S base	11.0 GW	1.4 GW
P _{load0}	6.5 GW	700 MW
H	5.0 s	3.0 s
D	1.5 pu/pu	1.0 pu/pu
R	0.05 pu/pu	0.05 pu/pu
T _g	6.0 s	4.0 s
P _{gov max}	0.15 pu	0.12 pu
P _{loss}	1540 MW	168 MW
f _{alert}	49.5 Hz	49.5 Hz
stage 1	49.0 Hz / 10 %	49.0 Hz / 12 %
stage 2	48.7 Hz / 15 %	48.6 Hz / 18 %
stage 3	48.4 Hz / 20 %	48.2 Hz / 25 %
t _{confirm}	0.30 s	0.25 s
f _{restore}	49.90 Hz	49.90 Hz
t _{restore hold}	5.0 s	6.0 s
f _{collapse}	47.5 Hz	47.0 Hz

IV. Implémentation MATLAB/Simulink/Stateflow

Le projet fournit deux voies de simulation. La première est une boucle MATLAB pure, utilisée pour lancer rapidement les cas, générer les courbes et produire les validations. La seconde génère de vrais modèles Simulink avec un chart Stateflow pour le relais, afin de visualiser les états et les transitions graphiquement. Les modèles générés sont sf_ufls_onee.slx et sf_ufls_senelec.slx.

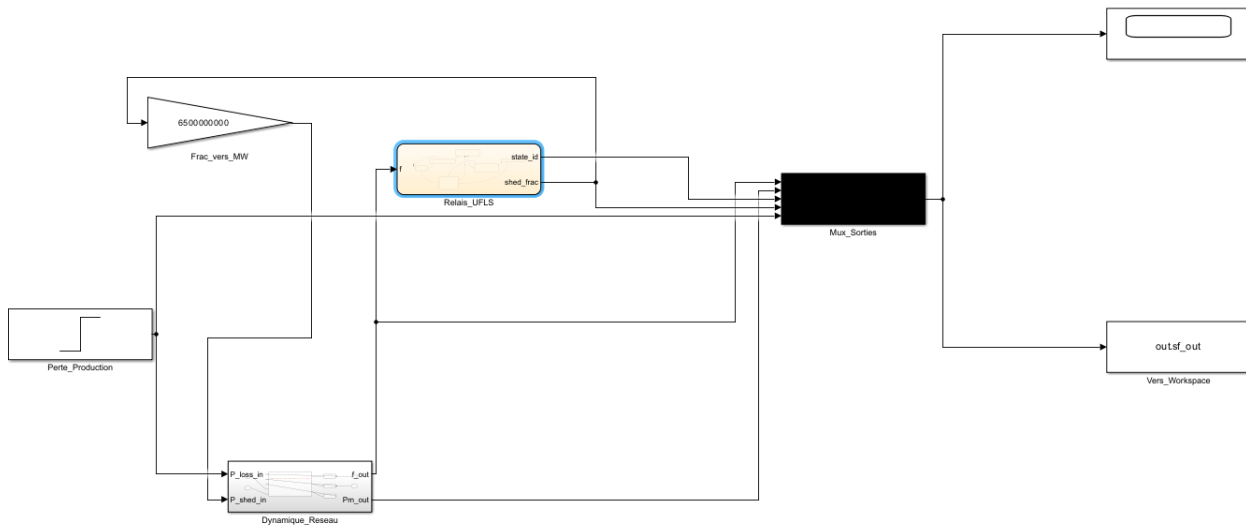


Figure 1. Modèle Simulink généré pour le cas ONEE, avec boucle fermée entre dynamique réseau et relais UFLS.

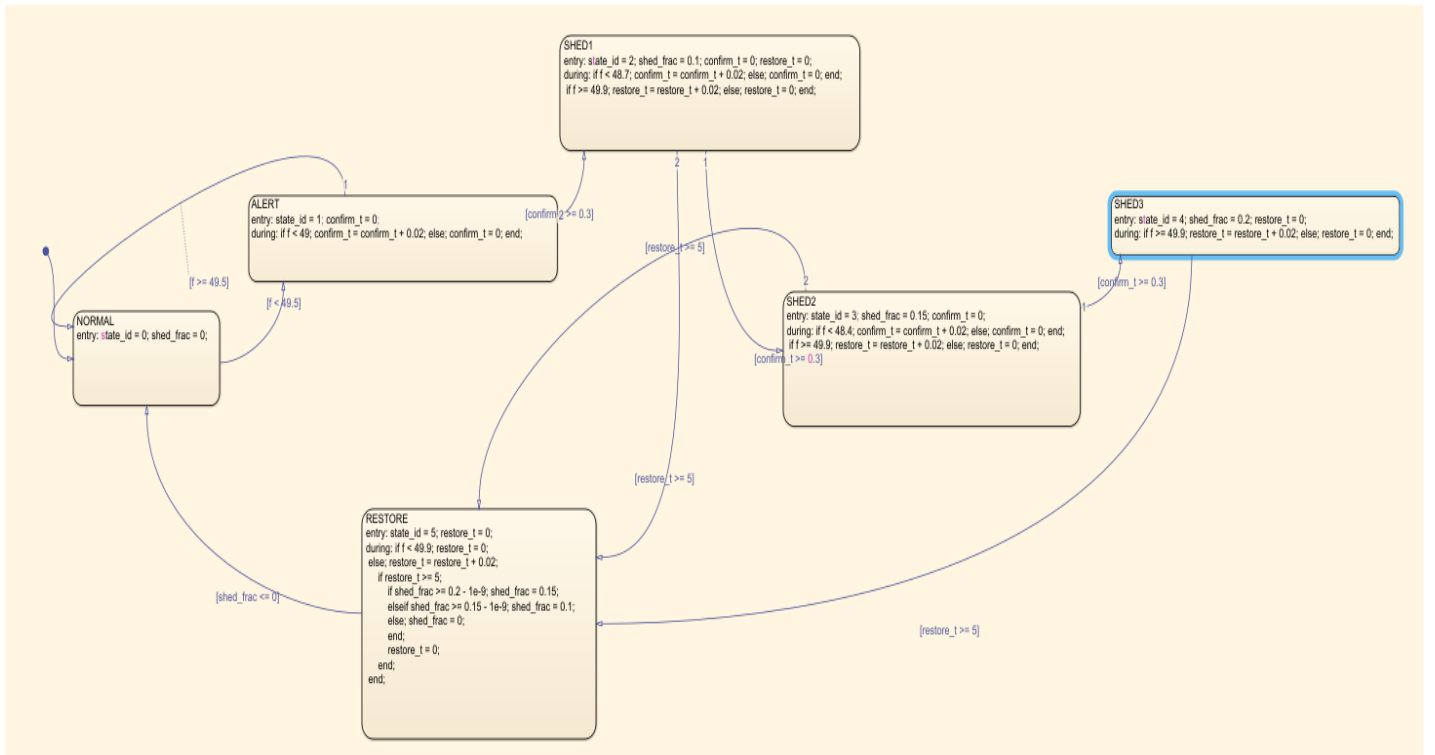


Figure 2. Chart Stateflow réel du relais UFLS, exporté depuis `sf_ufls_onee.slx`.

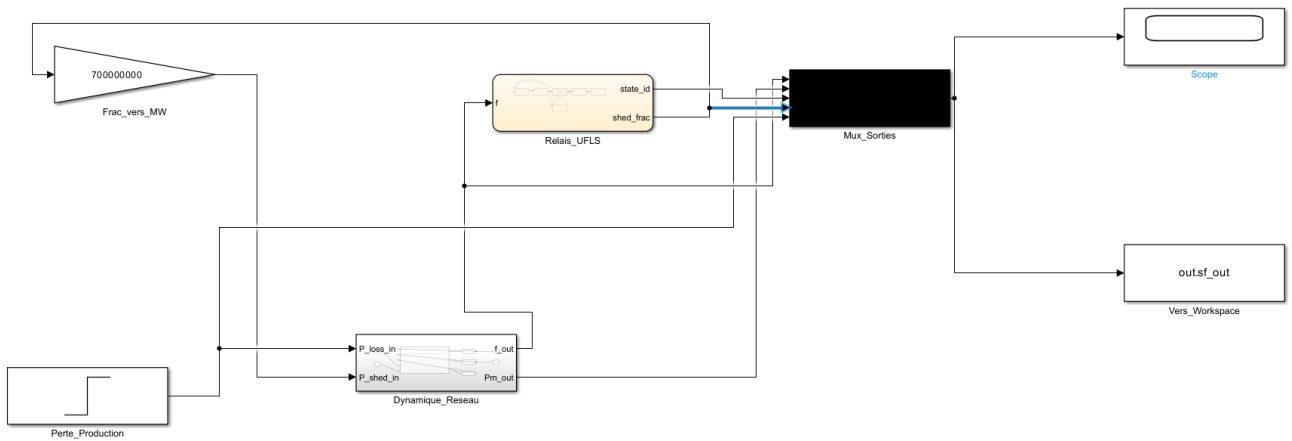


Figure 1. Modèle Simulink généré pour le cas SENELEC, avec boucle fermée entre dynamique réseau et relais UFLS.

V. Résultats de simulation

Dans les deux cas, la fréquence descend sous le seuil d'alerte puis active un délestage de premier niveau. La réponse du gouverneur et l'action AGC stabilisent ensuite le système. Une fois la fréquence maintenue au-dessus du seuil de restauration, la charge délestée est progressivement rétablie et l'automate revient à l'état NORMAL.

Tableau II. Synthèse des performances simulées.

Cas	Réseau	f nadir	t nadir	Délestage max	Délestage final	Effondrement	Restauré
ONEE	Reseau interconnecte ONEE - Maroc	48.956 Hz	12.38 s	10.0 %	0.0 %	Non	Oui
SENELEC	Reseau interconnecte SENELEC - Senegal	48.983 Hz	11.78 s	12.0 %	0.0 %	Non	Oui

Le cas ONEE subit une perte de 1540 MW sur une base de charge de 6500 MW; le maximum de délestage est de 10 %. Le cas SENELEC utilise une base plus faible et une inertie plus réduite, mais le réglage de seuils et le délestage de 12 % permettent également d'éviter le seuil d'effondrement. Le nadir reste proche de 49 Hz dans les deux scénarios.

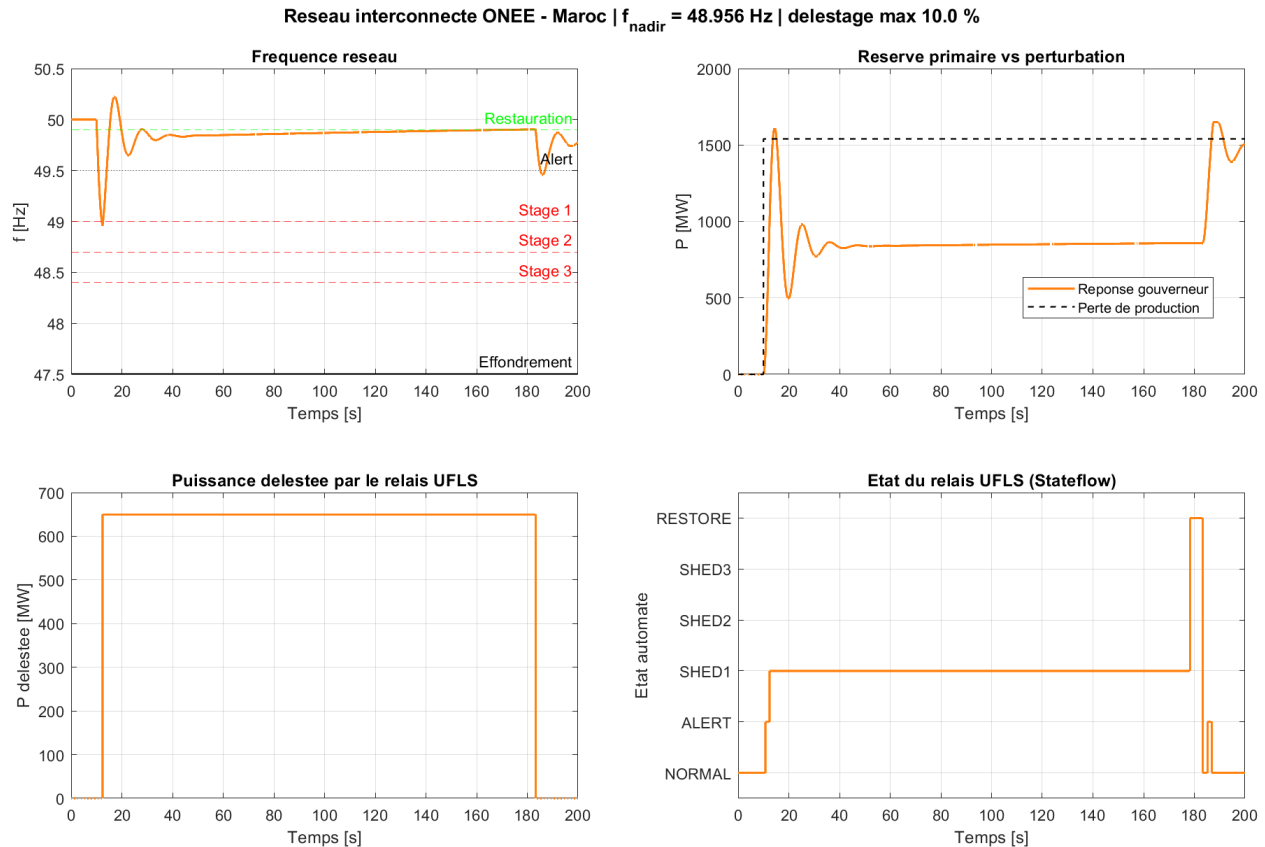
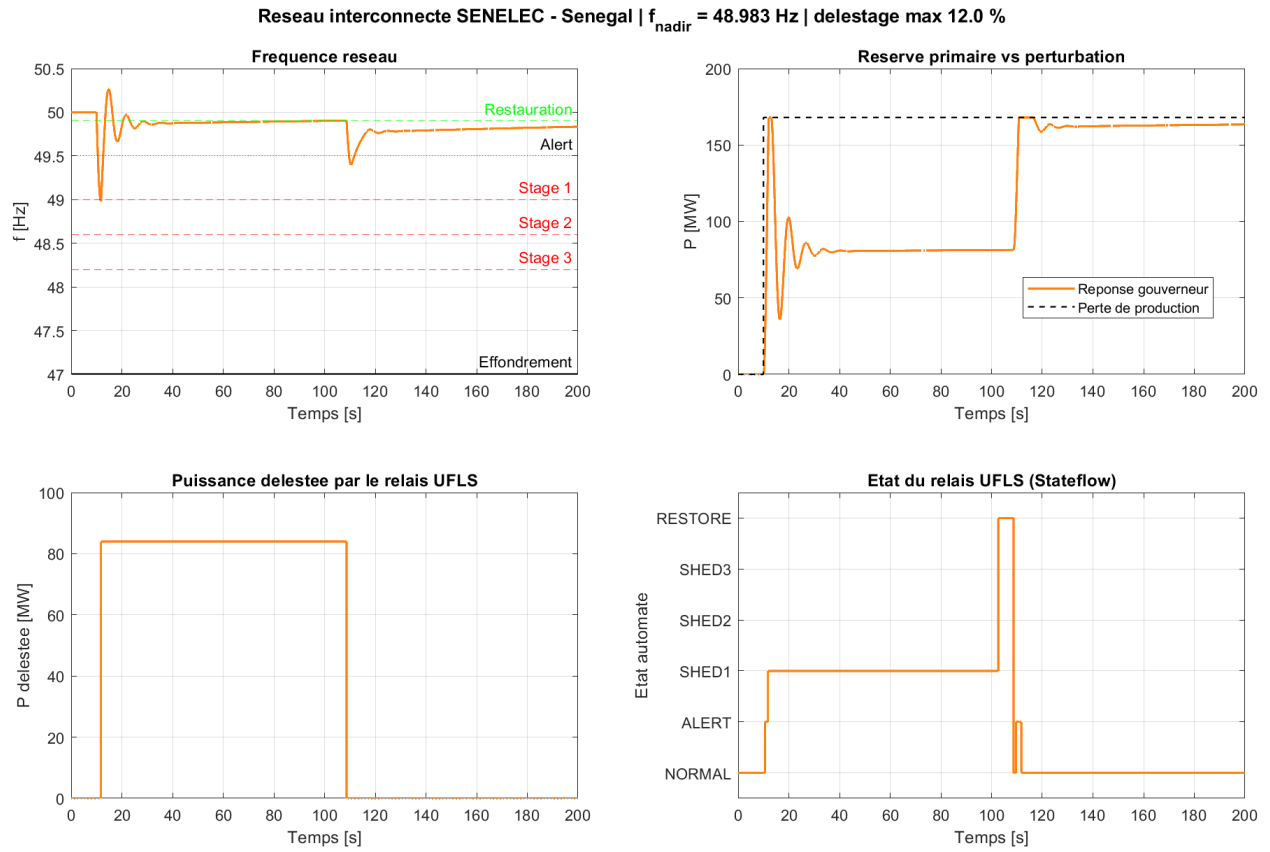


Figure 3. Résultats temporels du cas ONEE: fréquence, réserve primaire, puissance délestée et état de l'automate.



VI. Validation, normes et limites

La validation automatique vérifie les signaux finis, l'absence d'effondrement, le déclenchement UFLS, le retour à l'état restauré, les bornes d'état et les limites du gouverneur. Les douze contrôles exécutés sur les deux cas sont réussis.

Les limites principales sont le caractère agrégé du modèle, l'absence de topologie détaillée lignes-jeux de barres, et l'usage de paramètres calibrés pour la démonstration. Pour une étude industrielle, il faudrait intégrer les protections réelles, les contraintes de sélectivité, les modèles de charges dépendantes de la tension et des données opérateur validées.

Tableau III. Contrôles automatiques de validation du projet.

Cas	Contrôle	Résultat	Détail
ONEE	finite_signals	OK	All logged numeric signals must be finite.
ONEE	no_collapse	OK	Frequency nadir 48.956 Hz (collapse threshold 47.5 Hz).
ONEE	ufls_triggered	OK	Max shed 10.0 %.
ONEE	grid_restored	OK	Final shed 0.0 %, final state 0.
ONEE	state_bounds	OK	State range [0, 5].
ONEE	governor_bounds	OK	Pm pu range [0.000, 0.150].
SENELEC	finite_signals	OK	All logged numeric signals must be finite.
SENELEC	no_collapse	OK	Frequency nadir 48.983 Hz (collapse threshold 47.0 Hz).
SENELEC	ufls_triggered	OK	Max shed 12.0 %.
SENELEC	grid_restored	OK	Final shed 0.0 %, final state 0.
SENELEC	state_bounds	OK	State range [0, 5].
SENELEC	governor_bounds	OK	Pm pu range [0.000, 0.120].

VII. Conclusion

Le banc de simulation remplit son objectif: il montre une chaîne complète perte de production - chute de fréquence - décision Stateflow - délestage - restauration. La génération automatique des modèles Simulink/Stateflow facilite la visualisation pédagogique, tandis que les scripts MATLAB assurent une validation reproductible des résultats.

Références

- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [2] IEEE Power System Relaying Committee, Underfrequency Load Shedding Protection, technical guidance.
- [3] MathWorks, Simulink and Stateflow documentation, R2024a.
- [4] Scripts du projet: main_simulation.m, build_stateflow.m, validate_project.m.