

Digital Twin

Jumeau Numérique d'un Entraînement Électrique à Vitesse Variable

Rapport Technique Complet

Modules couverts :

- Électrotechnique
- Électronique de Puissance
- Automatique
- Informatique Industrielle (HMI)

Date : 15 mai 2026

Birane DIAW

Table des matières

1	Introduction.....	3
2	Module 1 — Électrotechnique	4
2.1	Modèle mathématique	4
2.2	Paramètres du moteur	4
2.3	Méthode numérique.....	4
2.4	Scénario simulé	4
2.5	Grandeurs dérivées	4
2.6	Résultats et interprétation	5
3	Module 2 — Électronique de Puissance	5
3.1	Architecture du hacheur.....	5
3.2	Modulation de largeur d’impulsion (MLI)	6
3.3	Simulation du courant d’induit.....	6
3.4	Analyse spectrale — THD	6
3.5	Métriques d’ondulation	6
3.6	Résultats et interprétation	7
4	Module 3 — Automatique.....	8
4.1	Structure de régulation	8
4.2	Correcteur PI avec anti-windup.....	8
4.3	Synthèse par placement de pôles	8
4.3.1	Boucle courant.....	8
4.3.2	Boucle vitesse.....	8
4.4	Scénario de simulation	8
4.5	Métriques de performance	9
4.6	Résultats et interprétation	10
5	Module 4 — Informatique Industrielle (HMI).....	11
5.1	Framework et architecture	11
5.2	Fonctionnalités	11
5.2.1	Scénarios prédéfinis.....	11
5.2.2	Mode manuel	11
5.2.3	Alarmes temps réel	11
5.3	Graphes temps réel	11
5.4	Export de données	12
5.5	Résultats et captures d’écran	12
6	Intégration et Scénarios Batch	13
6.1	Fichier d’orchestration.....	13
6.2	Scénarios batch disponibles.....	13
6.3	Exemple de session batch.....	13
6.4	Résultats du scénario intégré	14
7	Mise en Œuvre Physique et Mesures en Laboratoire.....	14
7.1	Architecture générale du banc d’essai	14
7.2	Moteur DC — Choix et caractéristiques	15
7.3	Pont en H — Composants et assemblage	15
7.3.1	Interrupteurs de puissance	15

7.3.2 Driver de grille	15
7.3.3 Bus DC et filtrage	15
7.3.4 Branchements électriques	16
7.4 Carte de commande MLI	16
7.5 Capteurs et mesures	16
7.5.1 Mesure de la vitesse de rotation	16
7.5.2 Mesure du courant d'induit	17
7.5.3 Mesure de la tension d'induit	17
7.5.4 Mesure du couple électromagnétique	17
7.6 Alimentation DC du laboratoire	17
7.7 Protocole de validation du jumeau numérique	18
7.8 Budget matériel indicatif	18
8 Conclusion	19

1 Introduction

Ce document présente la conception, l'implémentation et la validation d'un jumeau numérique (Digital Twin) dédié à un entraînement électrique à courant continu à vitesse variable. L'objectif est de modéliser, simuler et superviser en temps réel un système physique composé d'un moteur DC, d'un hacheur quatre quadrants et d'une régulation cascade PI.

Le projet est structuré en quatre modules disciplinaires :

1. Module 1 — Électrotechnique : modélisation du moteur DC à excitation séparée par équations d'état et résolution numérique (Runge-Kutta adaptatif).
2. Module 2 — Électronique : simulation du hacheur quatre quadrants avec modulation de largeur d'impulsion (MLI) bipolaire, analyse du courant d'induit (ondulation, spectre FFT, THD).
3. Module 3 — Automatique : synthèse et simulation d'une régulation en cascade vitesse/courant par correcteurs PI avec placement de pôles et anti-windup.
4. Module 4 — Informatique Industrielle : interface homme-machine (HMI) temps réel sous CustomTkinter avec scénarios prédéfinis, mode manuel et export de données.

Le fichier d'intégration `main_integration.py` permet d'orchestrer l'ensemble via une interface en ligne de commande (CLI) et de lancer des scénarios batch avec export CSV automatique.

2 Module 1 — Électrotechnique

2.1 Modèle mathématique

Le moteur DC à excitation séparée est modélisé par un système d'équations différentielles ordinaires (EDO) du premier ordre, linéaire et stationnaire :

$$L_a \frac{di_a}{dt} = V_a - R_a i_a - K_e \omega \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t i_a - f\omega - T_l \quad (2)$$

où i_a est le courant d'induit, ω la vitesse angulaire, V_a la tension d'alimentation et T_l le couple de charge. Les paramètres sont identifiés à partir des données de plaque signalétique d'un moteur industriel 2,2 kW, 220 V, 1500 tr/min.

2.2 Paramètres du moteur

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Puissance nominale	P_n	2200	W
Tension nominale	U_n	220	V
Courant nominal	I_n	12	A
Vitesse nominale	n_n	1500	tr/min
Résistance d'induit	R_a	1.5	Ω
Inductance d'induit	L_a	0.02	H
Constante de f.e.m.	K_e	1.401	V/(rad/s)
Constante de couple	K_t	1.401	N·m/A
Inertie totale	J	0.05	kg·m ²
Frottement visqueux	f	0.01	N·m·s/rad

Table 1 – Paramètres physiques du moteur DC modélisé.

2.3 Méthode numérique

La résolution des équations d'état est effectuée par la méthode de Runge-KuttaFehlberg d'ordre 5 avec pas adaptatif (RK45), implémentée dans `scipy.integrate.solve_ivp`. Cette méthode est privilégiée à un RK4 à pas fixe en raison du caractère raide du système électrique (constante de temps $\tau_e = L_a/R_a \approx 13.3$ ms).

2.4 Scénario simulé

Le scénario retenu est un démarrage à vide ($T_l = 0$) suivi d'une application de charge ($T_l = 5$ N·m) à $t = 1$ s. La simulation s'étend sur 3 secondes avec une résolution temporelle fine (3000 points).

2.5 Grandeurs dérivées

À partir des solutions $i_a(t)$ et $\omega(t)$, les grandeurs suivantes sont calculées :

— Couple électromagnétique : $T_{em} = K_t i_a$

- Puissance électrique absorbée : $P_{elec} = V_a i_a$
- Puissance mécanique utile : $P_{meca} = T_{em} \omega$
- Rendement instantané : $\eta = P_{meca}/P_{elec}$ (avec protection contre la division par zéro au démarrage).

2.6 Résultats et interprétation

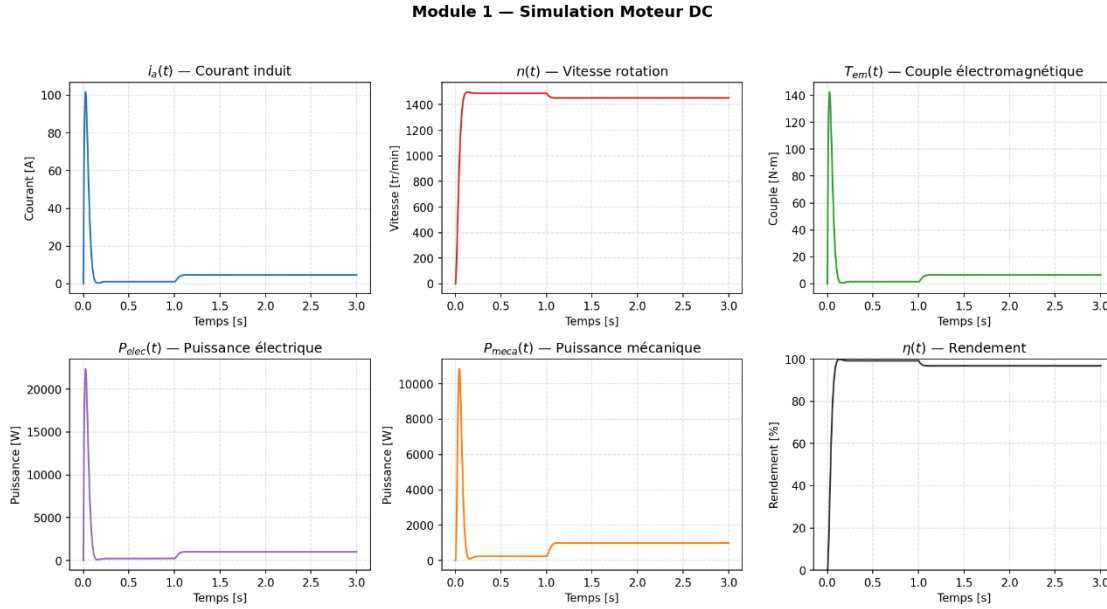


Figure 1 — Résultats du Module 1 : courant d’induit, vitesse de rotation, couple électromagnétique, puissances électrique et mécanique, et rendement du moteur DC lors d’un démarrage à vide suivi d’une charge à $t = 1$ s.

Les résultats attendus sont :

- Un pic de courant au démarrage d’environ 100 A dû à l’absence de f.e.m. initiale.
- Une vitesse finale proche de 1470 tr/min (chute de vitesse due à la charge de 5 N·m).
- Un rendement à régime établi compris entre 85 et 90 %.

3 Module 2 — Électronique de Puissance

3.1 Architecture du hacheur

Le convertisseur statique est un hacheur quatre quadrants (pont en H) alimenté par une source continue de tension $V_{dc} = 220$ V. La commande utilise une MLI bipolaire : la tension de sortie vaut alternativement $+V_{dc}$ ou $-V_{dc}$ selon la comparaison entre un signal de commande $m \in [-1, 1]$ et une porteuse triangulaire normalisée.

3.2 Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La porteuse triangulaire de fréquence $f_{PWM} = 10$ kHz est définie par :

$$c(t) = 1 - 4 \left| \frac{t \bmod T_{PWM}}{T_{PWM}} - 0.5 \right|, \quad T_{PWM} = \frac{1}{f_{PWM}} \quad (3)$$

La tension instantanée de sortie vaut :

$$v_{pwm}(t) = \begin{cases} +V_{dc} & \text{si } m(t) \geq c(t) \\ -V_{dc} & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

La valeur moyenne sur une période de commutation vérifie $\langle v_{pwm} \rangle = m \cdot V_{dc}$.

3.3 Simulation du courant d'induit

Le courant dans l'induit est résolu par la discrétisation explicite de l'équation :

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_e \omega = v_{pwm}(t) \quad (5)$$

Un pas de temps de $1\mu s$ (soit $T_{PWM}/100$) garantit une résolution suffisante des fronts de commutation et une estimation correcte de l'ondulation.

3.4 Analyse spectrale — THD

La distorsion harmonique totale (THD) du courant est calculée par transformée de Fourier discrète (FFT). La fondamentale est recherchée dans une bande étroite autour de f_{PWM} pour éviter les fuites spectrales basses fréquences dues au régime transitoire. La THD s'exprime par :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} A_h^2}}{A_1} \quad (6)$$

où A_h désigne l'amplitude de l'harmonique de rang h .

3.5 Métriques d'ondulation

L'ondulation du courant est caractérisée par :

— L'ondulation crête-crête : $\Delta i_{pp} = \max(i) - \min(i)$ sur une fenêtre de régime établi.

— L'ondulation efficace (RMS) de la composante AC : $I_{ac,rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (i - \bar{i})^2}$.

Résultats et interprétation

Module 2 — Hacheur 4 Quadrants & MLI bipolaire

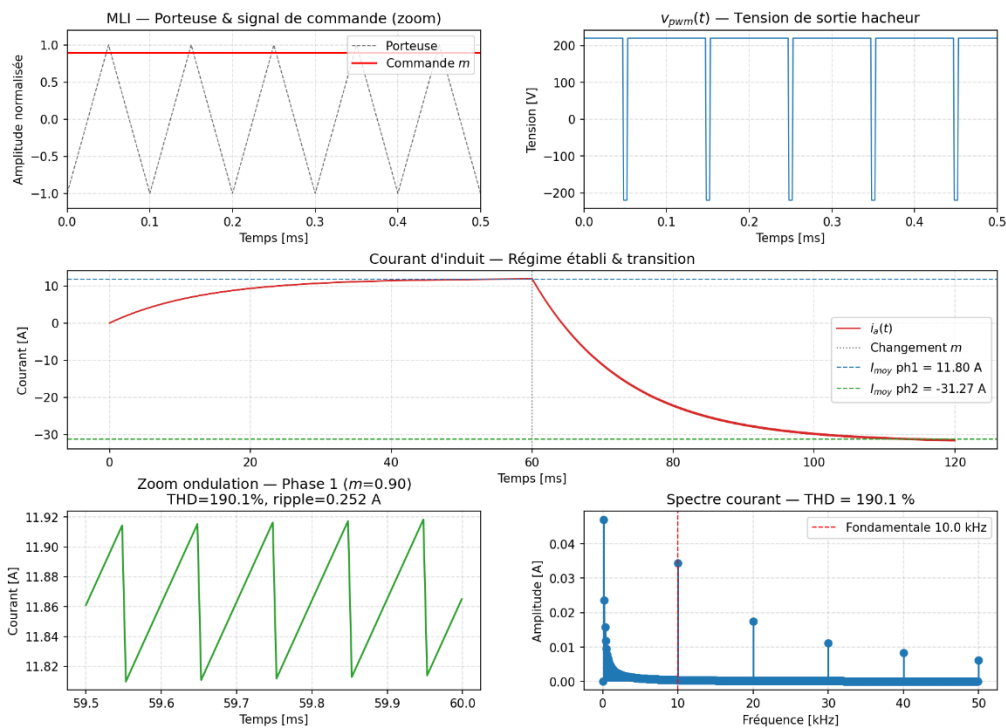


Figure 2 —

Résultats du Module 2 : porteuse et signal de commande, tension PWM, courant d'induit en régime transitoire et établi, zoom sur l'ondulation, et spectre fréquentiel avec THD. Les résultats attendus sont : Phase moteur ($m = 0.90$) : courant moyen ≈ 11.8 A, ondulation crête-crête ≈ 0.25 A. — Phase freinage ($m = 0.60$) : courant moyen ≈ -31.3 A (récupération). — THD ≈ 190 %, valeur typique pour une MLI bipolaire à 10 kHz sur charge RL.

4 Module 3 — Automatique

4.1 Structure de régulation

La régulation adoptée est une cascade à deux boucles :

1. Boucle interne (courant) : rapide, bande passante $f_{c,i} = 500$ Hz. Elle impose la dynamique de couple et protège le moteur contre les surintensités.
2. Boucle externe (vitesse) : lente, bande passante $f_{c,\omega} = 5$ Hz (règle du facteur 10). Elle assure le suivi de consigne et le rejet de perturbation.

4.2 Correcteur PI avec anti-windup

Chaque correcteur est de type PI avec limitation de la sortie et du terme intégral (clamping) pour éviter l'effet windup lors des saturations. La loi de commande s'écrit :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7)$$

Lorsque u atteint une limite, l'intégration est gelée (back-calculation) pour empêcher la divergence du terme intégral.

4.3 Synthèse par placement de pôles

4.3.1 Boucle courant

Le processus électrique est du premier ordre avec constante de temps $\tau_e = L_a/R_a = 13.3$ ms. Le correcteur PI compense ce pôle en posant $T_i = \tau_e$. Le gain proportionnel est alors fixé par la bande passante souhaitée :

$$K_{p,i} = \frac{\omega_{c,i}}{K_{proc,i}} = \frac{2\pi \cdot 500}{1/R_a} \approx 4712, \quad K_{i,i} = \frac{K_{p,i}}{\tau_e} \quad (8)$$

4.3.2 Boucle vitesse

Vu de la boucle externe, le processus se comporte comme un intégrateur pur (la boucle interne étant 100 fois plus rapide). La méthode SIMC donne :

$$K_{p,\omega} = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot J}{K_t} \approx 1.12, \quad K_{i,\omega} = \frac{K_{p,\omega}}{4\tau_{cl}} \quad (9)$$

où $\tau_{cl} = 1/(2\pi \cdot 5)$ est le temps de réponse visé de la boucle fermée.

4.4 Scénario de simulation

La simulation couvre 8 secondes avec les événements suivants :

- $t = 0$ s : état initial nul (moteur à l'arrêt).
- $t = 0.5$ s : application d'une consigne de vitesse de 1200 tr/min.
- $t = 4.0$ s : application d'un couple de charge de 5 N·m.

4.5 Métriques de performance

- Temps de montée t_r : intervalle entre 10 % et 90 % de la valeur finale.
- Dépassement D : excès relatif par rapport à la consigne, en pourcentage.
- Erreur statique : écart permanent consigne-mesure (théoriquement nul grâce à l'action intégrale).

4.6 Résultats et interprétation

Module 3 — Régulation Cascade PI (Placement de pôles)

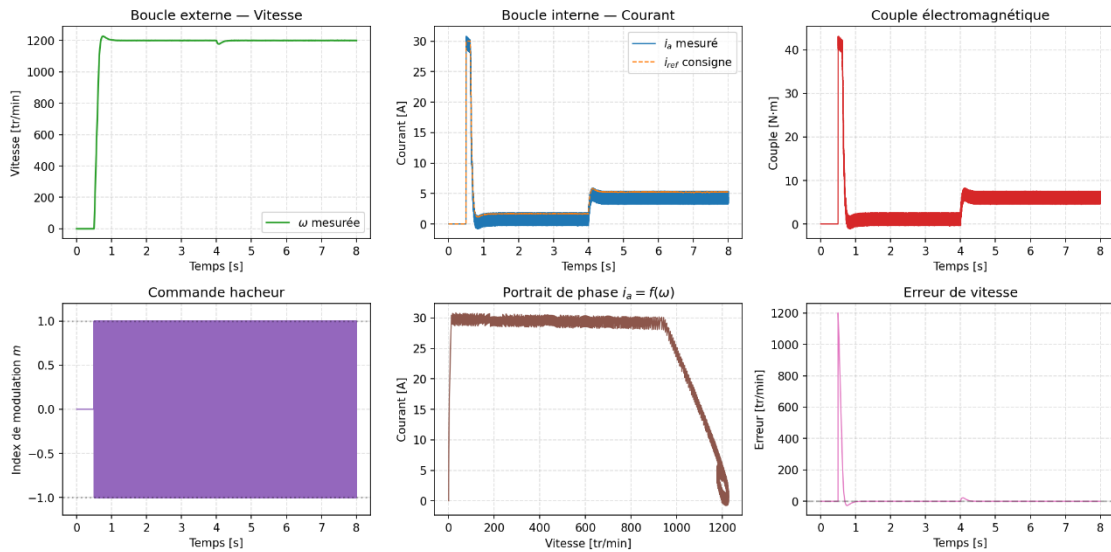


Figure 3 — Résultats du Module 3 : vitesse réglée, courant d'induit avec consigne, couple électromagnétique, commande du hacheur, portrait de phase et erreur de vitesse. Les résultats attendus sont : — Temps de montée ≈ 0.65 s, dépassement $< 2\%$. — Erreur statique quasi nulle (< 0.2 tr/min). — Rejet de charge quasi instantané : la vitesse revient à 1200 tr/min en moins de 0.5 s après l'application de la charge. — Saturation de la commande m observée au démarrage (accélération maximale), puis régulation linéaire.

5 Module 4 — Informatique Industrielle (HMI)

5.1 Framework et architecture

L'interface homme-machine (HMI) est développée avec CustomTkinter, une surcouche moderne de Tkinter offrant un rendu visuel flat-design avec thème sombre. L'architecture logicielle repose sur trois couches :

1. Moteur de simulation (SimulationEngine) : intègre le modèle moteur et la cascade PI, exécuté dans un thread séparé pour ne pas bloquer l'interface.
2. Couche présentation : widgets CustomTkinter (cartes de métriques, sliders, graphes temps réel sur Canvas Tkinter).
3. Couche données : buffer circulaire de 5000 points, export CSV via pandas.

5.2 Fonctionnalités

5.2.1 Scénarios prédéfinis

Quatre scénarios sont programmés avec chronomètre intégré, barre de progression et export CSV automatique à la fin :

1. *Démarrage & Régime* — 1200 tr/min à vide sur 3 s.
2. *Rejet de Charge* — charge 5 N·m appliquée à $t = 2$ s sur 6 s.
3. *Alarmes & Saturation* — consigne 1600 tr/min + charge 8 N·m pour déclencher les alarmes.
4. *Changement de Consigne* — 800 → 1400 tr/min avec charge 3 N·m.

5.2.2 Mode manuel

L'utilisateur peut régler en temps réel :

- La consigne de vitesse (slider 0–1500 tr/min).
- Le couple de charge (slider 0–10 N·m).

Les boutons Start, Stop et Reset permettent de contrôler la simulation.

5.2.3 Alarmes temps réel

Deux seuils sont surveillés : —

Survitesse : $\omega > 1600$ tr/min. —

Surcharge : $|i_a| > 25$ A.

En cas de dépassement, le panneau d'alarme passe au rouge et le libellé s'affiche en temps réel.

5.3 Graphes temps réel

Quatre graphes sont tracés sur Canvas Tkinter avec rafraîchissement toutes les 100 ms :

1. Vitesse de rotation (avec consigne en pointillés).
2. Courant d'induit.
3. Couple électromagnétique.
4. Index de modulation m .

Chaque graphe conserve les 400 derniers points pour fluidifier l'affichage.

5.4 Export de données

Un bouton d'export manuel permet de sauvegarder l'ensemble des variables temporelles au format CSV. Lors des scénarios prédéfinis, l'export est automatique à la fin de la séquence avec un nom de fichier conventionné.

5.5 Résultats et captures d'écran

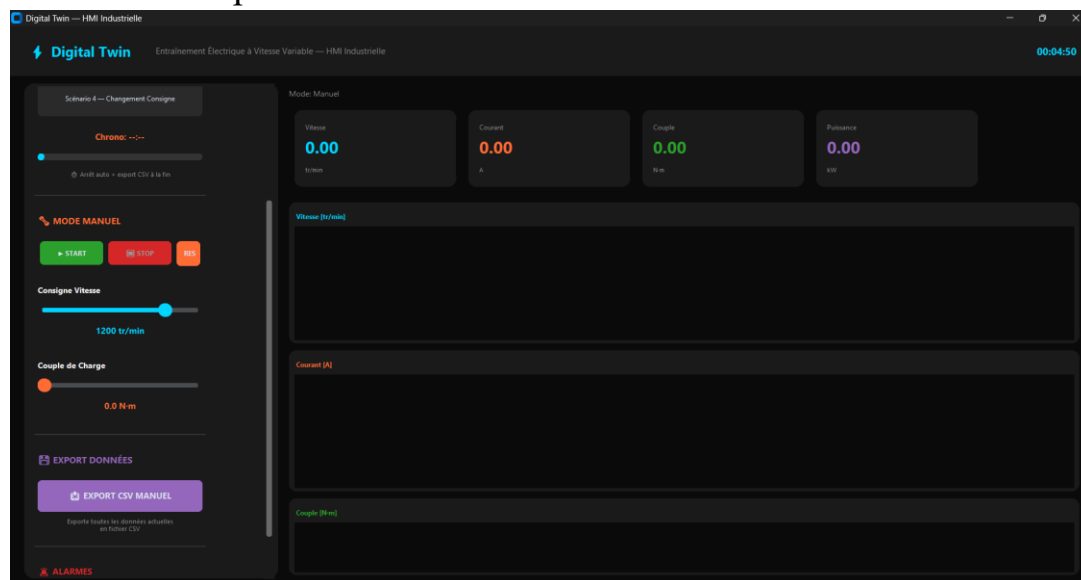


Figure 4 – Capture d'écran de l'interface HMI (Module 4) en mode scénario avec les panneaux de contrôle (gauche) et les graphes temps réel (droite).

6 Intégration et Scénarios Batch

6.1 Fichier d'orchestration

- Le fichier `main_integration.py` constitue le point d'entrée unique du projet. Il propose :
- Un menu interactif en console (choix 0–5).
 - Un lancement direct par arguments en ligne de commande (`-m` pour module, `-s` pour scénario).
 - Des scénarios batch combinant les modules 1, 2 (modèle moyen) et 3 avec export CSV automatique.

6.2 Scénarios batch disponibles

#	Nom	Description	Durée
1	Démarrage & Régime	Consigne 1200 tr/min à vide	4 s
2	Rejet de Charge	Charge 5 N·m à $t = 2$ s	6 s
3	Changement Consigne	800 → 1400 tr/min, charge 3 N·m	6 s
4	Test Limites	Consigne 1600 tr/min + charge 8 N·m (saturation)	4 s

Table 2 – Scénarios batch intégrés avec export CSV automatique.

6.3 Exemple de session batch

```
$ python main_integration.py -s 2

=====
SCENARIO INTEGRE #2
===== Scenario : Rejet
de Charge
Duree           : 6.0 s

--- Resultats ---
Vitesse finale      : 1199.9 tr/min
Courant max         : 30.80 A
Temps montee       : 0.135 s
Depassement        : 2.2 %
Erreur statique     : 0.13 tr/min
Graphique           : scenario_2_integration.png

Export CSV : scenario_2_integration.csv (60000 points)
```

Listing 1 – Lancement du scenario 2 avec export CSV.

6.4 Résultats du scénario intégré

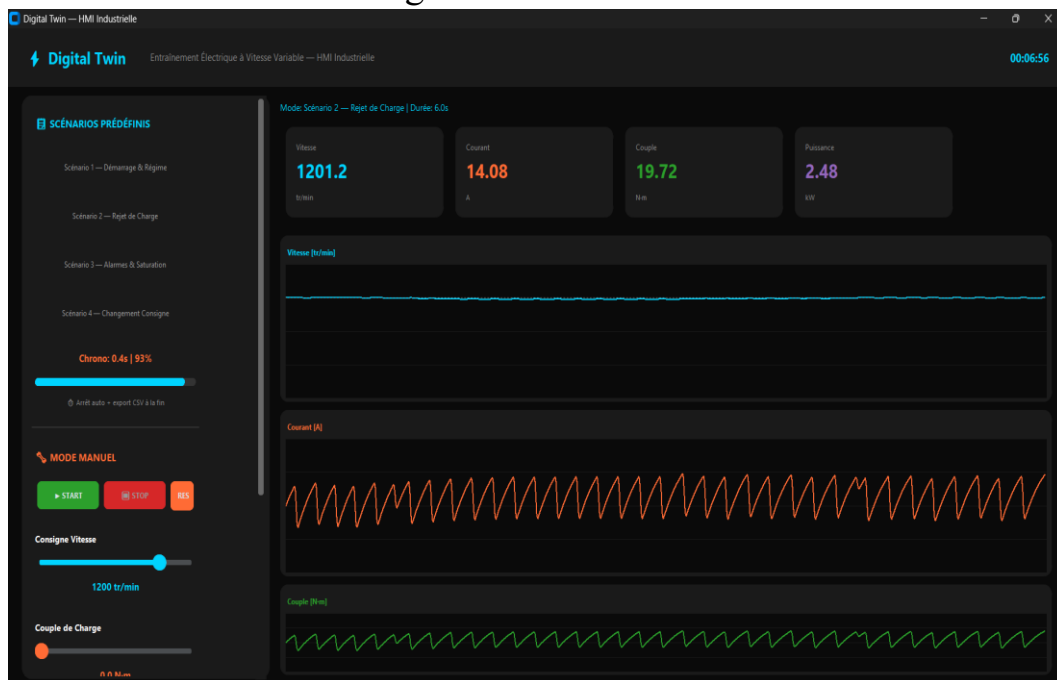


Figure 5 – Résultats du scénario intégré n°2 (Rejet de Charge) : vitesse, courant, couple, commande, puissance mécanique et erreur de vitesse.

7 Mise en Œuvre Physique et Mesures en Laboratoire

Cette section décrit la chaîne de conversion électromécanique telle qu'elle pourrait être réalisée physiquement au laboratoire. Aucun schéma électrique n'est fourni; la description repose sur l'énumération des composants, leur rôle, les branchements à effectuer et les protocoles de mesure.

7.1 Architecture générale du banc d'essai

Le banc comprend cinq sous-systèmes interconnectés :

1. Alimentation continue : source DC réglable 0–250 V / 20 A.
2. Pont en H (hacheur 4Q) : quatre interrupteurs de puissance commandés en MLI.

3. Moteur DC : machine à excitation séparée ou à aimants permanents.
4. Capteurs : vitesse, courant, tension.
5. Carte de commande et acquisition : microcontrôleur générant la MLI et communiquant avec un PC.

7.2 Moteur DC — Choix et caractéristiques

Pour valider le jumeau numérique, le moteur physique doit posséder des paramètres proches de ceux du modèle (Table 1). Un moteur à excitation séparée de 1,5–2,2 kW, 220 V, 1500 tr/min est idéal. Si un tel moteur n'est pas disponible, un moteur à aimants permanents de 500 W–1 kW (ex. Maxon, Faulhaber) peut être utilisé à condition de rescaler les paramètres (R_a , L_a , J , K_e) dans le modèle numérique.

Identification des paramètres :

- R_a : mesure au multimètre en ohmmètre (induit froid, excitation coupée).
- L_a : mesure par pont d'impédance ou méthode RL (échelon de tension, mesure de la constante de temps $\tau_e = L_a/R_a$).
- K_e (et K_t) : mesure à vide : faire tourner le moteur à vitesse constante connue (tachymètre) et mesurer la f.e.m. aux bornes de l'induit ouvert.
- J : méthode de décélération (couper l'alimentation, mesurer $\omega(t)$, ajuster J pour que $J \frac{d\omega}{dt} = -f\omega - T_{frot}$ corresponde).
- f : mesure du couple de pertes à différentes vitesses et régression linéaire.

7.3 Pont en H — Composants et assemblage

7.3.1 Interrupteurs de puissance

Pour un bus de 220 V et un courant nominal de 12 A (pics jusqu'à 30–40 A au démarrage), des IGBT sont recommandés. Caractéristiques minimales :

- Tension collecteur-émetteur $V_{CES} \geq 600$ V.
- Courant continu $I_C \geq 30$ A (avec marge de sécurité).
- Temps de commutation < 200 ns pour limiter les pertes à 10 kHz.

Des modules intégrés (ex. Semikron SKM100, Infineon EasyPACK) simplifient le câblage en regroupant les quatre IGBT et les diodes de roue libre antiparallèles.

7.3.2 Driver de grille

Chaque IGBT nécessite un driver isolé galvaniquement du microcontrôleur. Solutions possibles :

- Bootstrap (ex. IR2110, IR2184) : simple et économique, mais limité à des temps de conduction supérieurs au temps de recharge du condensateur bootstrap.
- Optocoupleur + driver (ex. HCPL-3120 + transistor de puissance) : isolation renforcée, indispensable pour des tests prolongés ou des hautes tensions.

Un dead-time de 1–2 μ s doit être programmé dans le microcontrôleur pour éviter le court-circuit bras (*shoot-through*) lors de la commutation complémentaire des deux interrupteurs d'un même bras.

7.3.3 Bus DC et filtrage

Le bus continu est constitué de condensateurs de découplage en parallèle avec l'alimentation. Des condensateurs film MKP (470 μ F / 400 V) sont préférés aux électrolytiques

pour leur tenue en courant de ripple et leur durée de vie. Un fusible rapide 20 A et un contacteur d'urgence doivent être placés en amont du bus pour la sécurité.

7.3.4 Branchements électriques

1. Relier le pôle positif de l'alimentation DC au point milieu haut du pont (collecteurs des IGBT hauts).
2. Relier le pôle négatif au point milieu bas (émetteurs des IGBT bas).
3. Relier les deux bornes de l'induit du moteur aux sorties intermédiaires du pont (entre haut et bas de chaque bras).
4. Relier les quatre entrées de commande (gate) aux sorties du driver, en respectant l'ordre : Q1 (haut gauche), Q2 (bas gauche), Q3 (haut droite), Q4 (bas droite).
5. Ajouter un shunt de $10\text{ m}\Omega$ / 5 W en série avec l'induit pour la mesure de courant (voir §7.5.2).

7.4 Carte de commande MLI

La génération de la MLI bipolaire à 10 kHz nécessite un microcontrôleur avec timers matériels avancés. Le STM32 (série F4 ou F7) est particulièrement adapté grâce à ses timers TIM1 et TIM8 capables de MLI centre-alignée avec génération automatique de dead-time.

Configuration logicielle :

- Fréquence CPU : 168 MHz.
- Résolution MLI : $168\text{MHz}/10\text{kHz} = 16800$ ticks $\rightarrow$ environ 14 bits effectifs.
- Mode centre-aligné : compteur up-down pour symétriser les impulsions et réduire les harmoniques paires.
- ADC déclenché par événement PWM (TRGO) pour échantillonner le courant au milieu de la période de conduction (instant où la valeur moyenne est représentative).

Librairies : le MCSDK (Motor Control SDK) de STMicroelectronics est gratuit et fournit une pile logicielle complète (MLI, ADC, capteur Hall, encodeur, régulateurs PI).

7.5 Capteurs et mesures

7.5.1 Mesure de la vitesse de rotation

Méthode recommandée : encodeur incrémental optique de 1024 points par tour (ppr), monté sur l'arbre moteur. Le microcontrôleur compte les fronts en mode quadrature (multiplication par 4) pour obtenir une résolution de 4096 incréments par tour. Protocole :

1. Monter l'encodeur coaxialement avec l'arbre moteur (accouplement flexible pour compenser les défauts d'alignement).
2. Câbler les signaux A, B et Z (index) aux entrées timer du STM32.
3. Configurer le timer en mode Encoder Interface (comptage quadrature).
4. Lire le compteur à intervalles réguliers (1 ms) et dériver pour obtenir ω en rad/s ou tr/min.

Alternative : une dynamo tachymétrique (génératrice à aimants permanents couplée mécaniquement) fournit une tension analogique proportionnelle à ω , mesurable directement par l'ADC sans traitement numérique complexe.

7.5.2 Mesure du courant d'induit

Méthode recommandée : capteur à effet Hall isolé (ex. LEM HAS 50-S ou ACS712 pour des courants plus faibles). Le capteur est placé autour du câble d'alimentation de l'induit. Protocole :

1. Insérer le capteur Hall en série avec le câble d'induit (ou utiliser une pince ouverte pour une mesure non intrusive).
2. Alimenter le capteur en ± 15 V (ou 5 V selon modèle).
3. Récupérer la sortie analogique (ex. ± 4 V pour ± 50 A) et la connecter à une entrée ADC du STM32.
4. Étalonnage : appliquer un courant connu (source DC calibrée) et ajuster le gain logiciel.

Alternative économique : un shunt de $10\text{ m}\Omega / 5\text{ W}$ en série avec l'induit. La chute de tension aux bornes du shunt vaut $V_{shunt} = R_{shunt} \cdot i_a$ (120 mV à 12 A). Un amplificateur d'instrumentation (ex. INA199, gain $\times 50$) élève le signal à 6 V pour l'ADC. Attention : le shunt n'est pas isolé galvaniquement; le circuit de mesure doit flotter avec l'induit.

7.5.3 Mesure de la tension d'induit

La tension aux bornes de l'induit est une grandeur flottante (aucun point commun avec la masse du microcontrôleur). Une sonde différentielle (ex. Pico TA042, Keysight N2791A) ou un amplificateur d'isolation (ex. AMC1301) est indispensable. Protocole :

1. Connecter les deux entrées de la sonde différentielle aux bornes de l'induit.
2. Régler l'atténuation (10 : 1 ou 100 : 1) selon l'amplitude du bus DC.
3. Mesurer soit avec un oscilloscope numérique (analyse temporelle et spectrale), soit via un ADC isolé vers le microcontrôleur.

7.5.4 Mesure du couple électromagnétique

Le couple ne se mesure pas directement par un capteur électrique. Deux approches existent :

1. Indirecte (validation du modèle) : mesurer i_a et utiliser la relation $T_{em} = K_t \cdot i_a$, où K_t a été préalablement identifié. C'est la méthode utilisée dans le jumeau numérique.
2. Directe : installer un dynamomètre (capteur de couple à jauges de contrainte) sur l'arbre moteur, entre le moteur et la charge. Exemples : HBM T22, Magtrol TM 311. Le signal est une tension analogique proportionnelle au couple, mesurable par ADC.

7.6 Alimentation DC du laboratoire

Une alimentation de laboratoire réglable 0–250 V / 20 A est nécessaire. Si une alimentation fixe 220 V est utilisée, un hacheur buck-boost en amont permettra de faire varier V_{dc} pour les essais en boucle ouverte. Pour les essais en boucle fermée, le bus peut rester fixe à 220 V car c'est le hacheur qui module la tension effective.

Sécurités obligatoires :

- Fusible rapide sur le bus DC (calibré à 1.5 fois le courant nominal).
- Contacteur d'urgence (arrêt coupant tous les pôles de l'alimentation).
- Résistance de freinage (*chopper brake*) sur le bus pour dissiper l'énergie de freinage si l'alimentation n'est pas réversible.
- Ecran de protection en plexiglas devant le pont en H sous tension.

7.7 Protocole de validation du jumeau numérique

L'objectif final est de superposer les courbes expérimentales et simulées pour valider le modèle. Le protocole recommandé est le suivant :

1. Identification : mesurer R_a , L_a , J , f , K_e au banc et mettre à jour le constructeur DCMotor.
2. Réponse libre : appliquer un échelon de tension $V_a = 220$ V à vide, enregistrer $\omega(t)$ et $i_a(t)$ à l'oscilloscope. Comparer avec module1.
3. Charge : coupler une charge résistive ou une génératrice charge à l'arbre. Appliquer un couple connu et vérifier la chute de vitesse.
4. Analyse MLI : mesurer le courant réel avec une pince de courant à large bande, calculer le spectre FFT à l'oscilloscope et comparer le THD avec module2.
5. Cascade PI : implémenter les gains K_p , K_i calculés dans module3 sur le STM32. Mesurer le temps de montée, le dépassement et le rejet de charge. Ajuster les gains si nécessaire (phénomènes non modélisés : hysteresis magnétique, saturation, température).

7.8 Budget matériel indicatif

Élément	Caractéristiques	Prix estimé
Moteur DC 2.2 kW	220 V, 1500 tr/min, excitation séparée	400–800 €
Pont en H IGBT	Module 600 V / 30 A (Semikron / Infineon)	150–300 €
Driver de grille	IR2110 $\times$ 2 ou HCPL-3120 $\times$ 4	20–40 €
STM32 Nucleo-F446RE	Timer avancé, ADC DMA	15 €
Encodeur 1024 ppr	Optique, sortie quadrature	30 €
Capteur courant LEM	HAS 50-S (isolation galvanique)	80 €
Sonde différentielle	200 MHz, atténuation 10 :1/100 :1	150–300 €
Alimentation DC labo	0–250 V / 20 A réglable	500–1500 €
Oscilloscope 4 voies	100 MHz, acquisition CSV	400 €
Total		1600–3000 €

Table 3 – Budget indicatif pour la réalisation physique du banc d'essai.

Une version économique à 48 V / 1 kW (moteur de scooter électrique + driver BLDC reconfiguré) peut réduire le coût à environ 600 €.

8 Conclusion

Ce rapport a présenté la conception complète d'un jumeau numérique dédié à un entraînement électrique à vitesse variable. Les quatre modules disciplinaires, à savoir l'électrotechnique, électronique de puissance, automatique et informatique industrielle, ont été implémentés en Python avec une cohérence paramétrique assurée entre les différents niveaux de modélisation.

Les points forts du projet sont :

- Une modélisation physique rigoureuse (Runge-Kutta adaptatif pour le moteur, Euler fin pour la MLI, placement de pôles pour la régulation).
- Une analyse quantitative à chaque étape (rendement, THD, ondulation, temps de montée, dépassement, rejet de perturbation).
- Une interface HMI professionnelle avec scénarios prédéfinis, mode manuel, alarmes temps réel et export de données.
- Une architecture modulaire permettant l'exécution indépendante de chaque module ou leur orchestration via un fichier d'intégration.

La section physique propose une feuille de route concrète pour la transposition du modèle numérique vers un banc d'essai réel, avec l'identification des composants, les protocoles de mesure et les étapes de validation. Le jumeau numérique servira alors de référence pour ajuster les paramètres du régulateur embarqué et diagnostiquer les écarts modèle/réalité (effets thermiques, saturation magnétique, vieillissement des condensateurs).

Fin du rapport