

Modélisation et simulation d'un système de traction ferroviaire 25 kV AC avec récupération d'énergie au freinage

Birane Diaw

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



Abstract— Ce rapport présente un modèle système de traction ferroviaire 25 kV AC appliqué à deux scénarios africains: la LGV ONCF Avelia Horizon et le TER Dakar Coradia Polyvalent. Le projet couple un profil de mission physiquement faisable, une dynamique mécanique de type Davis, une chaîne convertisseur-moteur moyenne-valeur, un calcul de tension caténaire et un solveur Newton-Raphson. Les simulations montrent une conformité de tension sur la plage EN 50163 considérée, une convergence réseau de 100 %, et un taux de récupération d'énergie plus élevé pour le TER Dakar en raison des cycles fréquents d'arrêt et de freinage.

Mots-clés—traction ferroviaire, 25 kV AC, freinage régénératif, Simulink, Newton-Raphson, EN 50163.

I. Introduction

L'objectif du projet est de comparer deux systèmes ferroviaires électrifiés sous une hypothèse commune d'alimentation 25 kV AC: une mission grande vitesse ONCF et une mission régionale TER. Le modèle n'est pas un dossier de certification matériel, mais un banc de simulation académique et reproductible destiné à quantifier la consommation, la récupération d'énergie et le comportement de la tension pantographe.

II. Architecture et modèle

La chaîne modélisée comprend le profil de mission, le régulateur de vitesse, le convertisseur FOC moyenne-valeur, la dynamique du train, la caténaire, le flux de puissance Newton-Raphson et la gestion d'énergie récupérée. Le convertisseur tient compte du nombre total de moteurs afin que la puissance électrique corresponde à la rame complète.

Les relations principales sont: $F_{\text{Davis}} = A + Bv + Cv^2$, $T_{\text{em}} = 1.5 n_p \psi_r i_q$, $P_{\text{elec}} = n_{\text{motors}} T_{\text{em}} \omega_e / n_p$ avec rendement traction ou récupération, et $\tau_{\text{RBE}} = E_{\text{rec}} / E_{\text{conso}}$. La tension pantographe est évaluée par une impédance caténaire équivalente et contrôlée par rapport à la plage 19 kV - 27.5 kV.

III. Implémentation Simulink

Deux modèles Simulink modulaires sont générés: `traction_oncf.slx` et `traction_ter.slx`. Le retour vitesse entre la dynamique train et le convertisseur est volontairement discrétisé par un bloc Unit Delay afin de supprimer la boucle algébrique et rendre les schémas exécutables. Le modèle `sps_traction_ter.slx` représente une chaîne Simscape Electrical / Specialized Power Systems moyenne-valeur pour le cas TER.

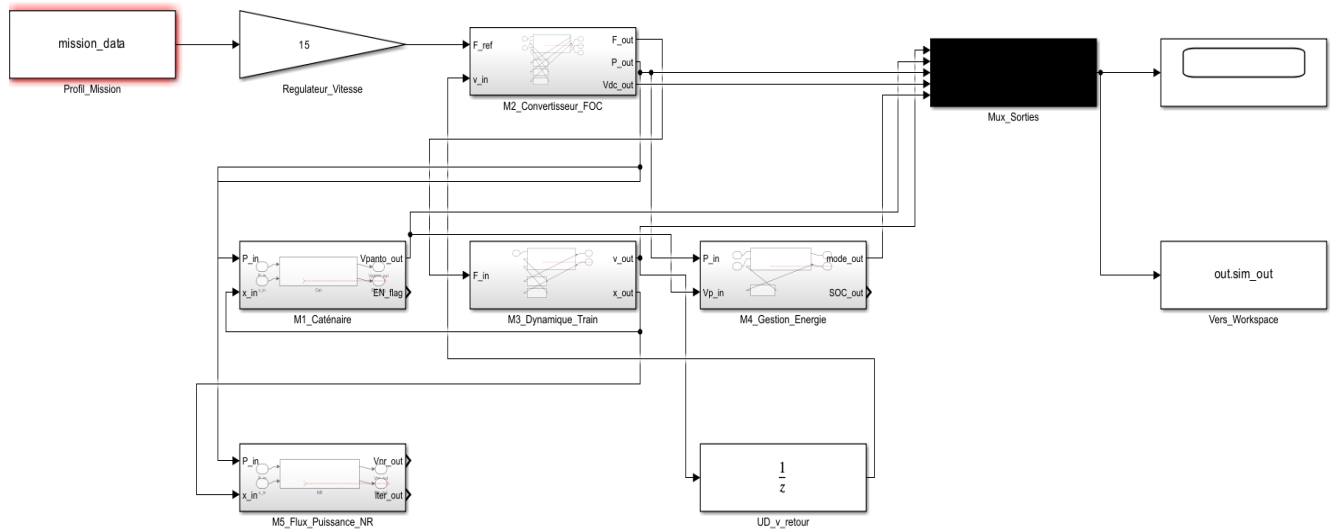


Fig. 1. Capture réelle du schéma Simulink traction_ter.slx.

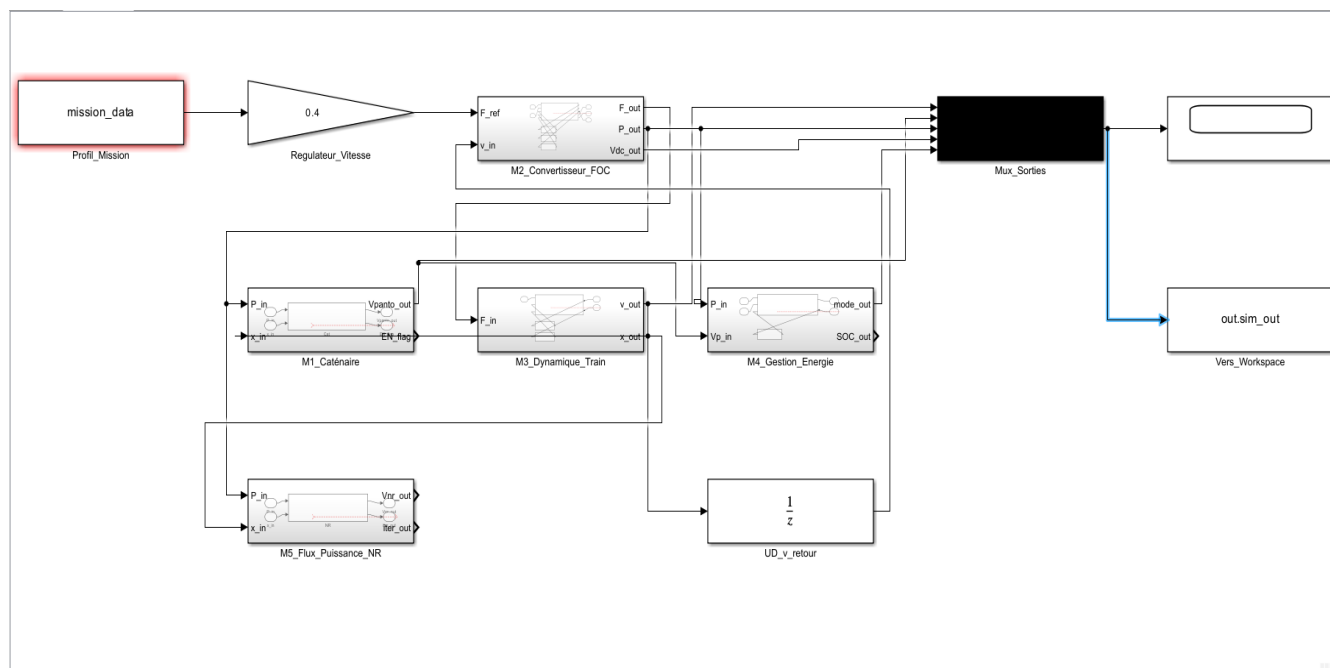


Fig. 2. Capture réelle du schéma Simulink traction_oncf.slx.

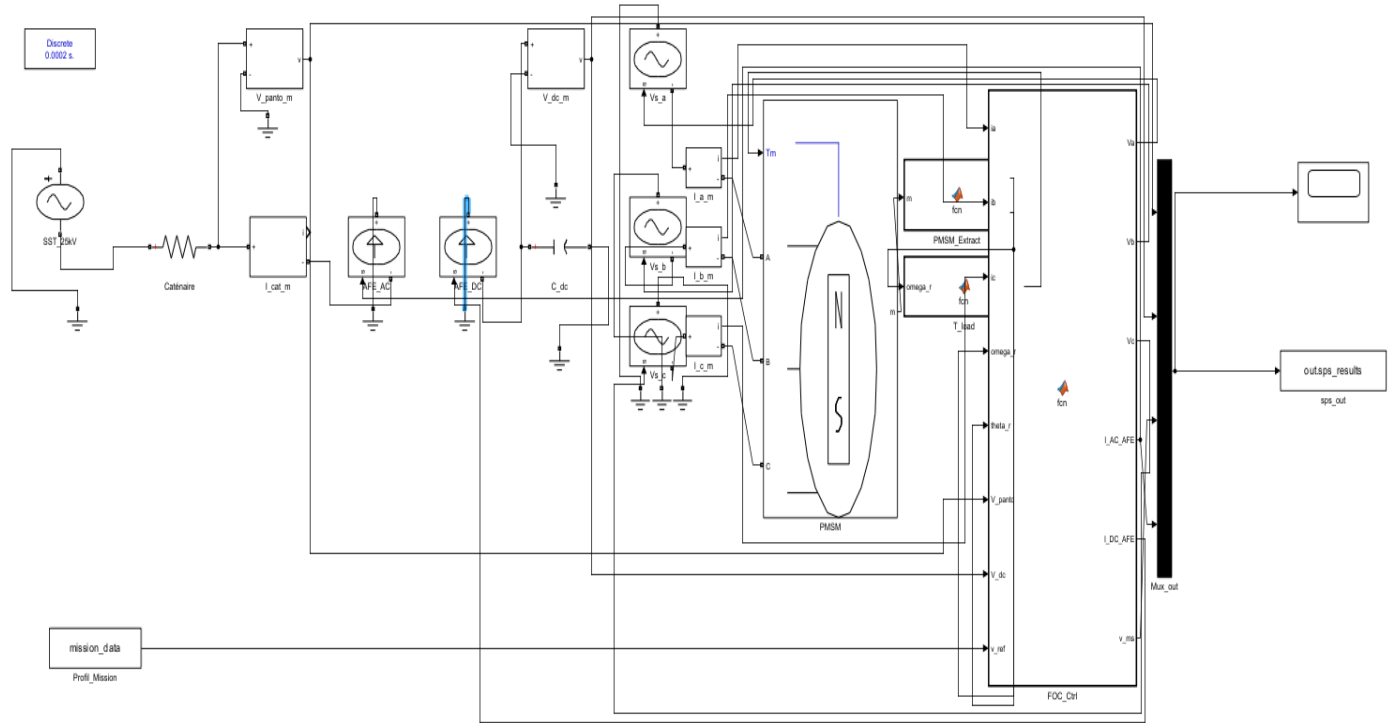


Fig. 3. Capture réelle du schéma Simscape Electrical / SPS sps_traction_ter.slx.

IV. Résultats de simulation

Les résultats indiquent que la LGV ONCF consomme davantage en valeur absolue, tandis que le TER Dakar récupère une fraction nettement plus importante de son énergie grâce aux cycles répétés d'accélération et de freinage. Les deux scénarios atteignent leur distance cible et respectent la plage de tension simulée.

Tableau I. Résultats synthétiques

Cas	Durée	Distance	Vmax	E cons.	E récup.	E nette	RBE	NR	EN 50163
ONCF	83.8 min	430.0 km	320.4 km/h	1601.8 kWh	402.7 kWh	1199.1 kWh	25.1 %	100 %	100 %
TER	39.1 min	57.0 km	160.5 km/h	720.2 kWh	499.5 kWh	220.7 kWh	69.4 %	100 %	100 %

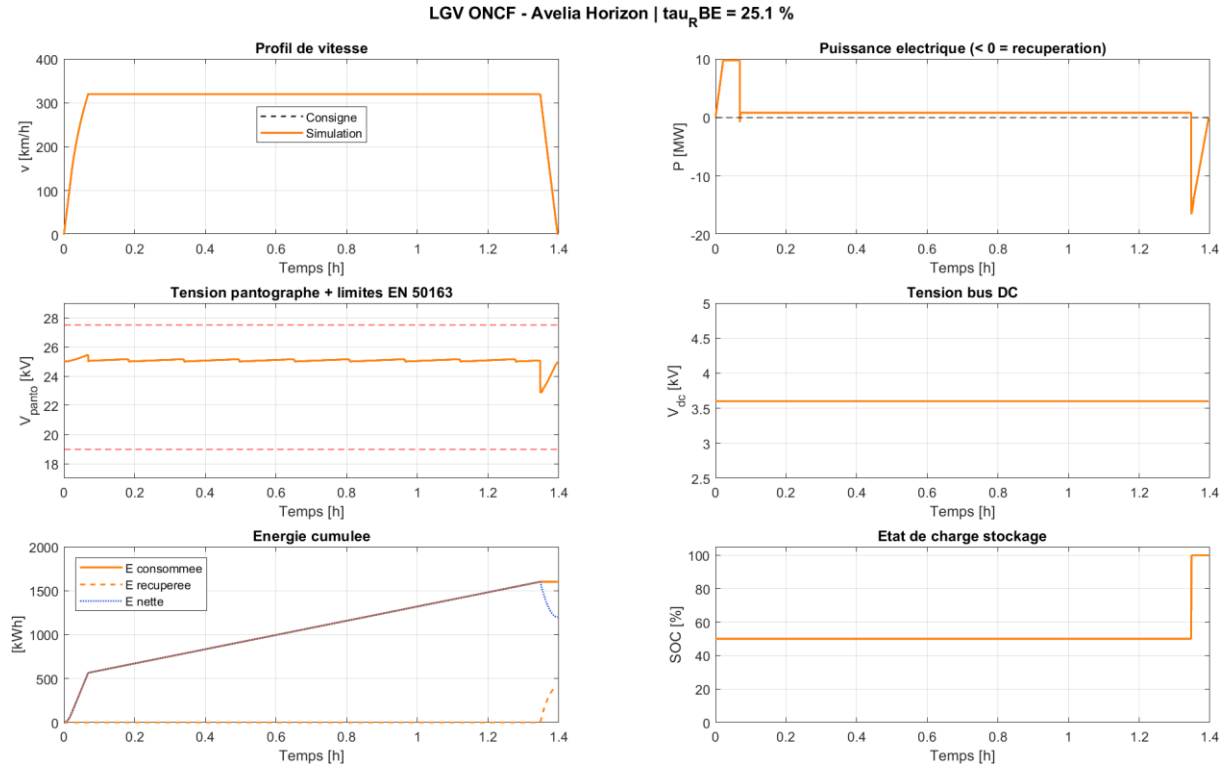


Fig. 4. Profils ONCF: vitesse, puissance, tension pantographe, bus DC, énergie et SOC.

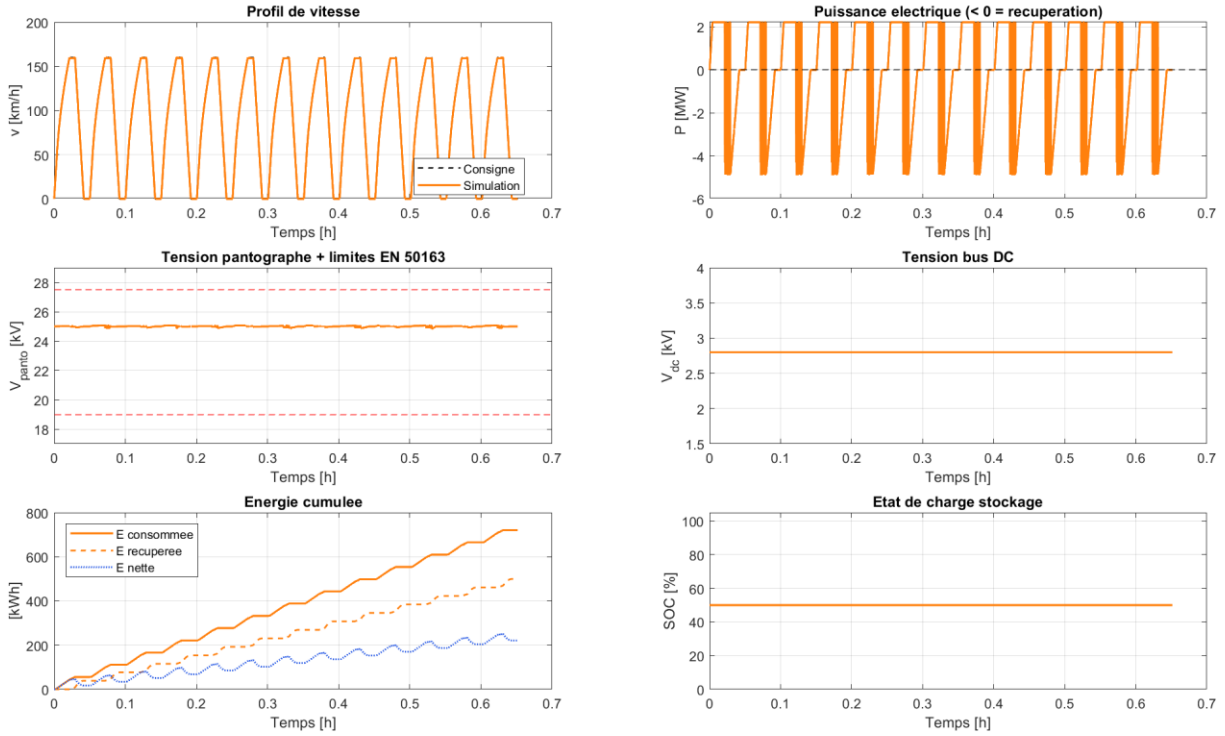


Fig. 5. Profils TER Dakar: vitesse, puissance, tension pantographe, bus DC, énergie et SOC.

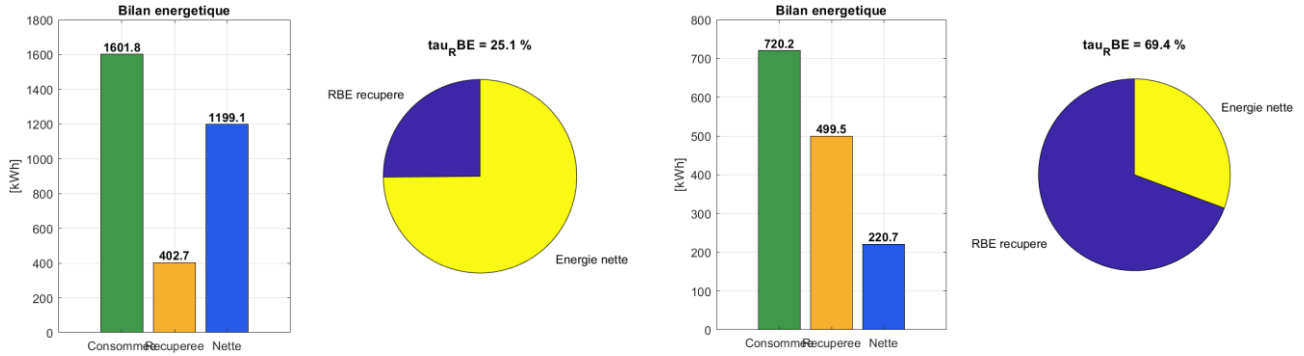


Fig. 6. Bilans énergétiques générés automatiquement pour LGV (à gauche) et TER Dakar (à droite).

La distribution du nombre d'itérations du flux de puissance Newton-Raphson (Fig. 7) confirme la robustesse numérique du solveur à chaque pas de simulation: le TER Dakar (à droite) converge presque toujours en une seule itération corrective, tandis que la LGV ONCF (à gauche), soumise à des appels de puissance plus élevés lors des phases d'accélération à 320 km/h, nécessite occasionnellement une troisième itération. Dans les deux cas, la convergence reste inférieure à 3 itérations sur la quasi-totalité du profil, ce qui valide le choix d'une formulation mono-bus pour une boucle de simulation à pas fixe.

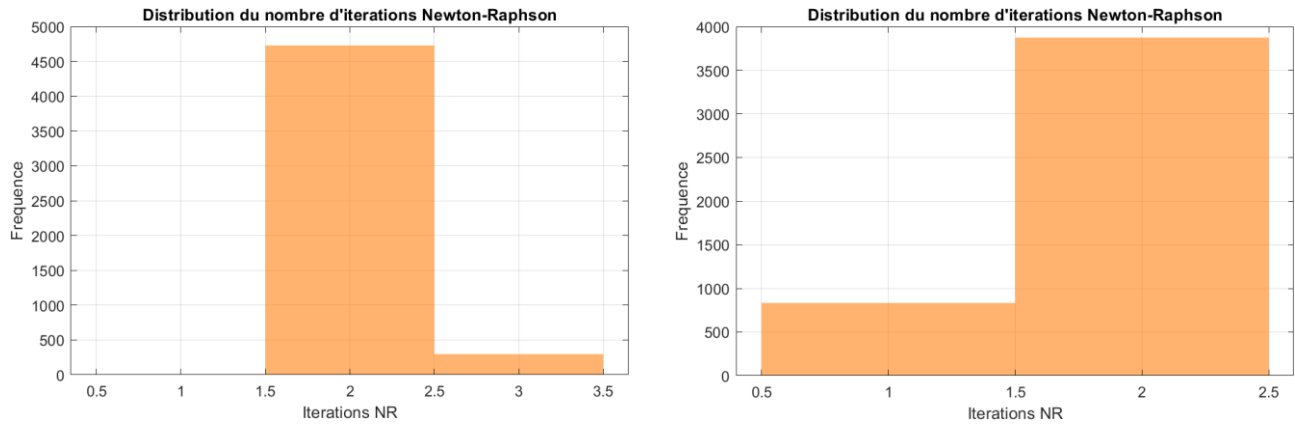


Fig. 7. Distribution du nombre d'itérations Newton-Raphson pour LGV et TER Dakar.

V. Validation, normes et limites

La validation automatique vérifie les signaux, la distance, la vitesse, l'énergie, la convergence réseau, la plage de tension et le SOC. En revanche, le projet ne constitue pas une conformité IEC/ISO complète: les normes IEC 61287, IEC 61377, IEC 60349, IEC 62236, IEC 61373, EN 50126/50128/50129 et ISO 22163 nécessitent des essais, analyses de sûreté, CEM, thermique, qualité et documentation industrielle qui dépassent ce modèle système.

Tableau II. Contrôles de validation automatique

Contrôle	Critère	Résultat
Signaux	Valeurs finies sur tous les logs	OK
Mission	Distance finale $\geq 99\%$	OK
Vitesse	Vitesse atteinte $\geq 95\%$	OK
Énergie	$E_{consommée} > E_{récupérée} \geq 0$	OK
Réseau	Convergence Newton-Raphson $\geq 99\%$	OK
Tension	EN 50163 / plage 19-27.5 kV $\geq 99\%$	OK
Stockage	SOC entre 0 et 1	OK

VI. Conclusion

Le projet livre un environnement reproductible pour analyser la récupération d'énergie ferroviaire sur deux cas d'étude. Il est adapté à un rapport académique ou portfolio, avec des limites explicitement annoncées et des résultats cohérents pour une étude système.

Références

[1] IEC 60850 / EN 50163, Railway applications - supply voltages of traction systems. [2] IEC 61287-1, Railway applications - power converters installed on board rolling stock. [3] IEC 61377, Railway applications - rolling stock combined testing. [4] IEC 62236 / EN 50121, Railway applications - electromagnetic compatibility. [5] ISO/TS 22163, Railway quality management system.