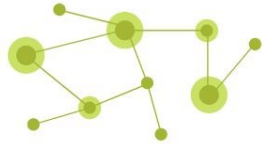


ÉNERGIE
ÉLECTRIQUE 4.0



Maîtrise Energétique des Entraînements Electriques

COMITE DE SUIVI EE4.0-MEDEE

Présentation de
Machine HT à Ruban Aluminium
10 avril 2026



Données du projet

Nom du projet : Caractérisation d'une machine haute température à ruban aluminium anodisé

Nom du porteur : Raphaël Romary

Partenaires impliqués :

Laboratoires GE : LSEE

Laboratoires hors GE : -

Autres partenaires : -

Subventions : 2022 : 27 600€

Dans un contexte de raréfaction matières premières, le **ruban aluminium anodisé** peut s'avérer être une alternative intéressante pour bobiner les machines électriques. Ce matériau présente l'avantage de pouvoir supporter des températures élevées, jusque 350°C, ce qui ouvre la voie à la conception de **machines fonctionnant à hautes températures** et à puissance massique élevée.

Le CPER CE2I a conduit à la conception et la réalisation **d'une machine synchrone de 40kW, 10 pôles**. Le stator est constitué de bobines à ruban aluminium anodisé, et le rotor est de deux types : un rotor à aimants permanents et un rotor bobiné avec du ruban aluminium anodisé

🔗 *Objectif 1*

Mettre en évidence les limites thermiques de la machine, et de caractériser son efficacité énergétique dans deux configurations de rotor:

- rotor à aimant,
- rotor à ruban aluminium anodisé.

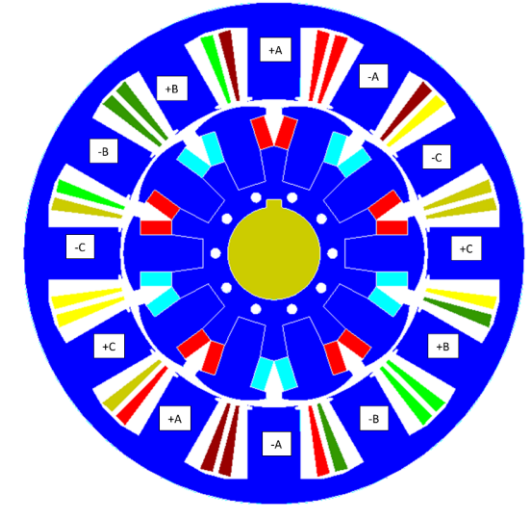
🔗 *Objectif 2*

Analyser l'effet thermique sur la commande éloignée et la commande rapprochée (thèse financée région)

Travaux effectués



Machine à rotor à aimants



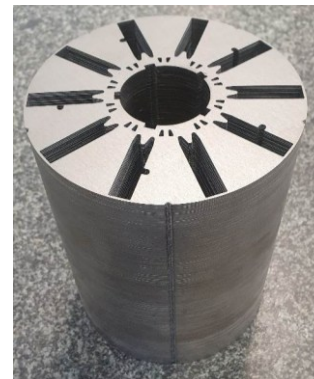
Machine à rotor bobiné



Rotor bobiné



stator



Rotor à aimants

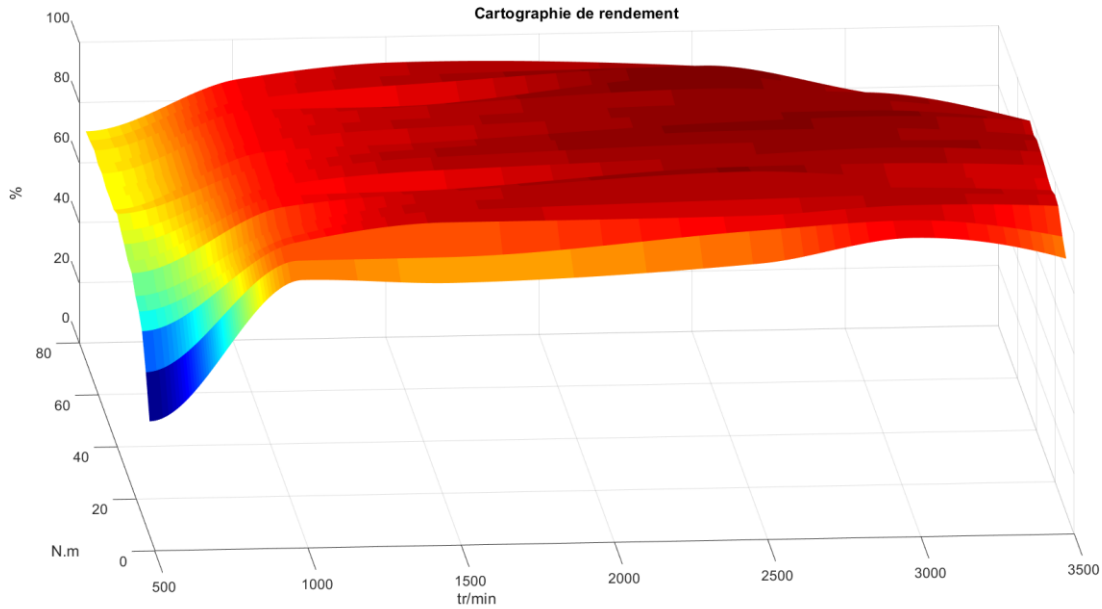


Bobines du rotor

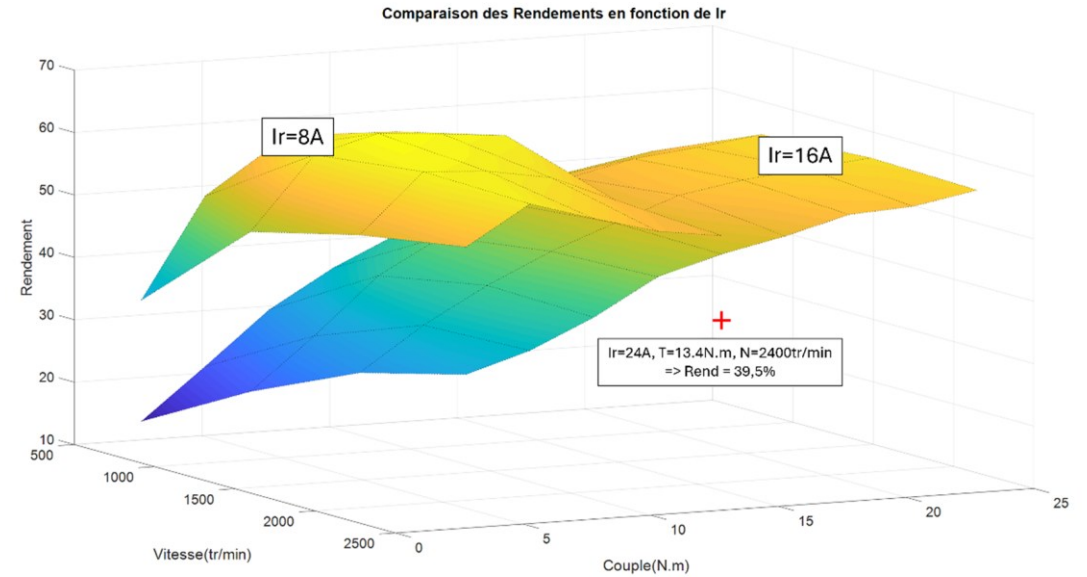
Point de fonctionnement vs contraintes thermiques.

Configuration	1	2	3	4
Current rotor I_r	30 A	25 A	20 A	15 A
Current stator (peak) I_s	80 A	92 A	112 A	157 A
Rotor Joule losses	1800 W	1264 W	812 W	458 W
Stator Joule losses	356 W	471 W	700 W	1372 W
Stator iron losses	420 W	420 W	425 W	538 W
Rotor iron losses	48 W	48 W	48 W	48 W
Torque (average)	76 Nm	77 Nm	77 Nm	76 Nm
Rotor highest temperature (winding)	517°C	406°C	329°C	309°C
Stator highest temperature (winding)	269°C	237°C	223°C	263°C

Rendement vs Point de fonctionnement



Machine à aimants



Machine à rotor bobinée

La montée en température permet de gagner en puissance massique mais cela se traduit par une dégradation du rendement par rapport à une machine à aimants de dimension et de puissance équivalente.

Analyse de l'effet thermique sur la commande éloignée et la commande rapprochée

→ thèse **Riyad Jbayli**

→ Co-financement **Région/Uartois**

Laboratoires GE : LSEE

Equipe d'encadrement :

Prof. Remus PUSCA, directeur de thèse

Prof. Raphael ROMARY, encadrant

Dr. Younes AZZOUG, encadrant

Problématique

- Fonctionnement à haute température ($\approx 300^{\circ}\text{C}$).
- Forte variation des paramètres électriques.
- Dégradation des performances de commande.
- Risque de perte de stabilité.

	Resistance ($\text{m}\Omega$)	Inductance (μH)	Courant du rotor (A)	Inertie ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	Coefficient de frottement ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$)
Machine froide	60	800	16	0.002	0.0075
Machine chaude	95	≈ 790	8,5	0.002	0.0075

$$T_{rotor} = 20^{\circ}\text{C}$$

$$T_{stator} = 20^{\circ}\text{C}$$

$$T_{rotor} = 300^{\circ}\text{C}$$

$$T_{stator} = 180^{\circ}\text{C}$$

3 axes

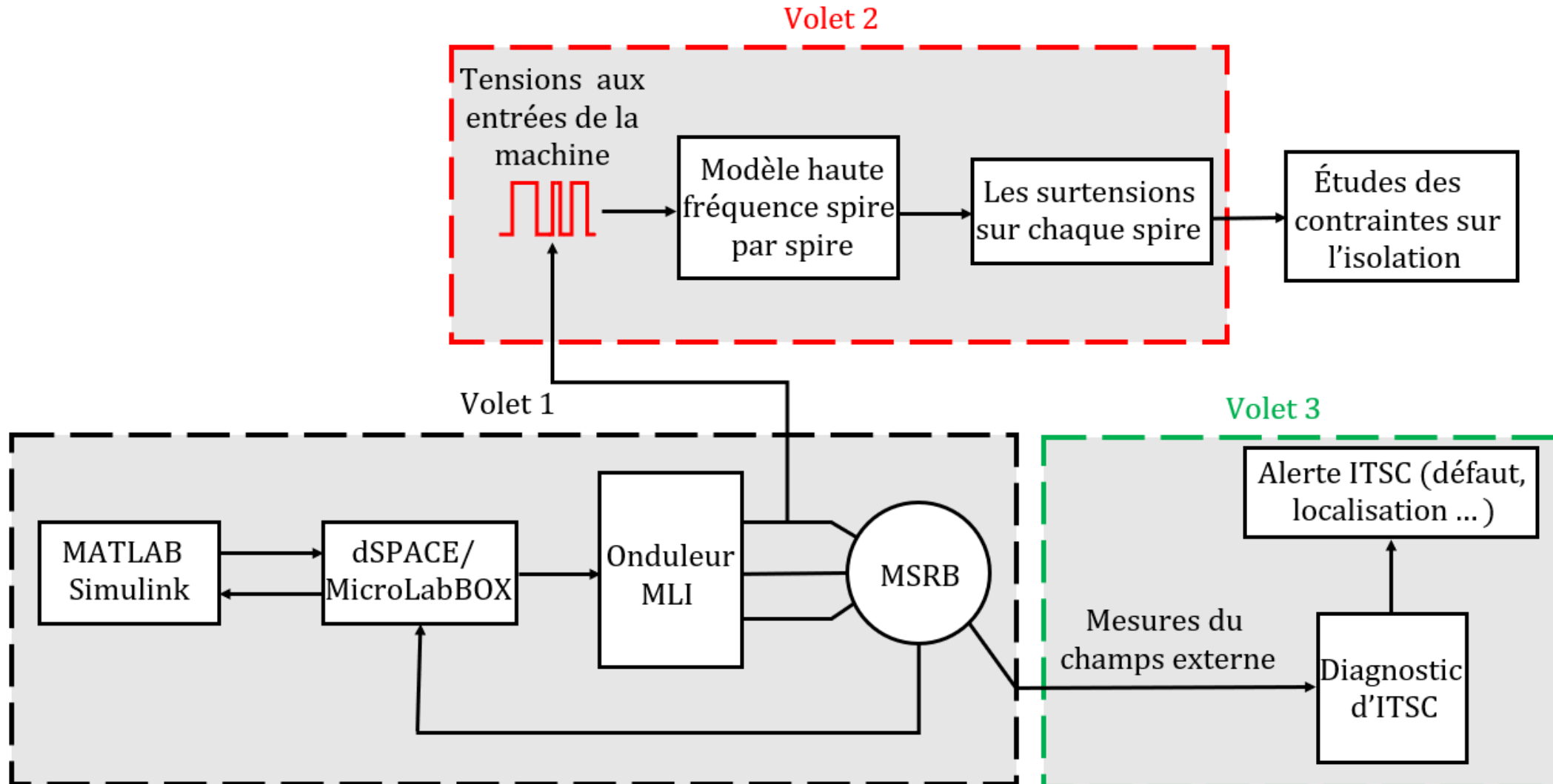
Commande
robuste

Modélisation
HF

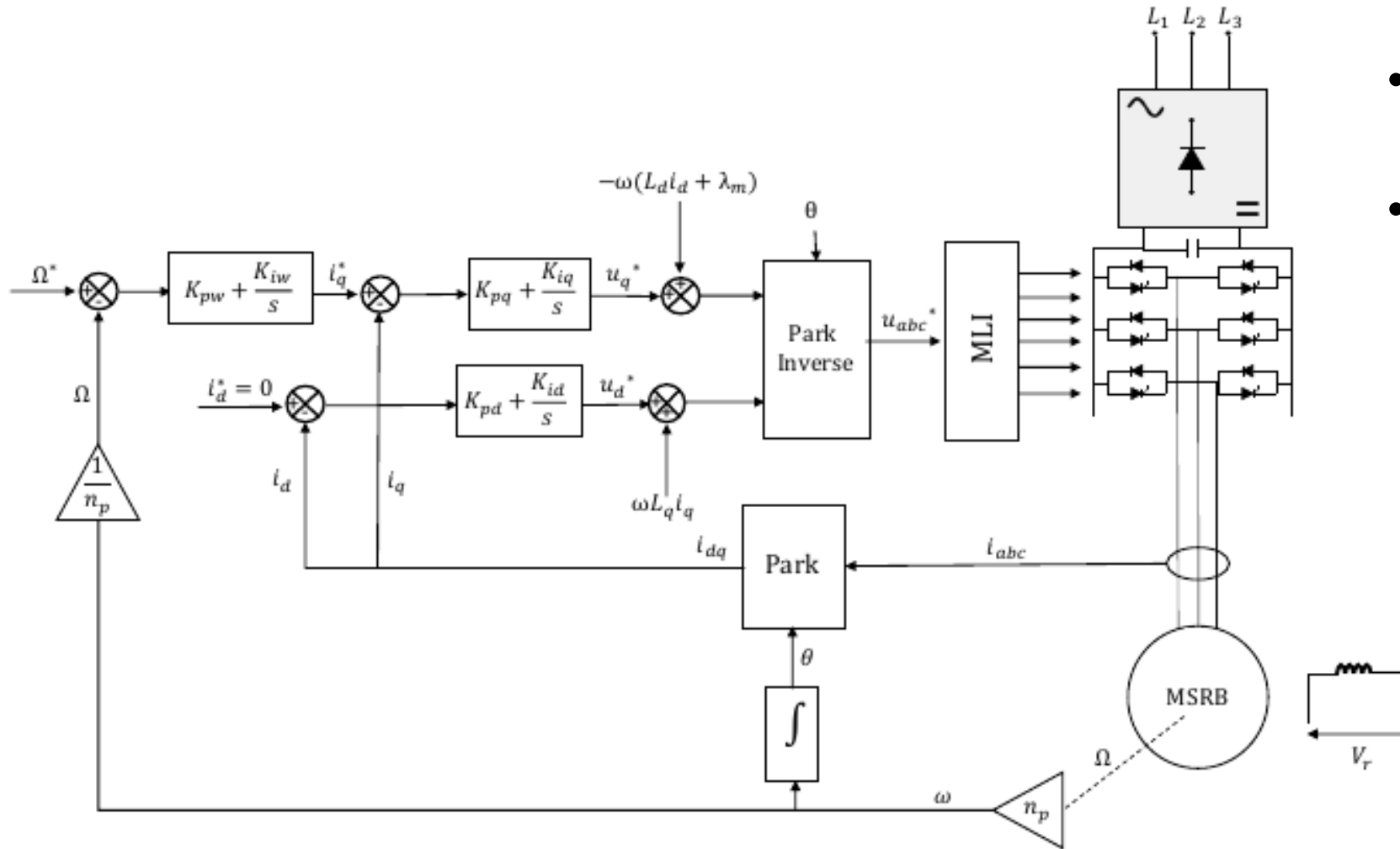
Diagnostic
d'ITSC

- Assurer une commande robuste malgré les variations thermiques.
- Développer un modèle haute fréquence réaliste.
- Analyser les tensions inter-spines.
- Valider par simulation et expérimentation.

Objectifs

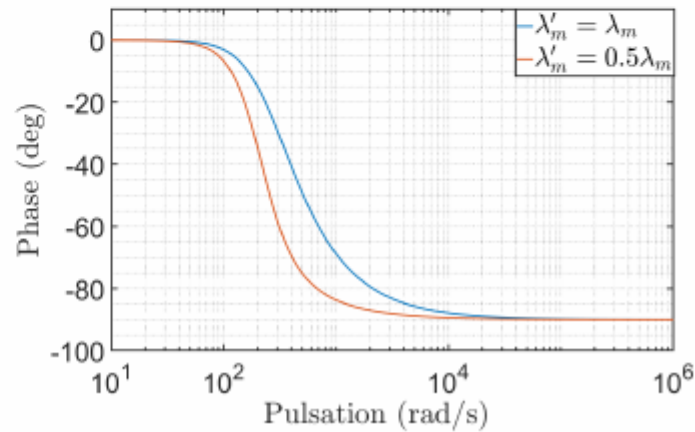
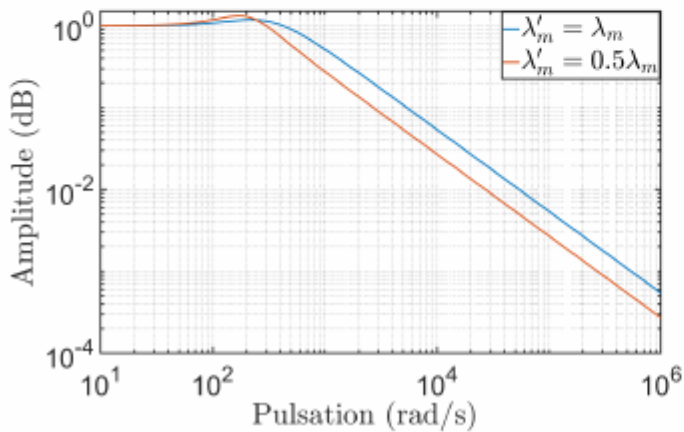
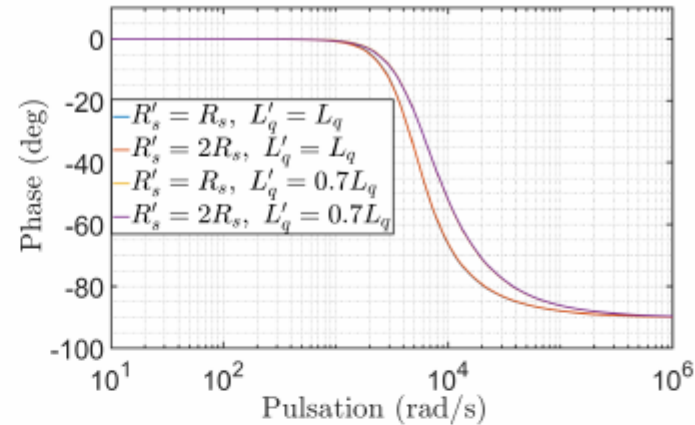
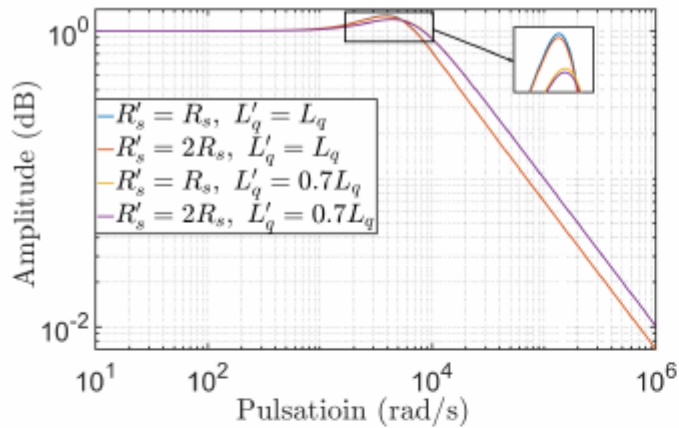


La commande vectorielle classique (FOC)



- Basée sur un modèle précis.
- Bonne performance en conditions nominales.

FOC: les limites



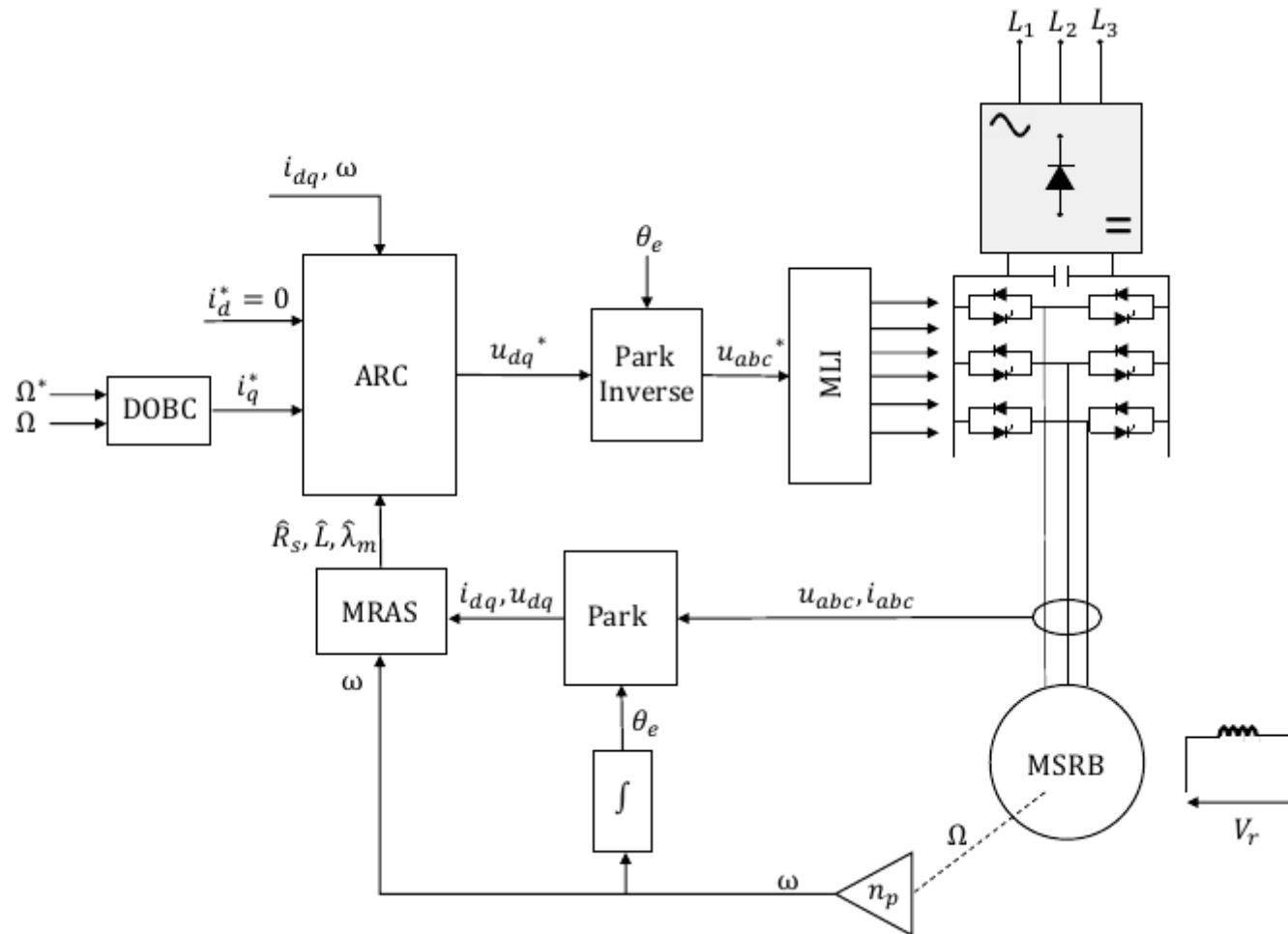
Problèmes majeurs :

- ✘ Dépendance au modèle.
- ✘ Sensibilité thermique.
- ✘ Dégradation dynamique.

Conséquences :

- ⚠ Ondulations (courant / couple)
- ⚠ Erreurs de régulation.
- ⚠ Risque d'instabilité.

Commande robuste proposée

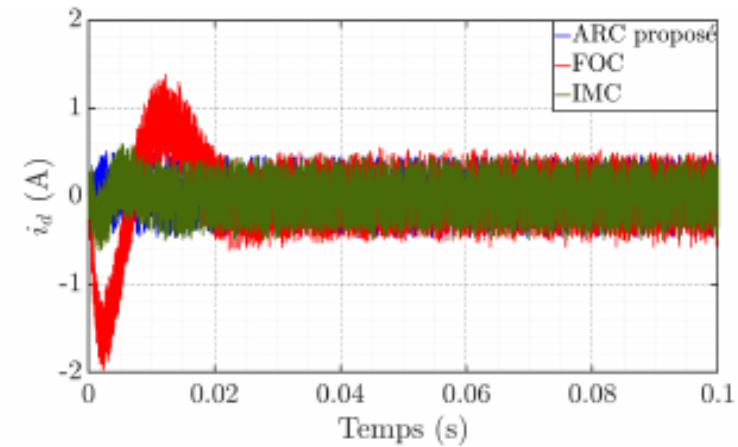
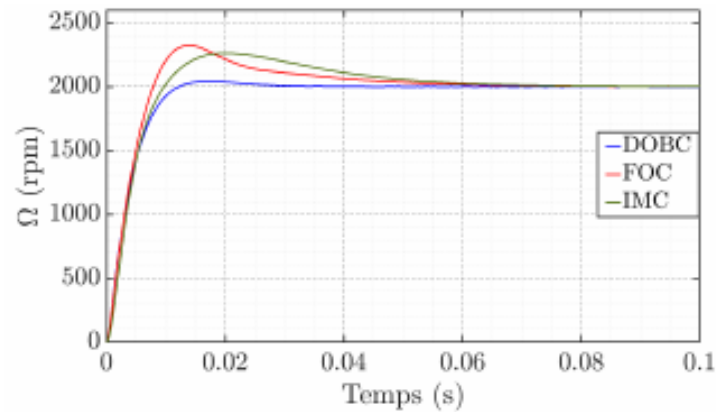


- Compensation des variations des paramètres électriques.
- Adaptation en temps réel du modèle de la machine.
- Robustesse face aux incertitudes et aux perturbations.
- Amélioration de la stabilité du système.

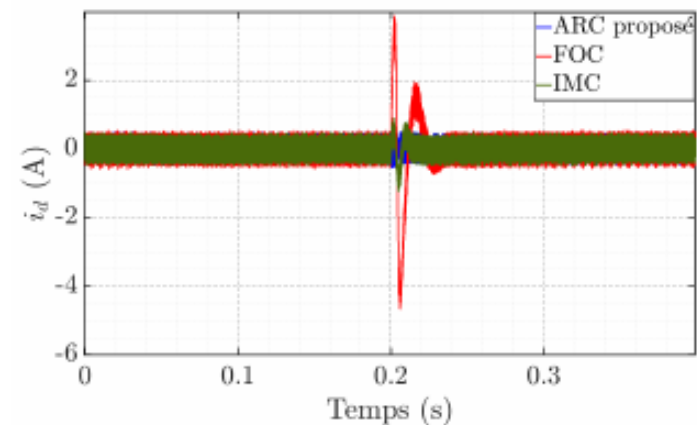
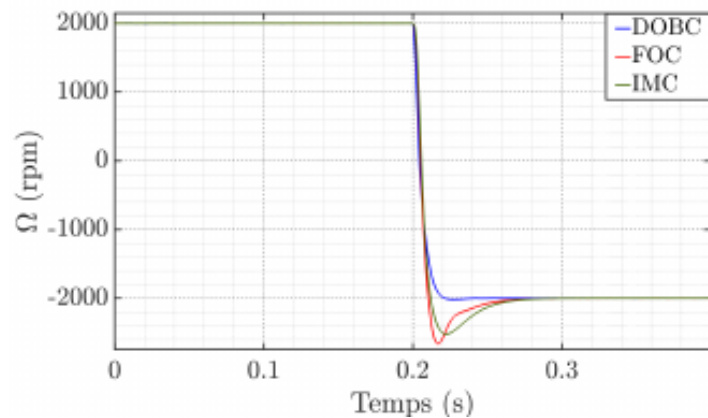
Commande robuste proposée

Simulation

Réponse à un échelon

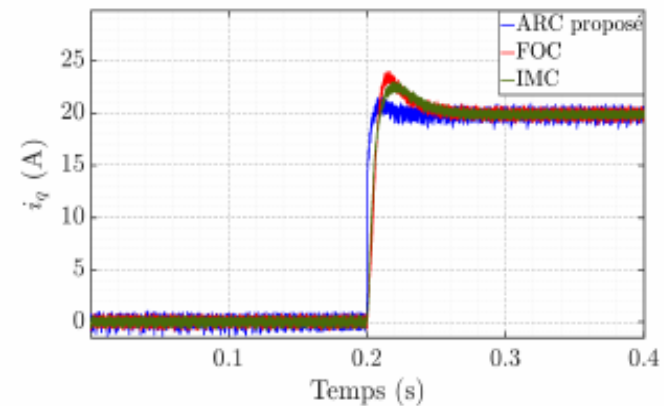
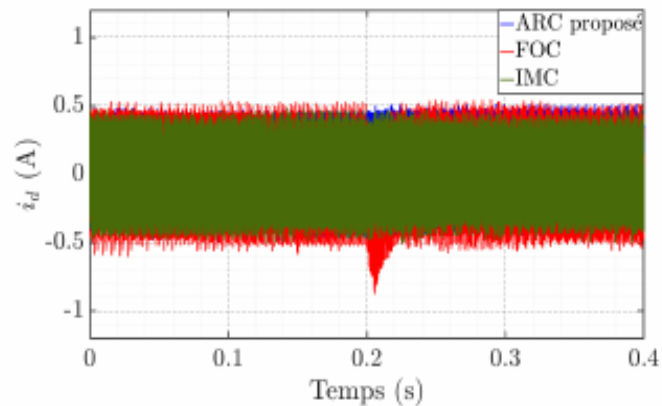
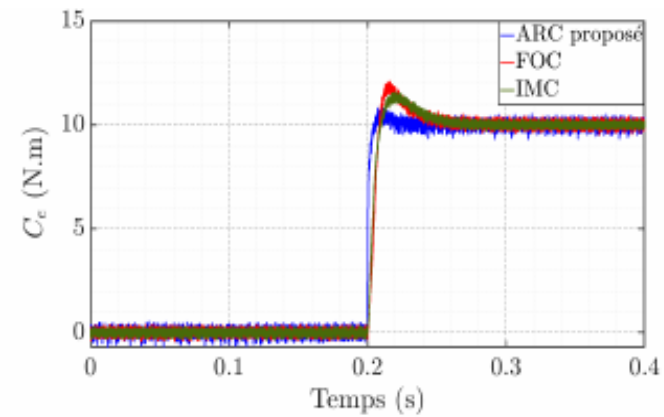
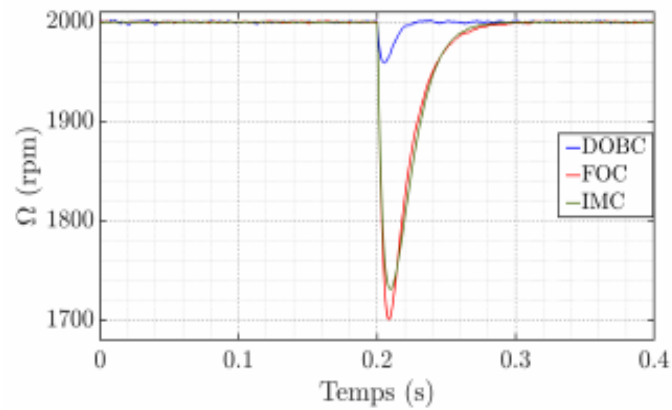


Inversion de vitesse



Commande robuste proposée

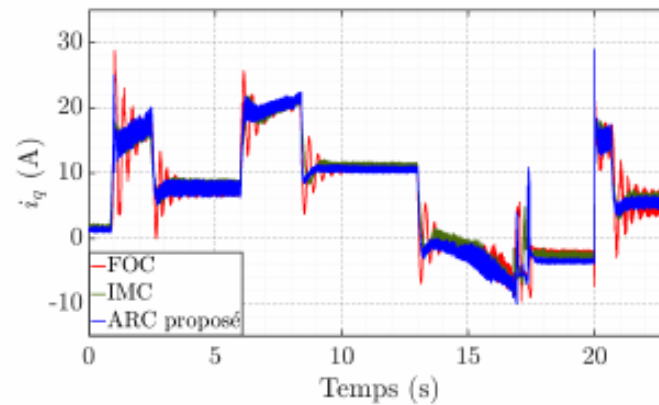
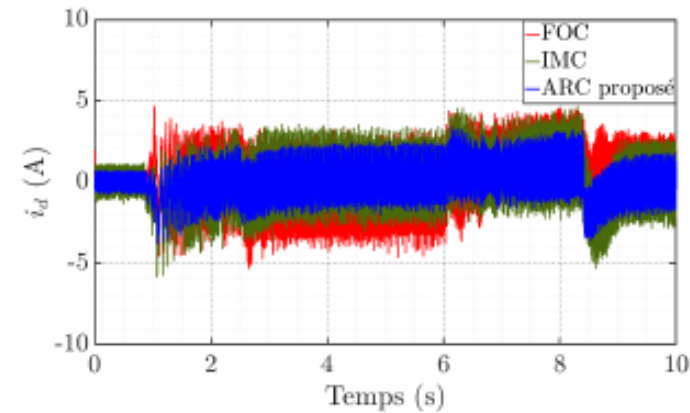
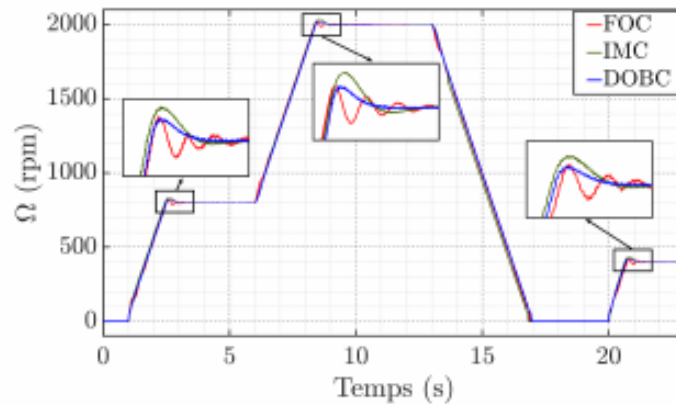
Simulation Couple de charge



Commande robuste proposée

Expérimental

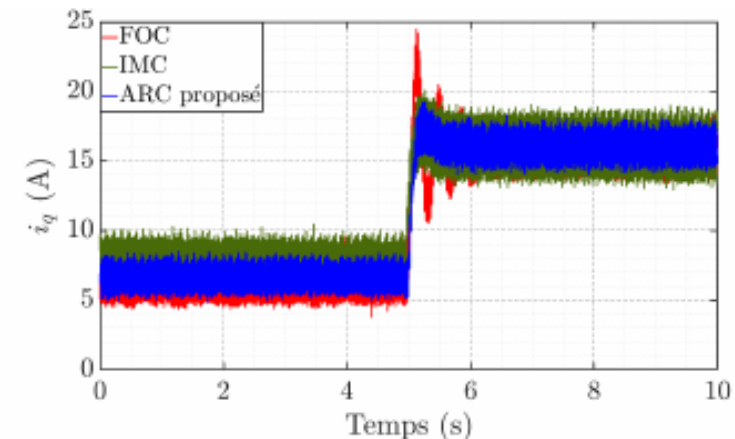
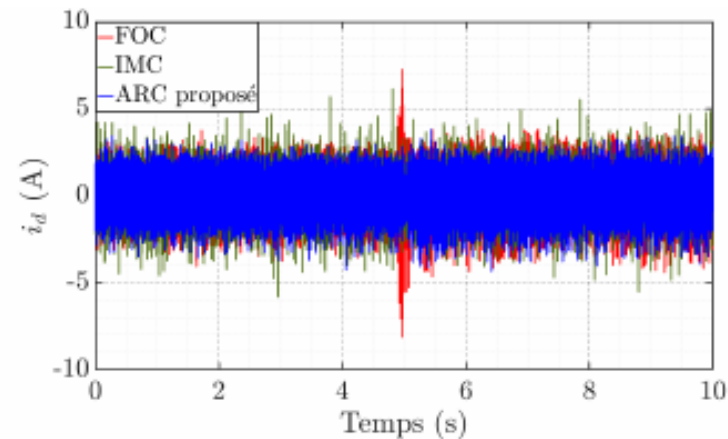
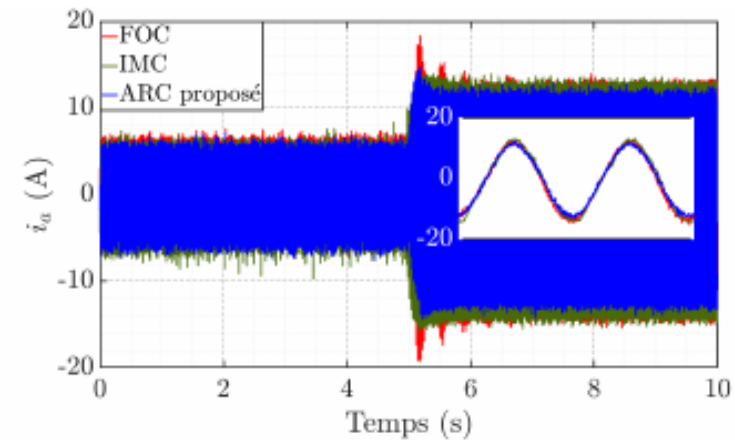
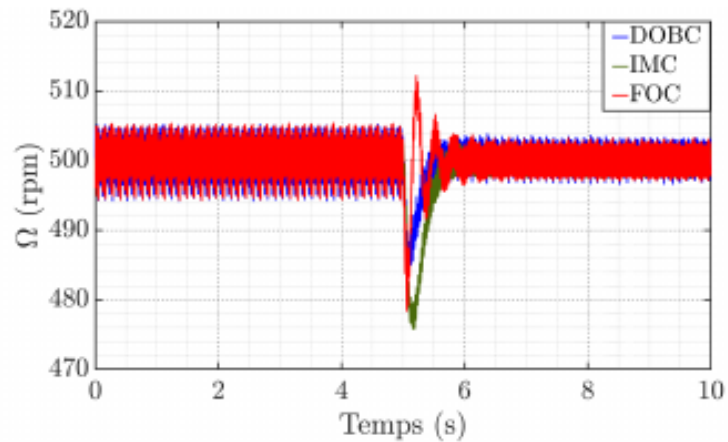
Test de benchmark



Commande robuste proposée

Expérimental

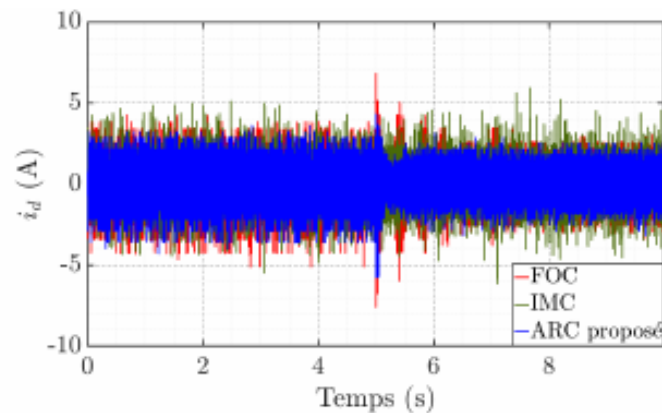
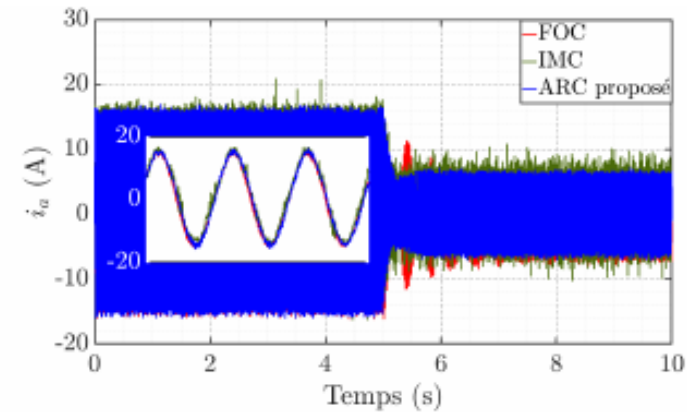
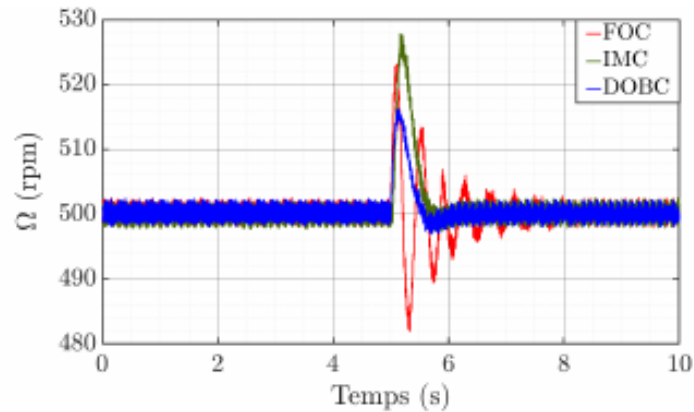
Couple de charge (température ambiante)



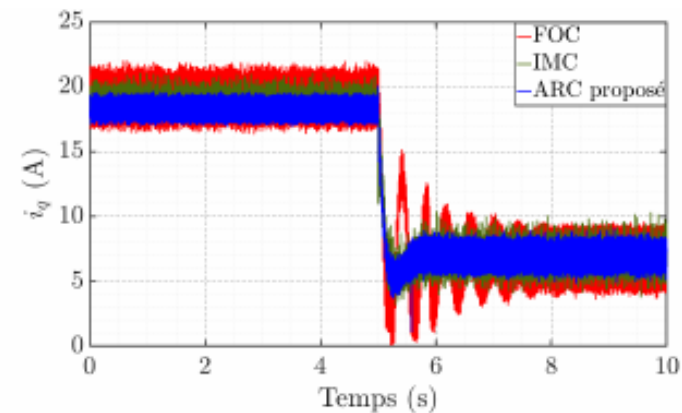
Commande robuste proposée

Expérimental

Inversion de couple de charge (température élevée)



(c)

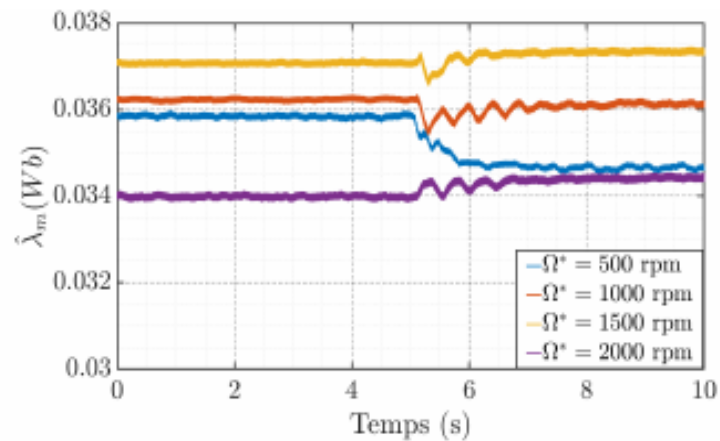
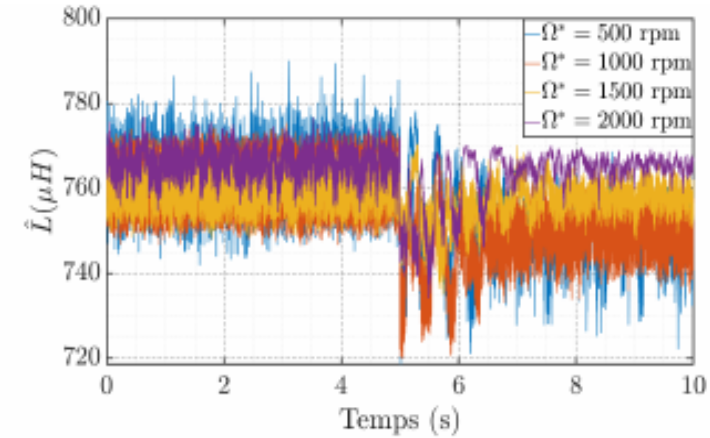
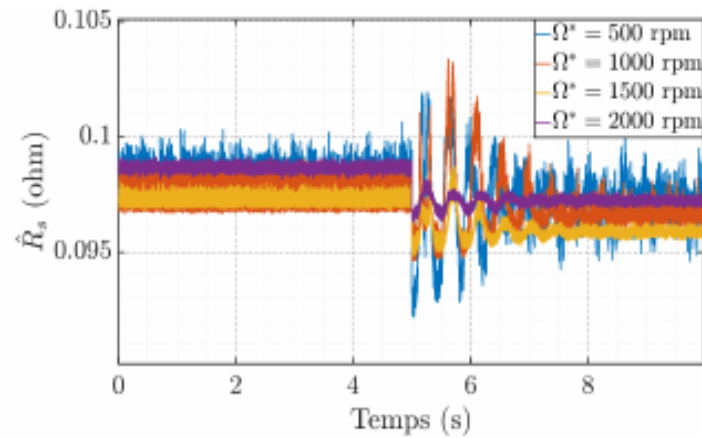


(d)

Commande robuste proposée

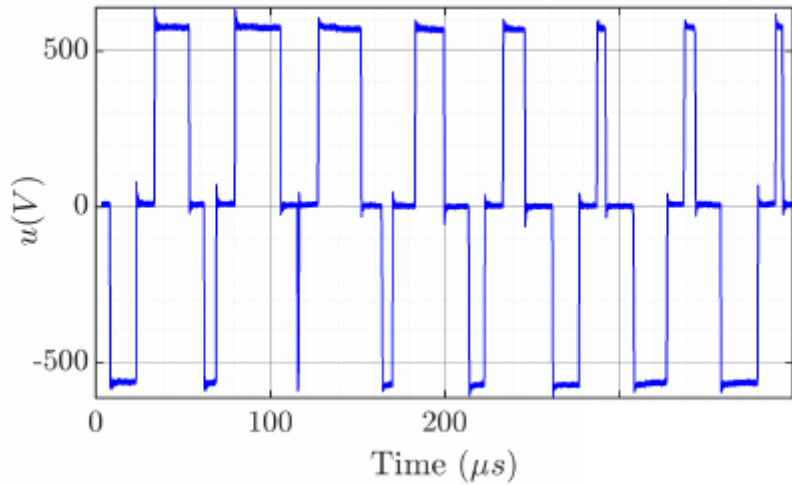
Expérimental

Estimations des paramètres en hautes températures



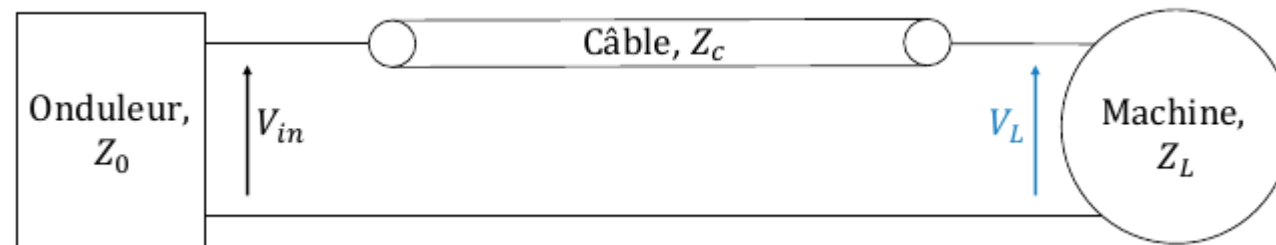
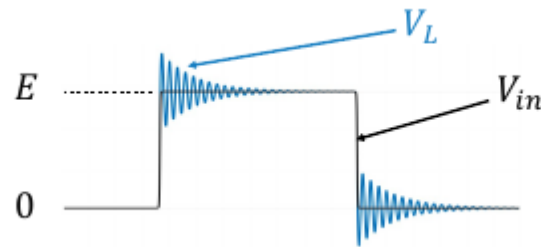
Modèle haute fréquence

Tension à la sortie de l'onduleur

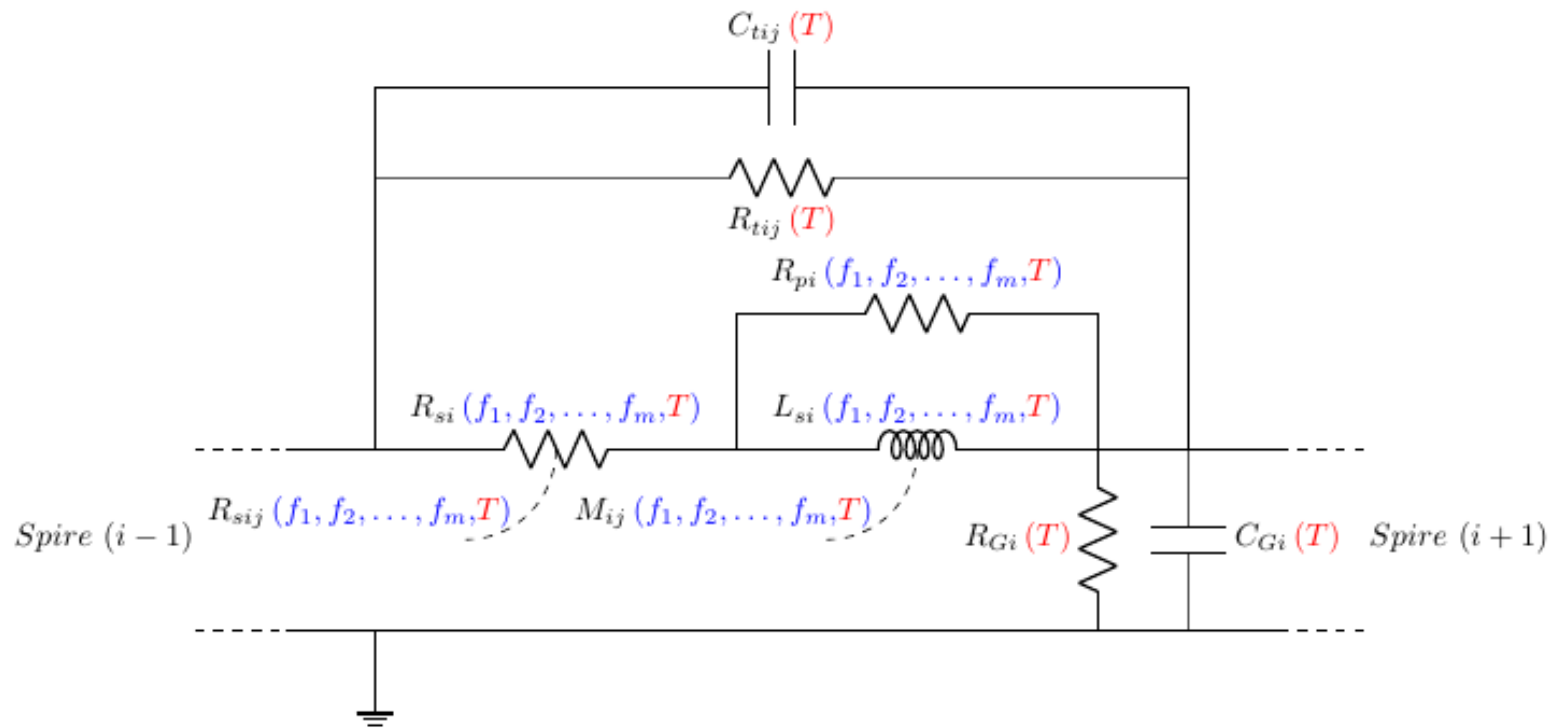


$$\frac{dv}{dt} \gg$$

Temps de montée ≈ 200 ns



Modèle Haute fréquence d'une seule Spire



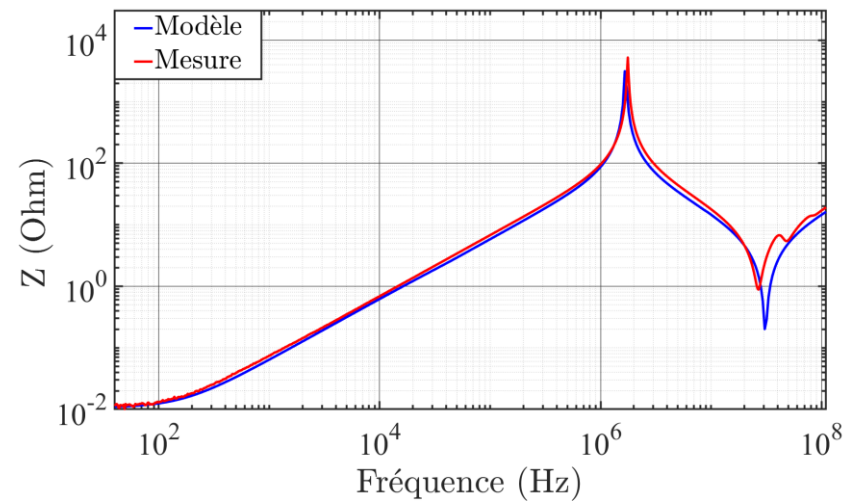
- Dépendance en fréquence
- Dépendance en température
- Calcul des paramètres par éléments finis

Validation fréquentielle du modèle

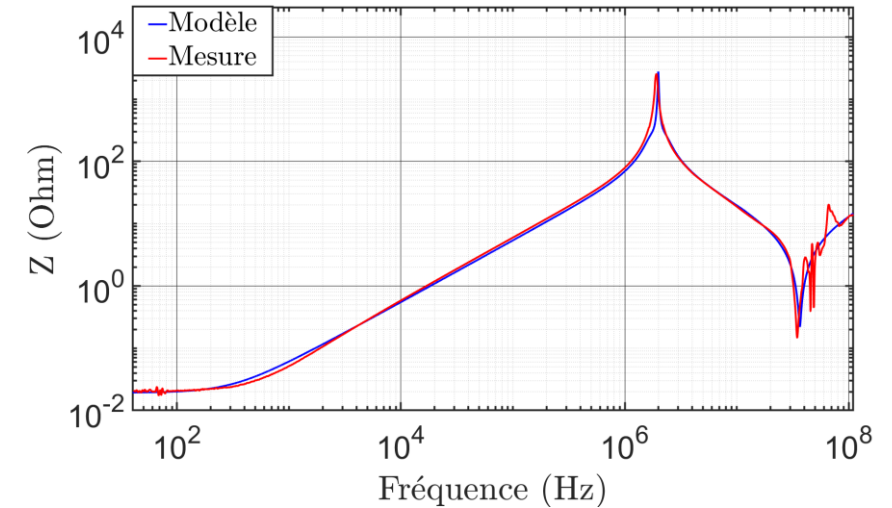
bobine à l'air



20°C



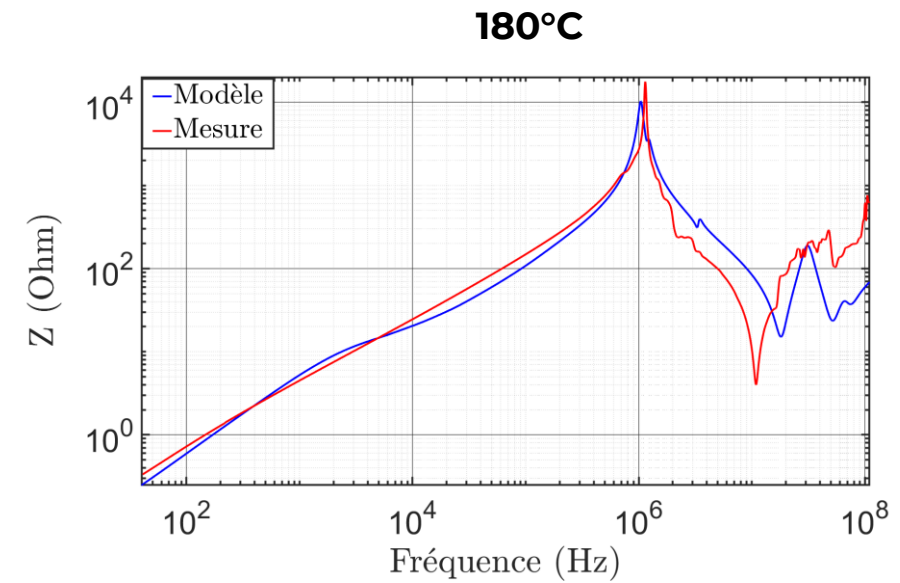
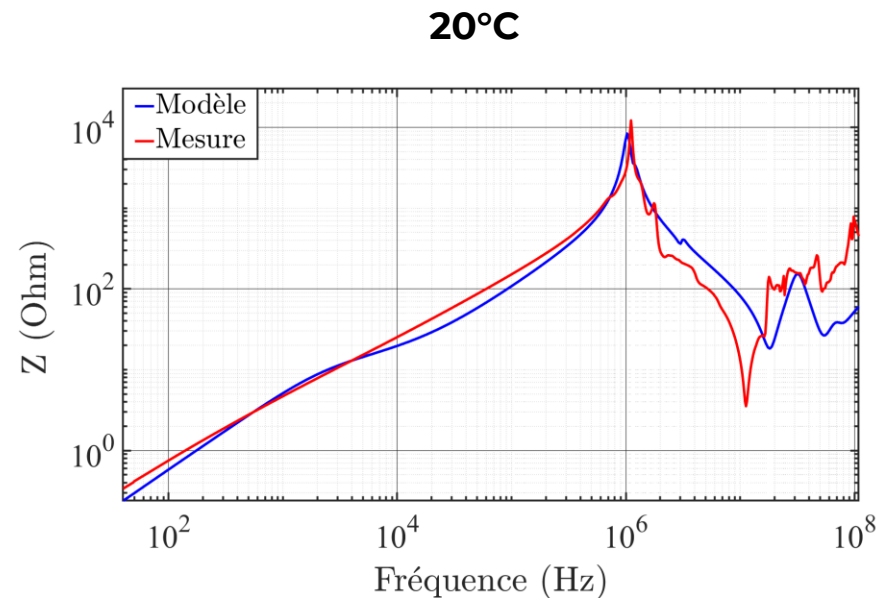
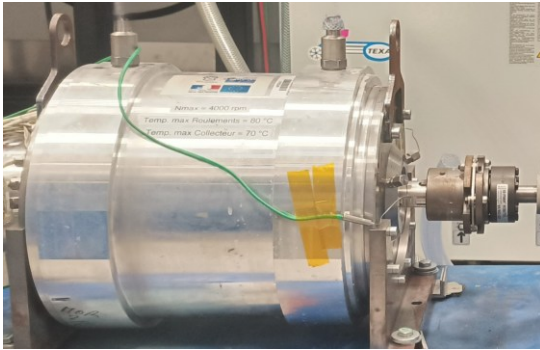
300°C



Modèle haute fréquence

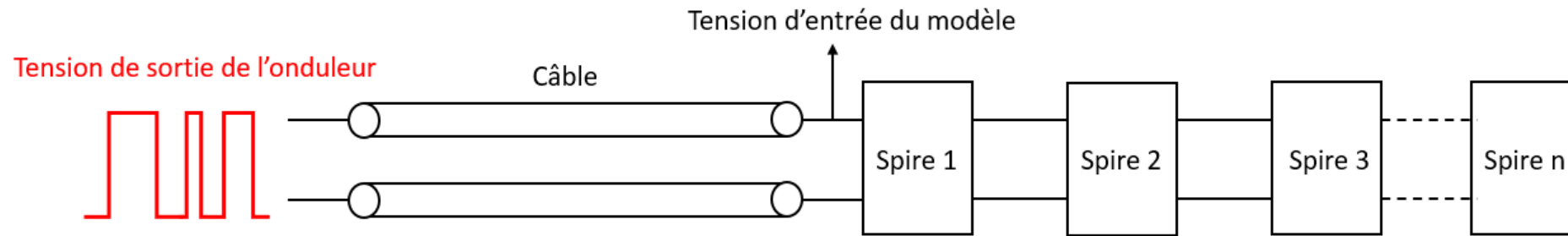
Validation fréquentielle du modèle

phase complète

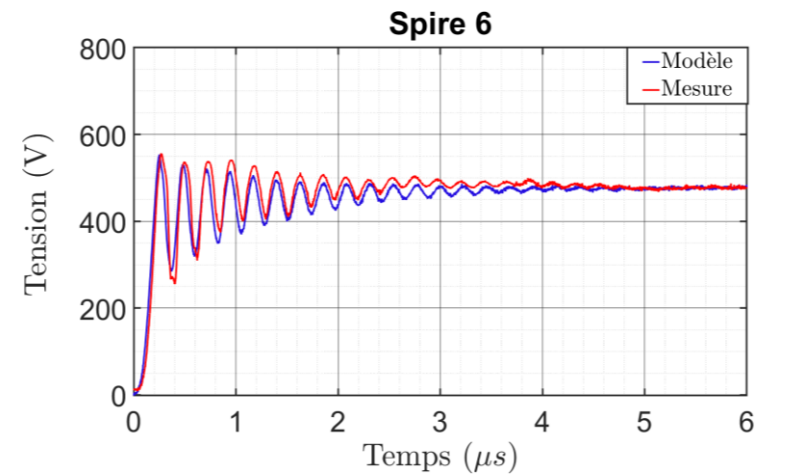
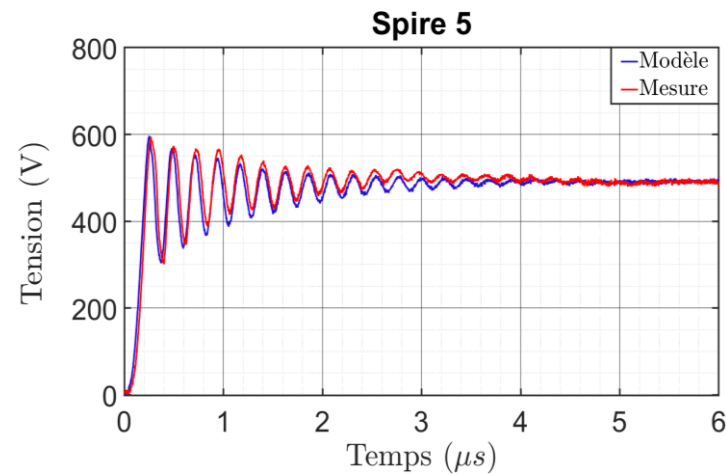
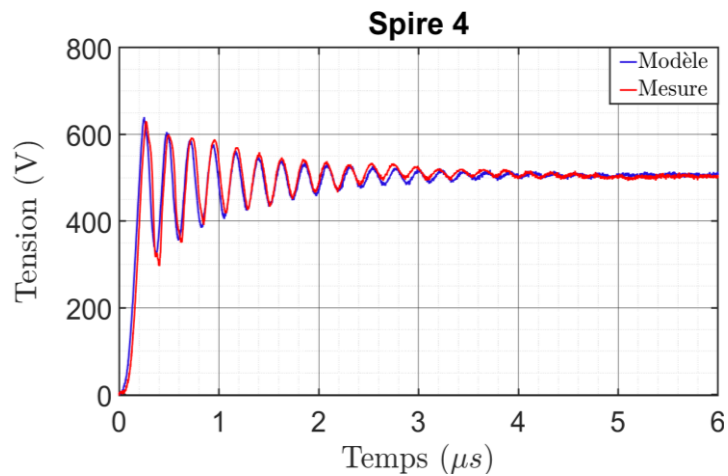
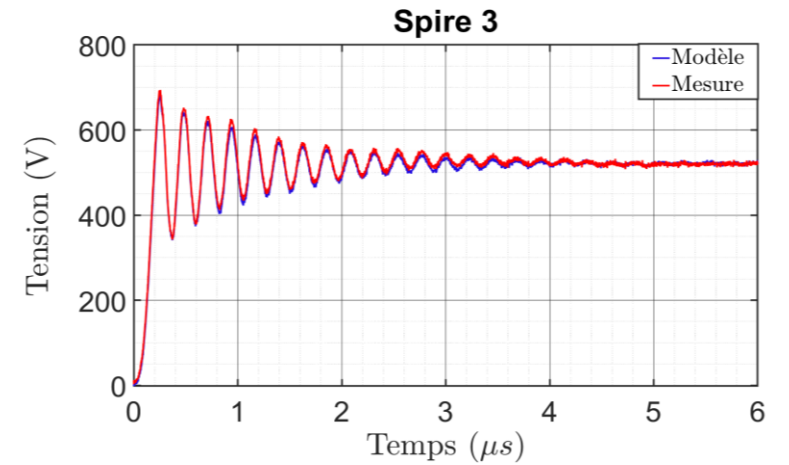
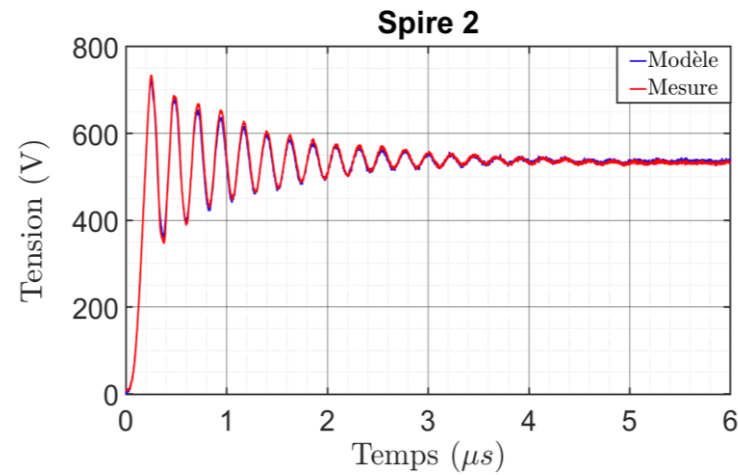
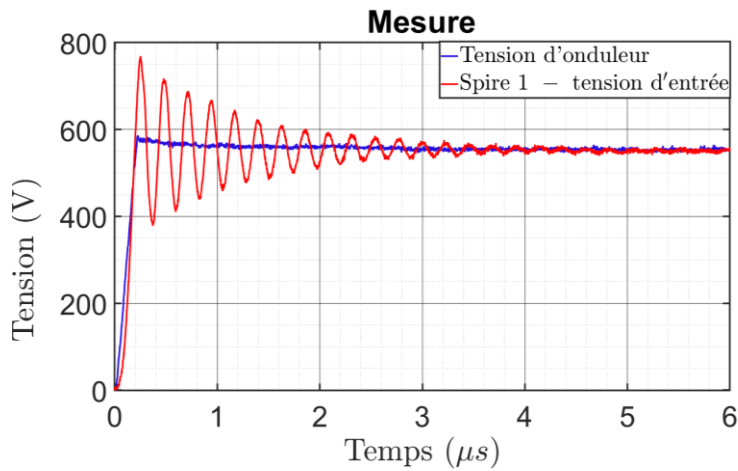


Modèle haute fréquence

Validation temporelle du modèle



Validation temporelle du modèle (câble de 5m, 300°C)

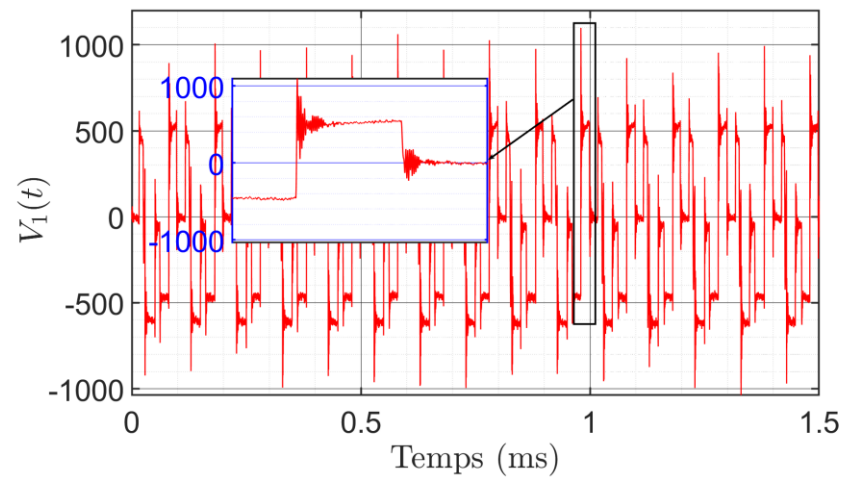


Modèle haute fréquence

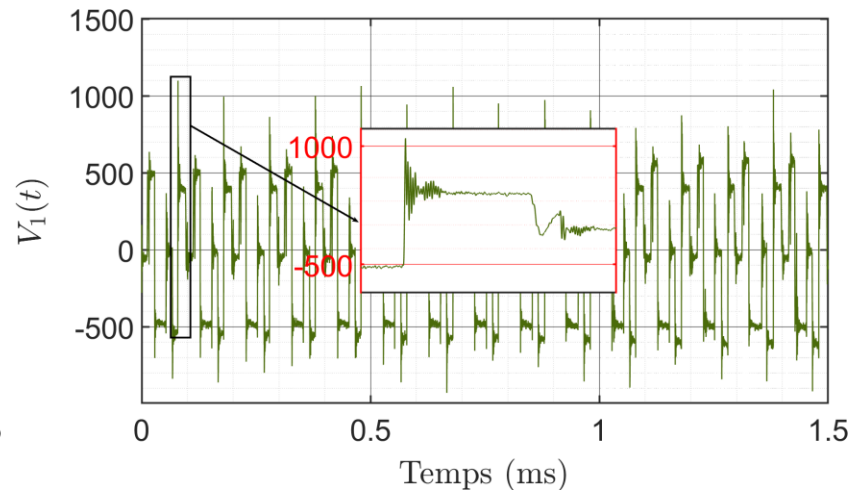
Test des commandes

Tension d'entrée:

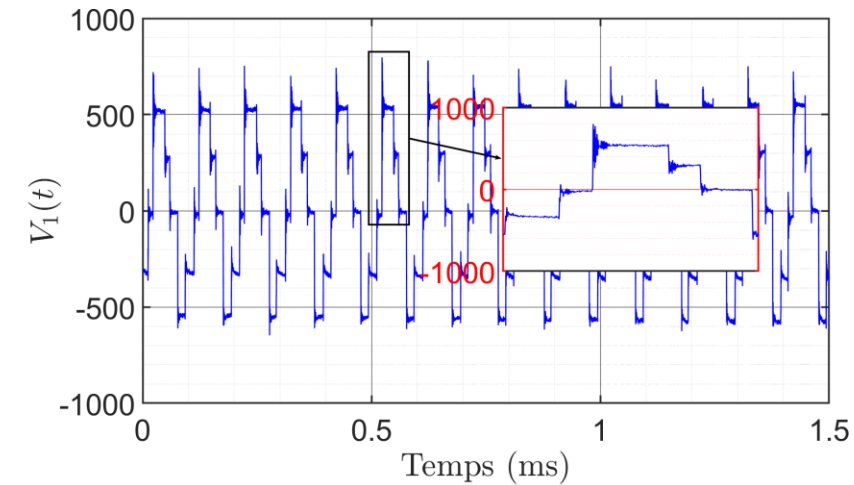
FOC



IMC



ARC



Modèle haute fréquence

Test des commandes

Commande	Vitesse (rpm)	Charge	Température (\approx)	V_{\max} (V)	ΔV_{\max} (V)	$\max\left(\frac{dv}{dt}\right)$ (kV/ μ s)
FOC	500	0	20°C	1098	59.8	10.11
IMC	500	0	20°C	1092	59.12	10.05
ARC	500	0	20°C	862	43.2	7.54
FOC	2000	0	20°C	1381	62.4	12.69
IMC	2000	0	20°C	1510	66.5	14.05
ARC	2000	0	20°C	913	50.5	7.95
FOC	500	C_{r1}	100°C	1224	67.7	13.71
IMC	500	C_{r1}	100°C	904	51.2	10.72
ARC	500	C_{r1}	100°C	839	41.7	6.39
FOC	2000	C_{r1}	100°C	876	41.1	9.41
IMC	2000	C_{r1}	100°C	982	46.2	10.60
ARC	2000	C_{r1}	100°C	845	42.3	6.43
FOC	500	$C_{r2} > C_{r1}$	180°C	1053	60.5	12.07
IMC	500	$C_{r2} > C_{r1}$	180°C	1183	67.3	13.33
ARC	500	$C_{r2} > C_{r1}$	180°C	800	41.05	6.28
FOC	2000	$C_{r2} > C_{r1}$	180°C	1557	77.3	19.40
IMC	2000	$C_{r2} > C_{r1}$	180°C	1371	79.2	18.04
ARC	2000	$C_{r2} > C_{r1}$	180°C	1093	57.2	11.64

Conclusion

✓ Commande

- Développement d'une commande robuste adaptée aux hautes températures
- Compensation efficace des variations de paramètres.
- Amélioration de la stabilité et des performances dynamiques.
- Validation par simulation et experimentation.

✓ Modélisation haute fréquence

- Développement d'un modèle spire par spire réaliste.
- Prise en compte de la dépendance en fréquence et temperature.
- Estimation des tensions inter–spires.

Conférences:

- Disturbance Observer and Adaptive Robust Control for PMSM Drive Using MRAS-Based Parameters Estimation ([ICATE 2024](#))
- Robust control of a high-temperature synchronous machine with anodized aluminum coils ([SATAS 2025 et IEEE France Day 2025 Energy & Power Conversions](#))
- High-Frequency Modeling of Electric Machine Phases with Anodized Aluminum Windings ([ISEF 2025](#))

Revue:

- Improved Adaptive Robust Control with MRAS for High-Temperature Wound Rotor Synchronous Machine Featuring Anodized Aluminum Coils ([IEEE Access](#))
- High Frequency Modeling of Electric Machine with Anodized Aluminum Windings at High Temperatures. Frequency and Time domain Validation ([IET Science, Measurement & Technology](#)) (**en cours**)

Merci pour votre attention

