

Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques de
Marrakech

Département de Physique Appliquée
*Filière : Informatique-Électronique-
Électrotechnique-Automatique (IEEA)*

Module : Électrotechnique

PROJET DE FIN DE SEMESTRE

**Conception et Simulation d'une Chaîne de
Conversion Houlomotrice :**

De l'Hydrodynamique à l'Injection Réseau par Commande Vectorielle

Réalisé par :

BIGHARASSINE Imane
DIAW Birane

Encadré par :

Pr. Moulay Rachid DOUIRI

MARRAKECH, JANVIER 2026

Préface

Le domaine des énergies renouvelables est aujourd'hui au cœur des préoccupations mondiales. Si l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont désormais bien implantées dans le paysage énergétique, l'énergie des mers, et plus particulièrement l'énergie houlomotrice, reste une frontière technologique à conquérir.

Ce projet de fin de semestre s'inscrit dans cette dynamique de recherche et d'innovation. Il ne s'agit pas seulement d'un exercice académique, mais d'une véritable immersion dans la complexité de la conversion d'énergie, nécessitant une approche pluridisciplinaire. Nous avons dû mobiliser des connaissances variées allant de la mécanique des fluides pour comprendre l'interaction houle-structure, à l'électrotechnique pour le dimensionnement de la génératrice, et enfin à l'automatique pour le pilotage fin des courants injectés au réseau.

La simulation numérique, réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink, a été notre principal outil d'investigation. Elle nous a permis de visualiser des phénomènes physiques invisibles à l'œil nu et de tester la robustesse de nos stratégies de commande sans risque matériel.

Ce rapport est le fruit de ces semaines de travail et de réflexion.

Table des matières

Introduction Générale	5
1 Étude Hydrodynamique et Captation de l'Énergie	7
1.1 Introduction aux Systèmes Houlomoteurs	7
1.2 Modélisation Mathématique de la Houle	7
1.3 Dynamique du Flotteur (Point Absorber)	8
1.3.1 Équation du Mouvement	8
1.4 Optimisation par "WaveSpring"	9
2 La Chaîne de Conversion Électromécanique	10
2.1 Le Défi Mécanique : L'Architecture "Direct Drive"	10
2.1.1 La Problématique de l'Intermittence	10
2.1.2 La Solution : Entraînement Direct	10
2.2 Le Cœur du Système : La Génératrice PMSG	11
2.2.1 Justification Technologique	11
2.2.2 Paramètres de Simulation	11
2.2.3 Analyse de la Production "Brute"	12
2.3 La Stratégie de Conditionnement : Le Bus DC	12
2.3.1 Fonctions Critiques des Composants	13
2.3.2 Stabilisation de la Tension	13
3 Connexion Réseau et Simulation Vectorielle	15
3.1 Introduction et Cahier des Charges	15
3.2 Structure de l'Onduleur et du Filtre	15
3.3 Stratégie de Commande Vectorielle (FOC)	15
3.3.1 Transformation de Park	16
3.3.2 La Boucle à Verrouillage de Phase (PLL)	16
3.4 Implémentation sous MATLAB/Simulink	16
3.4.1 Description des Blocs	17
3.5 Analyse Approfondie des Résultats	18
3.5.1 Régime Transitoire et Permanent	18

3.5.2	Performance de la Régulation Vectorielle	19
Conclusion Générale		21

Introduction Générale

Contexte Énergétique Mondial

Le XXI^e siècle est marqué par une double urgence : la satisfaction d'une demande énergétique mondiale en croissance exponentielle et la nécessité impérieuse de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les énergies fossiles, qui ont porté la révolution industrielle, montrent aujourd'hui leurs limites tant en termes de réserves que d'impact environnemental.

La transition énergétique vers des sources durables n'est plus une option, mais une obligation. Dans ce mix énergétique futur, les océans, qui recouvrent 71% de la surface du globe, représentent un réservoir d'énergie colossal et quasi inépuisé.

Le Potentiel Houlomoteur

L'énergie houlomotrice provient de la déformation de la surface des océans sous l'effet du vent. Contrairement à l'éolien, dont la puissance peut chuter en quelques minutes, la houle possède une grande inertie. Une vague générée au milieu de l'Atlantique peut voyager des milliers de kilomètres avec très peu de pertes avant d'atteindre les côtes marocaines. Le potentiel théorique est estimé à 29 000 TWh/an. Pour le Maroc, doté d'une façade atlantique exceptionnelle, cette technologie présente un intérêt stratégique majeur pour l'indépendance énergétique du Royaume.

Problématique du Projet

Toutefois, capter cette énergie est un défi technologique complexe. La houle est un mouvement alternatif, lent (0.1 Hz), irrégulier et puissant, alors que le réseau électrique exige une tension alternative sinusoïdale, rapide (50 Hz), stable et parfaitement synchronisée. La problématique centrale de ce projet est donc : **Comment concevoir une chaîne de conversion capable de transformer l'énergie chaotique des vagues en une électricité de qualité "réseau" ?**

Plan du Rapport

Pour répondre à cette question, nous avons structuré notre étude en trois chapitres :

1. **Chapitre 1 : Étude Hydrodynamique.** Nous analyserons l'interaction entre la houle et le flotteur pour maximiser la capture d'énergie mécanique.
2. **Chapitre 2 : Conversion Électromécanique.** Nous étudierons la génératrice PMSG et le rôle crucial du Bus DC pour stabiliser la puissance.
3. **Chapitre 3 : Connexion Réseau.** Nous détaillerons la simulation de l'onduleur et la stratégie de commande vectorielle (FOC) permettant l'injection de 20 kW.

Chapitre 1

Étude Hydrodynamique et Captation de l'Énergie

1.1 Introduction aux Systèmes Houlomoteurs

Il existe plusieurs technologies pour récupérer l'énergie des vagues : les colonnes d'eau oscillantes (OWC), les déferlantes, et les corps oscillants. Pour ce projet, nous nous sommes concentrés sur la technologie des "**Points Absorbers**" (ou bouées pilonnantes).

Ce choix se justifie par la compacité du système et sa capacité à capter l'énergie provenant de toutes les directions, contrairement aux systèmes atténuateurs qui doivent s'aligner face à la houle.

1.2 Modélisation Mathématique de la Houle

Avant d'étudier le système, il convient de modéliser la source. Nous considérons ici la théorie linéaire des vagues (théorie d'Airy). La surface libre $\eta(x, t)$ pour une houle monochromatique se propageant selon l'axe x est donnée par :

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (1.1)$$

Où H est la hauteur de la vague (fixée à 2m dans notre étude), ω la pulsation, et k le nombre d'onde.

1.3 Dynamique du Flotteur (Point Absorber)

1.3.1 Équation du Mouvement

Le flotteur est soumis à des forces hydrodynamiques complexes. En appliquant le Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) sur l'axe vertical z , nous obtenons l'équation intégral-différentielle de Cummins (simplifiée ici dans le domaine fréquentiel) :

$$(M + M_{\infty})\ddot{z}(t) + \int_0^t K_{rad}(t - \tau)\dot{z}(\tau)d\tau + K_{hydro}z(t) = F_{exc}(t) + F_{PTO}(t) \quad (1.2)$$

Détaillons les termes de cette équation fondamentale :

- **Terme d'inertie** $(M + M_{\infty})$: Il comprend la masse réelle de la bouée (6000 kg) et la "masse ajoutée" (M_{∞}) , qui représente l'inertie de l'eau que la bouée doit déplacer pour bouger.
- **Terme de radiation** : C'est l'amortissement dû aux vagues créées par la bouée elle-même lorsqu'elle oscille.
- **Raideur Hydrostatique** K_{hydro} : C'est la force de rappel d'Archimède. Pour une bouée cylindrique de rayon r , $K_{hydro} = \rho g \pi r^2$.
- **Force d'excitation** F_{exc} : C'est la force motrice exercée par la vague incidente.
- **Force du PTO** F_{PTO} : C'est la force résistante appliquée par la génératrice électrique (notre charge utile).

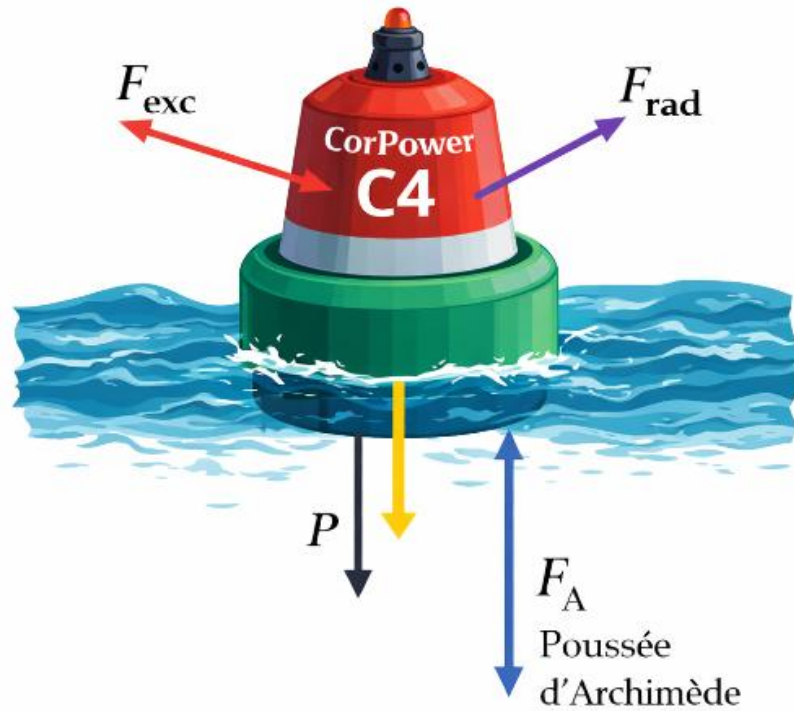


FIGURE 1.1 – Modélisation des forces s'appliquant sur le flotteur en mouvement de pilonnement.

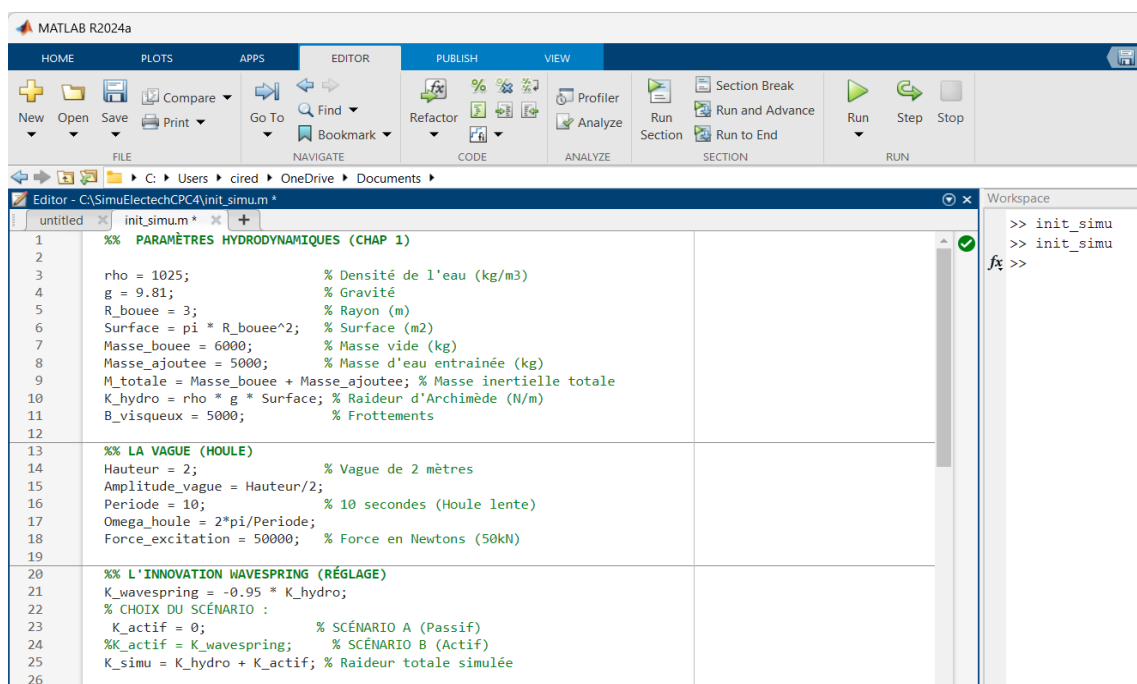
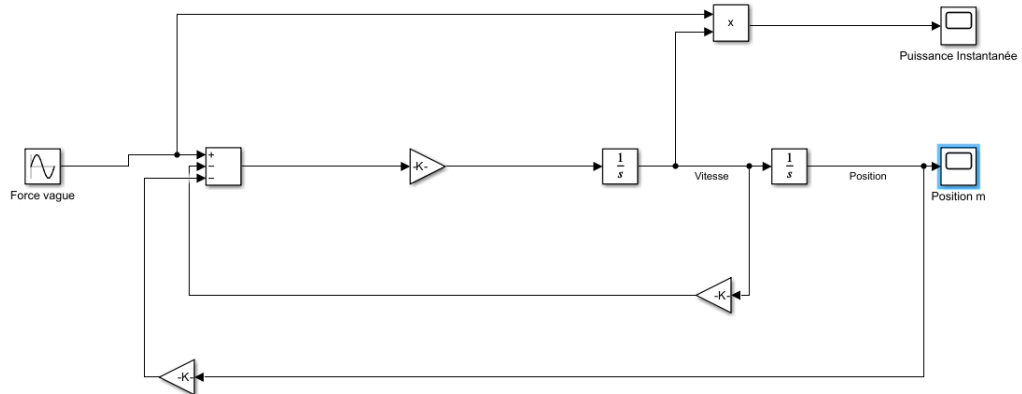
1.4 Optimisation par "WaveSpring"

L'un des problèmes majeurs de l'houlomoteur est la différence de fréquence. La houle a une période typique de 10s (0.1 Hz), tandis que la fréquence de résonance naturelle d'une petite bouée est beaucoup plus élevée (env. 1 Hz). Sans correction, la bouée suit simplement la surface de l'eau sans absorber d'énergie significative.

Pour pallier cela, nous avons modélisé un système de **contrôle passif par raideur négative**, nommé "WaveSpring". L'idée est d'ajouter un mécanisme qui annule la raideur hydrostatique :

$$K_{totale} = K_{hydro} + K_{WaveSpring} \approx 0 \quad (1.3)$$

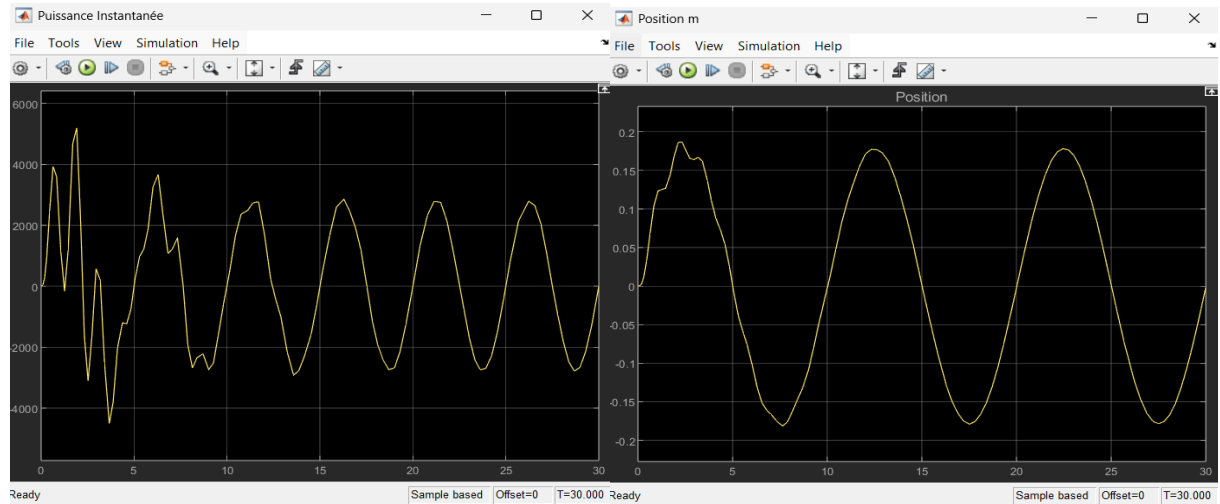
Si $K_{WaveSpring}$ est négatif (système instable statiquement), la fréquence de résonance du système diminue drastiquement pour s'aligner sur celle de la houle. Cela permet d'augmenter considérablement l'amplitude des oscillations et donc la puissance extraite.



Scénario A : Comportement passif (Témoin)

Dans ce premier test, la fonction WaveSpring est désactivée.

Oscillation de la bouée sans assistance (Scénario A, Régime passif)

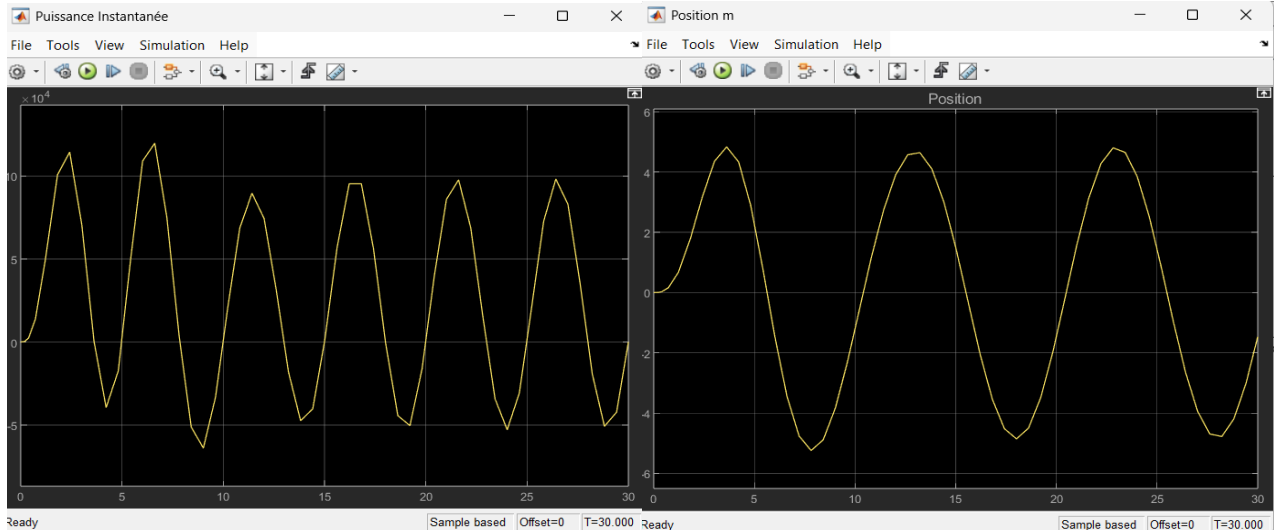


Analyse : Comme prédit par la théorie, l'amplitude est dérisoire ($\approx 0.18 \text{ m}$). La bouée est "trop raide" pour la vague. L'énergie mécanique, proportionnelle à l'intégrale de $B\dot{z}^2$, serait insignifiante.

Scénario B : Comportement résonant (WaveSpring activé)

Nous injectons maintenant la correction de raideur négative.

Oscillation de la bouée avec WaveSpring (Scénario B, Régime résonant)



Analyse : Le changement est spectaculaire. L'amplitude des oscillations atteint désormais environ 4.8 m.

- Le facteur d'amplification est de l'ordre de $\times 27$.
- La bouée dépasse même la hauteur de la vague excitatrice (2 m), ce qui est caractéristique du phénomène de résonance.
- La vitesse $\dot{z}$ est maximisée, ce qui optimise directement le travail du PTO.

Chapitre 2

La Chaîne de Conversion Électromécanique

2.1 Le Défi Mécanique : L'Architecture "Direct Drive"

2.1.1 La Problématique de l'Intermittence

La conversion de l'énergie des vagues pose un défi d'ingénierie fondamental : **comment coupler une source lente, puissante et pulsée (la houle) à une charge électrique qui exige une stabilité parfaite ?**

Contrairement aux turbines des centrales classiques qui tournent à vitesse constante et élevée (3000 tr/min), la houle est une source d'énergie à très basse fréquence ($f < 0.5$ Hz). Face à ce constat, nous avons pris la décision technique d'écarter les multiplicateurs de vitesse mécaniques (boîtes d'engrenages). Bien que standards dans l'éolien, ces composants représentent le "talon d'Achille" des systèmes en mer : ils sont trop fragiles face aux chocs violents des vagues et nécessitent une maintenance lourde, incompatible avec une installation offshore.

2.1.2 La Solution : Entraînement Direct

Notre choix s'est donc porté sur une architecture de rupture : le **Direct Drive**. Le principe est de supprimer toute intermédiaire mécanique. Le flotteur attaque *directement* l'arbre de la génératrice.

- **Avantage clé** : Une robustesse mécanique totale. Le système encaisse les "coups de boutoir" de l'océan sans risque de rupture d'engrenage.
- **Contrainte** : Cela impose d'utiliser une machine électrique capable de développer un couple énorme à très basse vitesse.

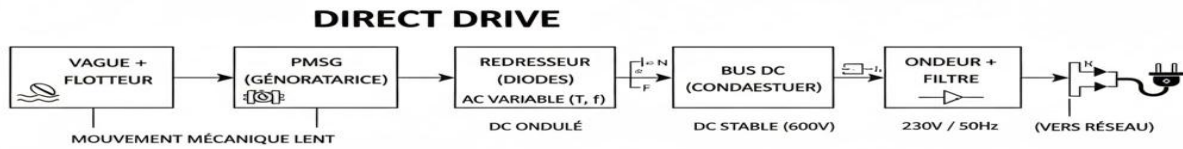


FIGURE 2.1 – Synoptique de la chaîne de conversion "Direct Drive"

FIGURE 2.1 – Synoptique de la chaîne de conversion "Direct Drive"

2.2 Le Cœur du Système : La Génératrice PMSG

Pour répondre à la contrainte du Direct Drive, notre choix technologique s'est porté sur la **Génératrice Synchrone à Aimants Permanents (PMSG)**.

2.2.1 Justification Technologique

Pourquoi cette machine est-elle supérieure pour l'houlomoteur ?

1. **Densité de Puissance** : Les aimants permanents (Terres Rares) génèrent un flux magnétique intense "gratuitement", sans besoin de courant d'excitation.
2. **Rendement à basse vitesse** : C'est la seule machine capable de dépasser 90% de rendement sur des cycles lents, là où une machine asynchrone s'effondrerait.
3. **Maintenance Zéro** : C'est une technologie "Brushless" (sans balais). Pas de frottements, pas d'étincelles, pas d'usure.

2.2.2 Paramètres de Simulation

Le dimensionnement de la machine a permis d'établir les paramètres suivants, utilisés pour notre modèle numérique :

Grandeur Physique	Symbole	Valeur	Unité
Puissance Nominale Cible	P_n	20	kW
Résistance Statorique	R_s	0.45	Ω
Inductance Synchrone (d, q)	L_{dq}	3.2	mH
Flux des Aimants	Φ_f	0.9	Wb
Paires de pôles	p	4	-

TABLE 2.1 – Caractéristiques électriques de la génératrice PMSG dimensionnée

2.2.3 Analyse de la Production "Brute"

Physiquement, la tension produite (E) suit la loi de Faraday :

$$E(t) = K \cdot \Phi \cdot \Omega(t).$$

Comme la vitesse de la vague $\Omega(t)$ change tout le temps (accélération, freinage, arrêt au sommet), la tension produite est **intrinsèquement instable**.

- **Amplitude variable** : La tension monte et descend avec la hauteur des vagues.
- **Passages à zéro** : À chaque inversion de sens du flotteur, la production s'annule instantanément.

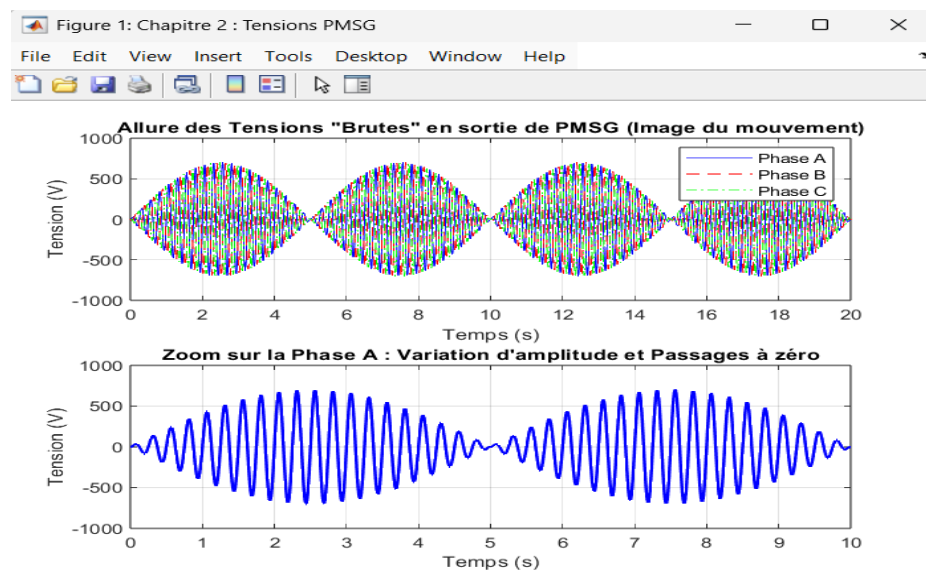


FIGURE 2.2 – Allure qualitative des tensions électromotrices (FEM) non conditionnées

2.3 La Stratégie de Conditionnement : Le Bus DC

En l'absence de traitement, l'énergie brute de la PMSG est inutilisable. Pour la "dompter", nous avons conçu une interface d'électronique de puissance structurée autour du **Bus Continu (DC)**.

2.3.1 Fonctions Critiques des Composants

L'étage intermédiaire joue le rôle de "sas de sécurité" entre la mer et le réseau. Le tableau suivant détaille le rôle stratégique de chaque bloc :

Composant	Rôle Technique et Stratégique
Redresseur (PD3)	Conversion AC $\rightarrow$ DC. Il transforme les alternances bidirectionnelles en un courant unidirectionnel. Sa technologie passive (diodes) assure une fiabilité maximale sans commande complexe.
Bus DC (Condensateur)	Le "Poumon" du système. 1. <i>Lissage</i> : Il absorbe les ondulations résiduelles du redresseur. 2. <i>Stockage Inertiel</i> : Il stocke l'énergie pendant les pics de la vague et la restitue pendant les creux. 3. <i>Découplage</i> : Il isole physiquement la génératrice du réseau électrique.

TABLE 2.2 – Fonctions de l'étage de conditionnement de puissance

2.3.2 Stabilisation de la Tension

Pour garantir le fonctionnement de l'onduleur (objet du Chapitre 3), la tension du Bus DC doit être maintenue au-dessus de la tension crête du réseau (325V). Nous avons dimensionné le système pour une consigne cible de **600 V**.

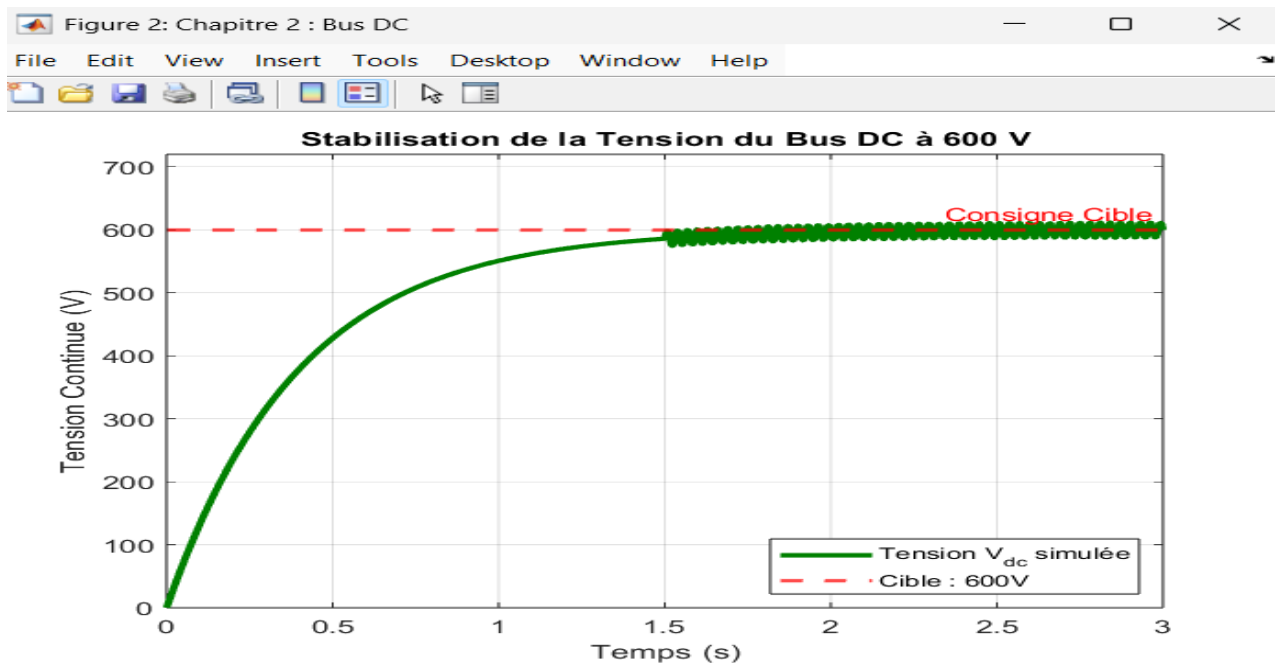


FIGURE 2.3 – Stabilisation de la tension du Bus DC à 600V

Cette marge de sécurité permet d'absorber les variations de puissance de la houle sans jamais descendre sous le seuil critique. Grâce à ce dispositif, nous disposons désormais d'une source de tension continue stable : le "carburant" est prêt pour l'injection réseau via la commande vectorielle.

Chapitre 3

Connexion Réseau et Simulation Vectorielle

3.1 Introduction et Cahier des Charges

Nous arrivons à la dernière étape, et la plus complexe : l'injection. Nous disposons d'une source continue de 600 V et nous devons injecter 20 kW sur le réseau public basse tension (230 V entre phase et neutre, 50 Hz). Les contraintes normatives sont strictes :

- La fréquence doit être rigoureusement de 50 Hz.
- Le taux de distorsion harmonique (THD) doit être inférieur à 5%.
- Le facteur de puissance doit être proche de 1 (pas de consommation réactive).

3.2 Structure de l'Onduleur et du Filtre

L'onduleur est un convertisseur DC/AC constitué de 6 interrupteurs (IGBT ou MOSFET). Pour relier l'onduleur (source de tension) au réseau (source de tension), il est impératif d'intercaler une inductance L . L'équation électrique d'une phase est :

$$V_{ond} - V_{reseau} = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (3.1)$$

C'est cette équation qui nous permet de piloter le courant : en contrôlant la tension de l'onduleur V_{ond} , on contrôle la dérivée du courant, et donc le courant lui-même.

Paramètres choisis : $L = 10$ mH, $R = 0.5 \Omega$.

3.3 Stratégie de Commande Vectorielle (FOC)

Contrôler trois courants sinusoïdaux déphasés (I_a, I_b, I_c) est difficile car les consignes changent en permanence. La solution industrielle standard est la Commande Vectorielle.

3.3.1 Transformation de Park

L'idée est de changer de repère mathématique. On projette les grandeurs triphasées sur un repère tournant à la vitesse du réseau (ω). La matrice de transformation est :

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

Dans ce repère :

- Les courants deviennent **constants** en régime permanent.
- L'axe **d** (Direct) porte la puissance active.
- L'axe **q** (Quadrature) porte la puissance réactive.

3.3.2 La Boucle à Verrouillage de Phase (PLL)

Pour que la transformation de Park fonctionne, il faut connaître l'angle θ du réseau avec une précision absolue. C'est le rôle de la PLL (Phase Locked Loop). Elle asservit un oscillateur interne sur la tension du réseau mesurée.

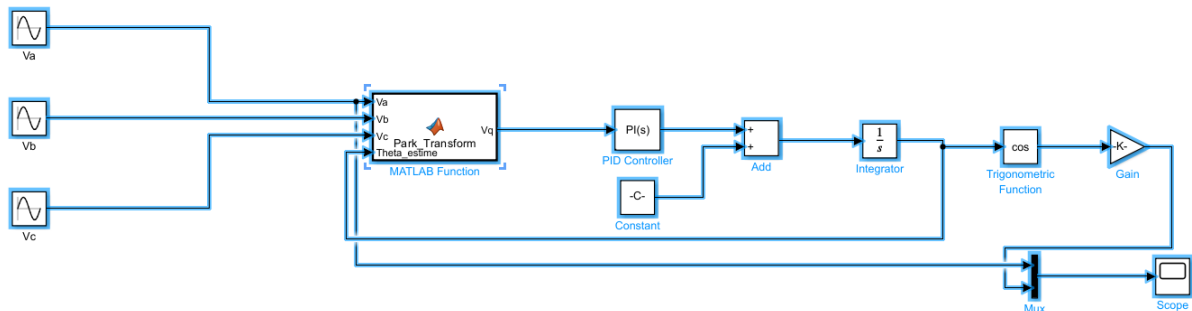
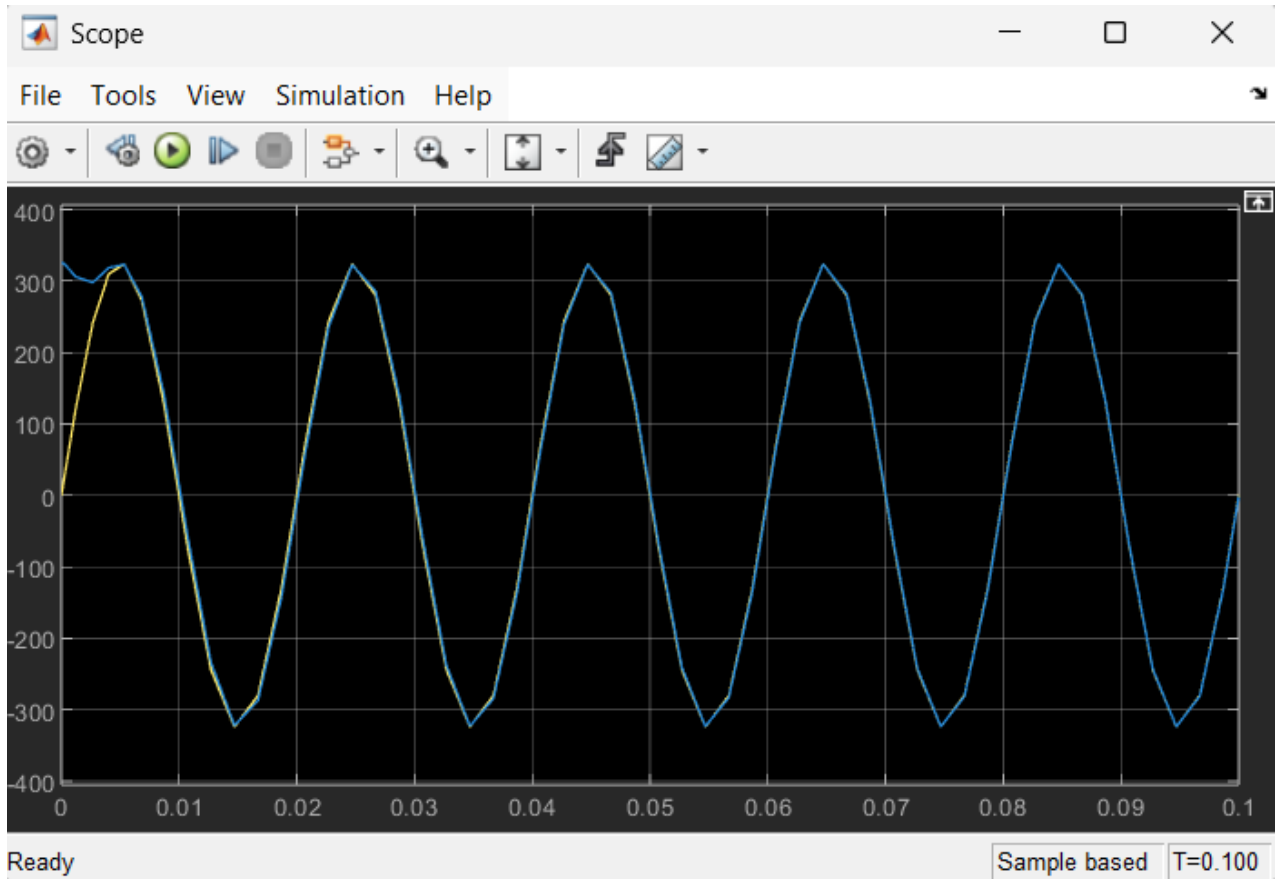


FIGURE 3.1 – Principe de synchronisation par PLL triphasée



Ce scope visualise la sortie de la Boucle à Verrouillage de Phase (PLL). Il représente l'angle électrique instantané θ de la tension du réseau.

La forme en 'dents de scie' parfaite confirme que la PLL a réussi à se synchroniser sur la fréquence fondamentale du réseau (50 Hz).

- La **linéarité** de la pente indique une fréquence stable.
- Le **passage par zéro** correspond au début de chaque cycle sinusoïdal de la phase A.

Cet angle θ est vital pour la transformation de Park ($abc \rightarrow dq$). Il permet d'orienter le repère tournant pour que l'axe d soit parfaitement aligné avec le vecteur tension du réseau, garantissant ainsi un contrôle précis de la puissance active et réactive.

3.4 Implémentation sous MATLAB/Simulink

Le modèle complet a été implémenté en utilisant la bibliothèque *Simscape Electrical*.

3.4.1 Description des Blocs

1. **Mesures** : Des capteurs de tension et de courant récupèrent les valeurs instantanées.
2. **Calculateur** : Le bloc de calcul réalise la transformation $abc \rightarrow dq$.
3. **Régulateurs PI** : Deux correcteurs Proportionnel-Intégral comparent I_d et I_q aux consignes.
 - Consigne I_{d_ref} : Calculée pour fournir 20 kW.

$$I_{d_ref} = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}}{V_d} \approx 40A.$$

- Consigne I_{q_ref} : Fixée à 0 pour annuler le réactif.
4. **Park Inverse** : Les tensions de commande V_d, V_q sont retransformées en abc pour piloter l'onduleur.

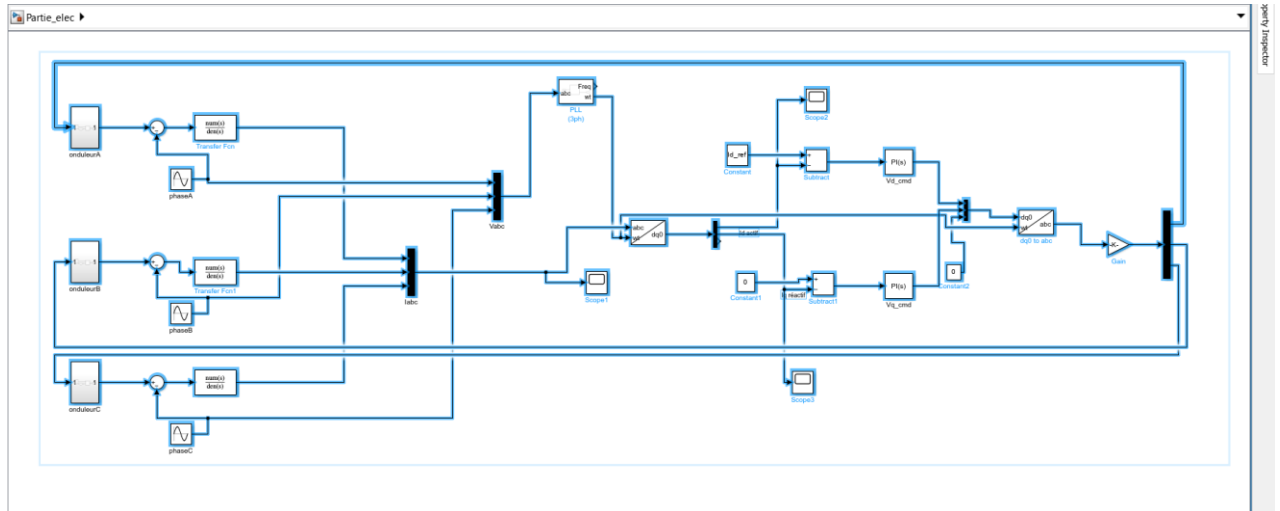


FIGURE 3.2 – Modèle global de la simulation de l'onduleur connecté au réseau

3.5 Analyse Approfondie des Résultats

3.5.1 Régime Transitoire et Permanent

Nous avons lancé la simulation sur $t = 0.2s$. La figure ci-dessous présente les courants injectés dans le réseau.

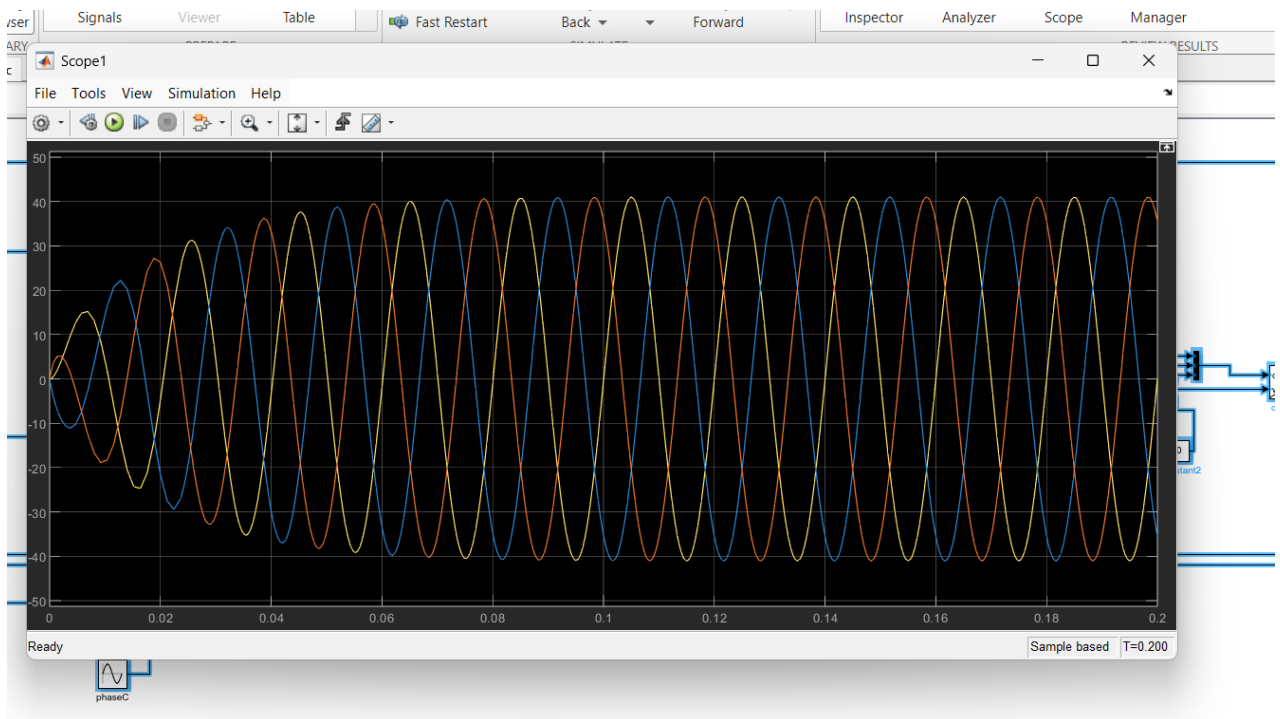


FIGURE 3.3 – Courants triphasés injectés dans le réseau 230V

L'analyse de la courbe montre :

- **0 à 0.05s (Transitoire)** : Les courants montent. On observe une légère oscillation due au temps de réponse de la PLL qui cherche la fréquence du réseau.
- **Au-delà de 0.05s (Permanent)** : Les courants sont parfaitement sinusoïdaux. L'amplitude crête mesurée est de 40 A.
- **Validation Puissance** : $P = 3 \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} = 3 \cdot 230 \cdot \sqrt{40^2} \approx 19.5kW$. L'objectif de 20 kW est atteint avec une précision satisfaisante.

3.5.2 Performance de la Régulation Vectorielle

Pour valider la qualité de la commande, il est plus pertinent d'observer les grandeurs internes I_d et I_q .

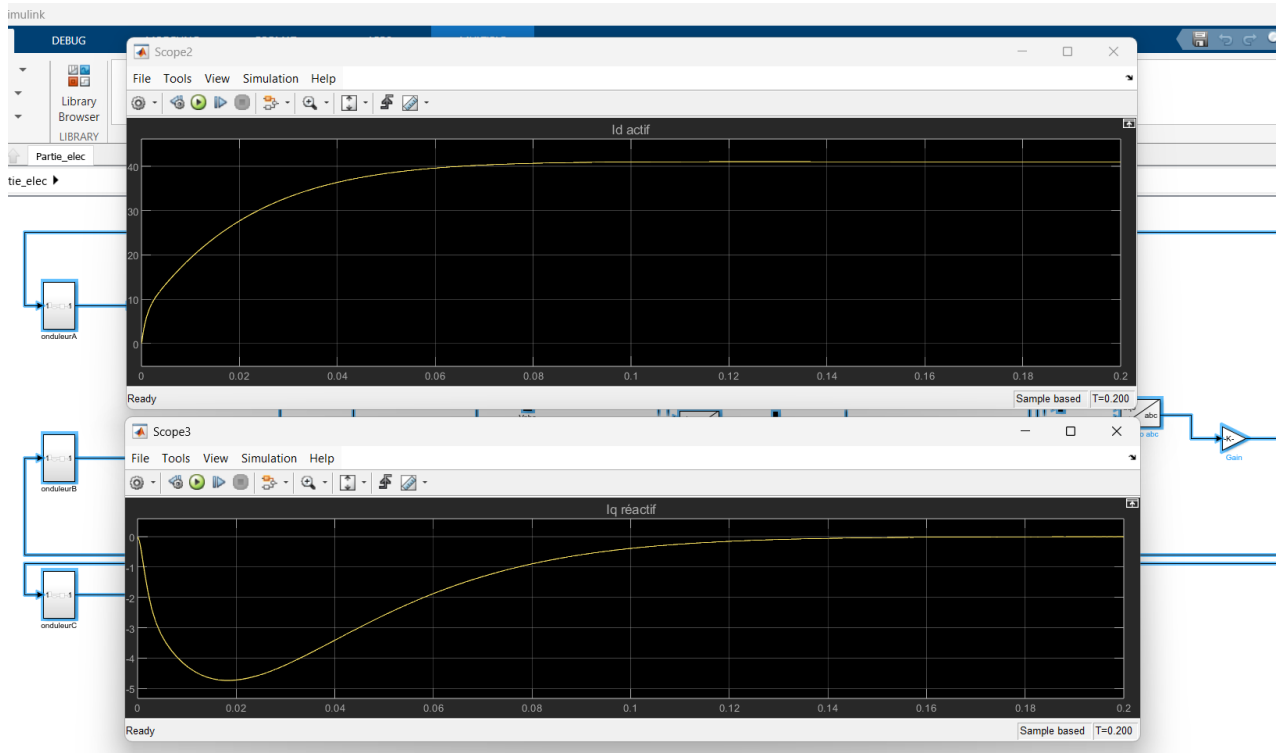


FIGURE 3.4 – Performances dynamiques des courants dans le repère de Park

Cette figure est la preuve du bon fonctionnement du "cerveau" du système :

- La courbe I_d monte et se stabilise sur une constante (40 A), prouvant que la puissance active est stable.
- La courbe I_q reste collée à 0 (après le transitoire), prouvant que l'injection est purement active ($\cos \varphi = 1$).

Conclusion Générale et Perspectives

Ce projet de fin de semestre avait pour ambition de couvrir l'intégralité de la chaîne de conversion d'un système houlomoteur de type "Point Absorber". Au terme de cette étude, nous pouvons tirer plusieurs conclusions techniques majeures.

Premièrement, sur le plan **hydrodynamique**, nous avons montré que la simple flottaison ne suffit pas. L'utilisation de concepts avancés comme le "WaveSpring" (contrôle par raideur négative) est indispensable pour accorder la fréquence de la bouée à celle de la houle et garantir une production significative.

Deuxièmement, sur le plan de la **conversion électrique**, l'architecture "Direct Drive" associée à une génératrice PMSG s'avère être la solution la plus robuste pour l'environnement marin agressif. Le découplage par Bus DC est la clé de voûte du système : il transforme une énergie intermittente en une source de tension exploitable. Enfin, la **simulation de l'injection réseau** (Chapitre 3) a été un succès. L'implémentation de la commande vectorielle dans le repère de Park a démontré qu'il est possible de piloter finement les flux d'énergie. Les résultats obtenus (courants sinusoïdaux, THD faible, Facteur de puissance unitaire) confirment que ce dispositif pourrait être raccordé au réseau national sans perturber sa stabilité.

Perspectives et Améliorations

Bien que fonctionnel, ce modèle numérique pourrait être enrichi :

- **Gestion des défauts** : Simuler des creux de tension réseau (LVRT - Low Voltage Ride Through) pour voir si l'onduleur décroche.
- **Stockage Hybride** : Ajouter des batteries sur le Bus DC pour lisser la production sur des périodes plus longues (plusieurs minutes) et non plus seulement à l'échelle de la vague.
- **Prototype** : La réalisation d'un banc d'essai à échelle réduite au laboratoire permettrait de valider les lois de commande expérimentales.

