

III. 1 Introduction

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutifs. La simulation quand elle nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé, ceci nous permet d'expérimenter un ensemble de paramètres et de choisir la solution optimale.

Les logiciels de simulations sont des outils puissants pour tester et évaluer les modèles des systèmes obtenus de l'étude théorique. Pour simuler notre système de pompage photovoltaïque on a utilisé le logiciel Matlab qui inclut l'outil de simulation « Sim-power-system ». Il tient compte de la division d'un système simulé en un certain nombre de sous-ensembles. Ces sous-ensembles peuvent être modélisés et examinés individuellement et interconnectés plus tard. Ceci permet d'établir des sous-ensembles physiques [19] tel que le panneau solaire, les convertisseurs, la MPPT, la commande vectorielle, les machines et la pompe qui est la partie finale de notre dispositif.

III. 2 Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont [24] :

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

III.2.1 Evaluation des besoins en eau

L'estimation des besoins en eau est la première étape à suivre lors d'un dimensionnement d'une installation du pompage photovoltaïque. Les besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépendent essentiellement de son mode de vie. Celles-ci que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne par jours. Dans le cas de l'irrigation, les besoins d'eau dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question). Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale.

III.2.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_h = \frac{C_H \cdot Q \cdot HMT}{R_p} \quad (III.1)$$

E_h : Énergie hydraulique habituellement exprimé en KWh.

Q : Débit journalier (m³ / jour).

HMT est la hauteur manométrique totale.

R_p : En général le rendement des groupes motopompes est de 30% et 45%, selon le type de pompe et de moteur [25].

$$C_H = \frac{g \cdot \rho}{3600} = 2.725 \left(Kg \cdot s \cdot \frac{h}{m^2} \right) \quad (III.2)$$

g : Constante de gravité (9.81 m/s-1).

ρ : La densité de l'eau (1000kg/m³).

III.2.3 Détermination de l'énergie solaire disponible

Il est nécessaire de connaître l'énergie solaire reçue en moyenne par jour sur le site pendant une période donnée. L'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire. Les panneaux doivent constamment maintenir un angle droit avec les rayons du soleil , sinon orienté en plein Sud dans l'hémisphère Nord et plein Nord dans l'hémisphère Sud [24].

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, son principe est de réaliser un bilan énergétique sous les conditions les plus défavorables pour le système. C'est-à-dire, si le système fonctionne durant ce mois, il fonctionnera dans les autres mois, donc il nous garantit un fonctionnement annuel. L'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire correspondantes à ce mois, serviront pour le choix des composantes du système [25].

III.2.4 Choix des composants

Les méthodes de dimensionnement sont basées sur les calculs des valeurs moyennes journalières ou mensuelles de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire [26].

- **Dimensionnement du générateur photovoltaïque**

La puissance que doit fournir le générateur photovoltaïque sera déterminée par la puissance nominale demandée par l'ensemble motopompe. On doit dimensionner le générateur PV, c'est-à-dire déterminer le nombre de modules qui le constituent pour alimenter le moteur [5].

Ce nombre total est lié à celui des modules en série N_s et N_p en parallèle par la relation :

$$N = N_s \cdot N_p \tag{III.3}$$

- **Dimensionnement du moteur**

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque en plus du couple et de la vitesse nécessaire pour l'entraînement de la pompe.

- **Dimensionnement de la pompe centrifuge :**

La puissance mécanique requise par la pompe sera :

$$P_{mec} = \frac{P_H}{\eta} \tag{III.4}$$

P_H : La puissance Hydraulique nécessaire .

η : Le rendement de la pompe

III. 3 Simulation d'un générateur PV avec hacheur boost et la commande MPPT (P&O)

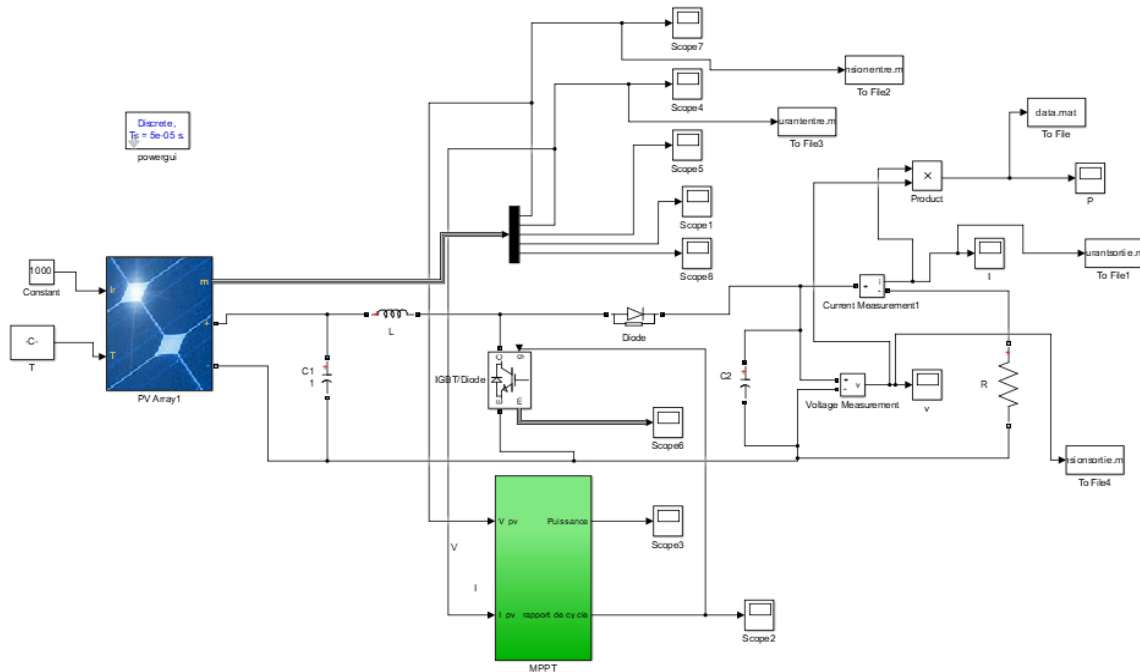


Figure (III.1): Schéma bloc d'un générateur PV avec hacheur Boost et la commande MPPT (P&O).

III.3.1 Simulation du panneau solaire

En utilisant le modèle mathématique du module solaire développé dans le chapitre précédent par les équations (II.1), (II.5), (II.8) on obtient le bloc schématique de la Figure (III.1).

Les entrées dans notre cas sont l'irradiation en (W/m²) et la température en (°C) qui influent sur les valeurs de sorties qui est la puissance c'est-à-dire la tension et le courant.

Le modèle de module photovoltaïque est le Kyocera Solar KC200GT qui est un modèle commerciale dédié à la modélisation et à la simulation. Il contient 54 cellules solaires, et fournit une puissance maximum nominale de 200,143W. Les caractéristiques physiques et électriques de notre panneau photovoltaïque utilisé dans la simulation sont présentées dans l'annexe A.

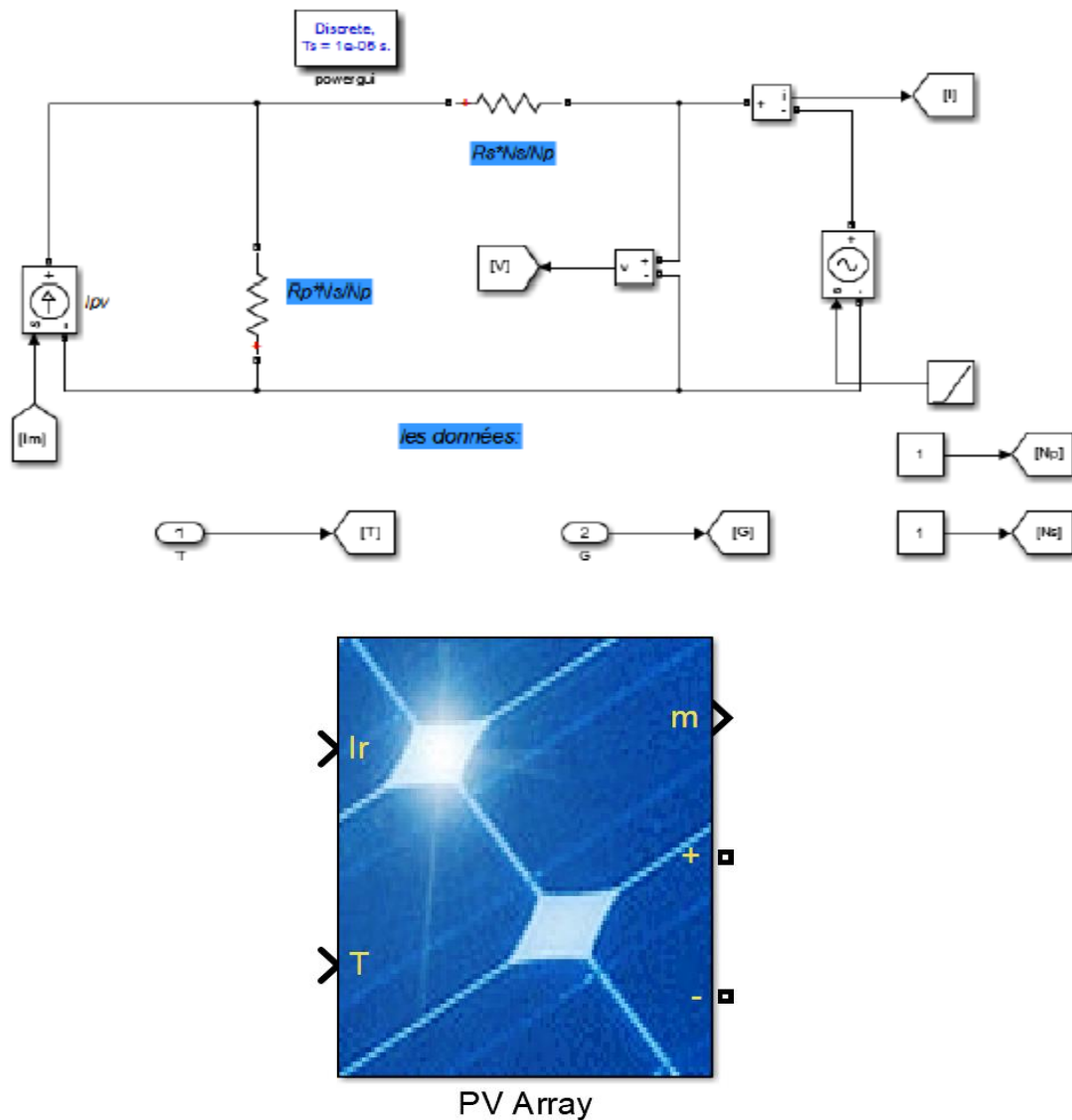


Figure (III.2): Schéma bloc de Sim-power-system d'un panneau solaire.

III.3.1.1 Influence d'éclairement sur le fonctionnement de panneau PV

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ($T = 25^{\circ}\text{C}$) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

D'après la figure (III.3), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (E) et une faible diminution de la tension du circuit ouvert. C'est qui prouve que le courant de court-circuit de la cellule dépend de l'éclairement, par contre la tension de circuit ouvert subit une légère augmentation quand l'éclairement varie de 200 W/m^2 à 1000 W/m^2 .

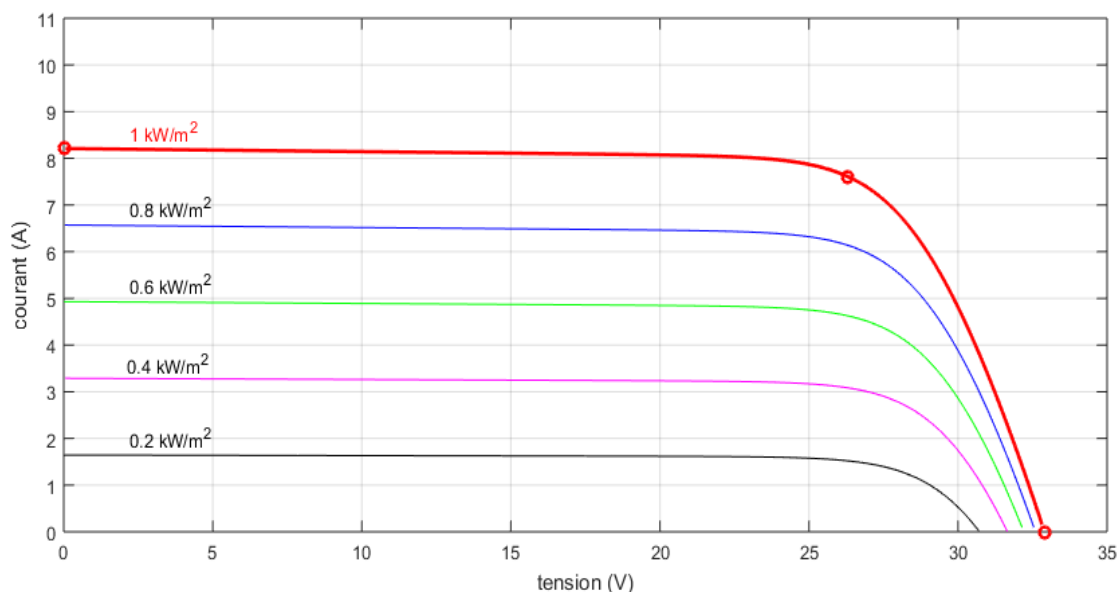


Figure (III.3) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairement et une température $T=25^{\circ}\text{C}$.

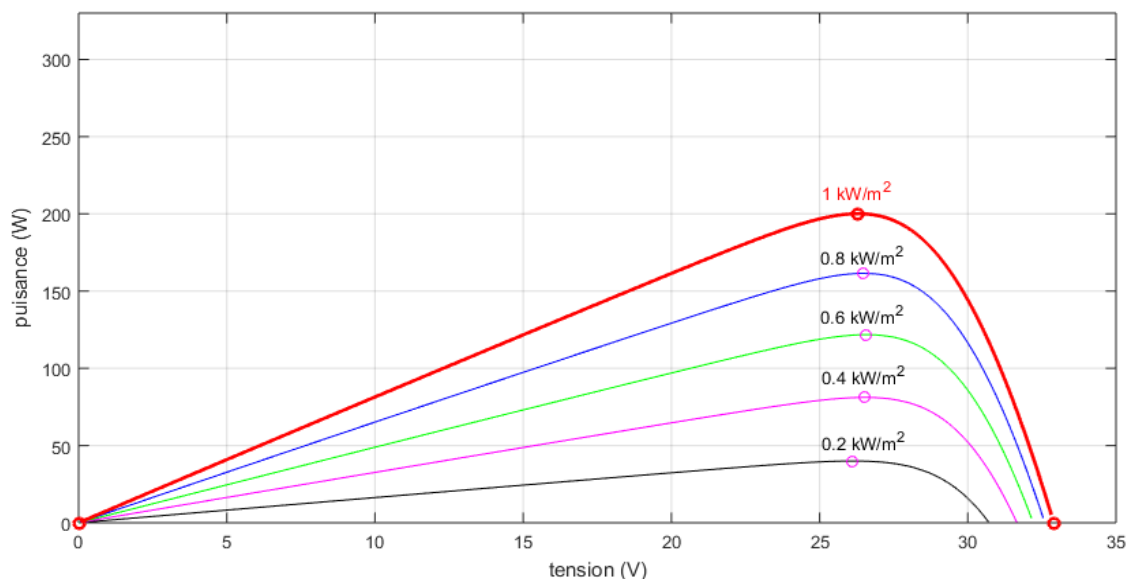


Figure (III.4) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension pour différents Eclairements et une température $T=25^{\circ}\text{C}$.

On remarque aussi sur la figure (III.4) que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

III.3.1.2 Influence de la température sur le fonctionnement de panneau PV

En variant la température dans une plage de 0 à 75°C tous en maintenant une irradiation constante de 1000 W/m². On constate d'après les figures (III.5) et (III.6) que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

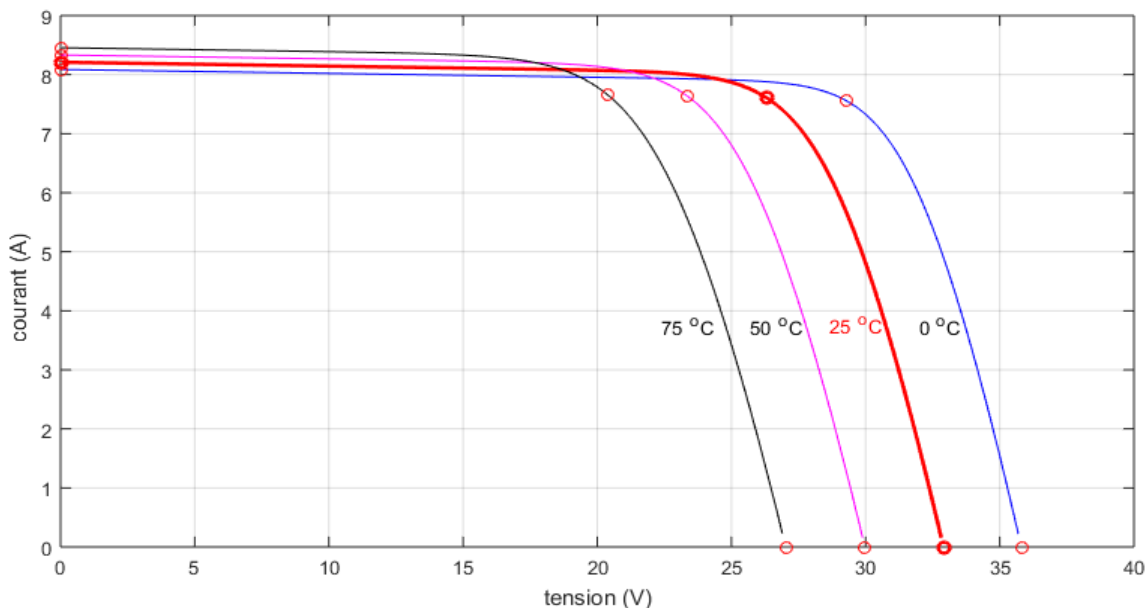


Figure (III.5) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures et un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$.

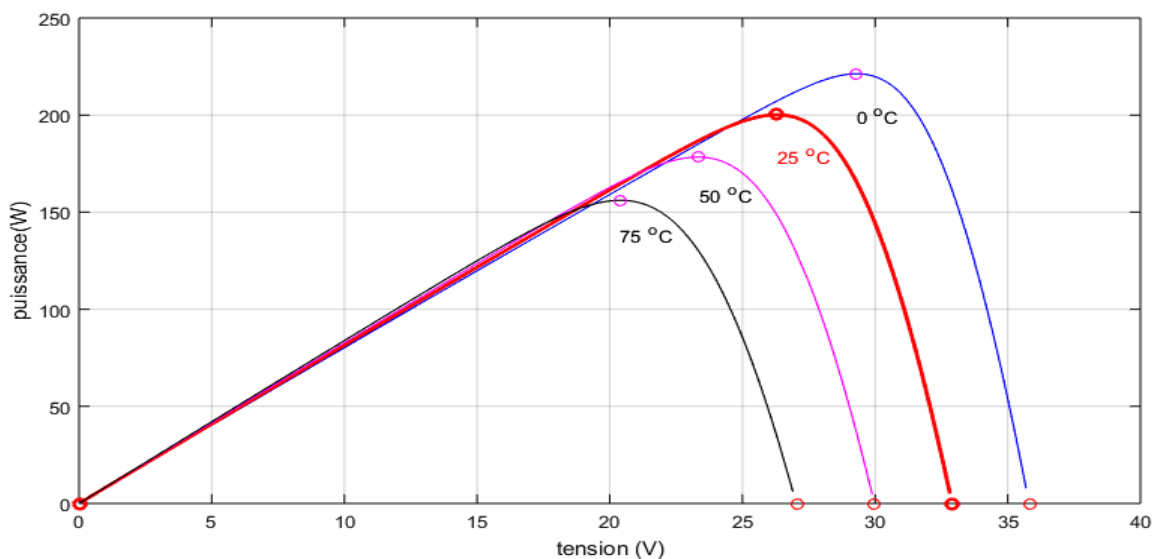


Figure (III.6) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension pour différentes températures et un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$.

Le modèle choisi a donné des résultats concordants et reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement, ce qui valide le modèle utilisé.

Cependant, afin de garantir des puissances importantes et de pallier les effets des entrées, il est judicieux d'associer en série et en parallèle plusieurs modules.

III.3.2 Simulation commande MPPT (P&O)

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O vu dans le paragraphe (II.4). Il utilise la tension et le courant comme donnée d'entrée pour déterminer le rapport cyclique qui sera injecté dans le premier bloc de puissance (Hacheur Boost).

La figure (III.7) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT :

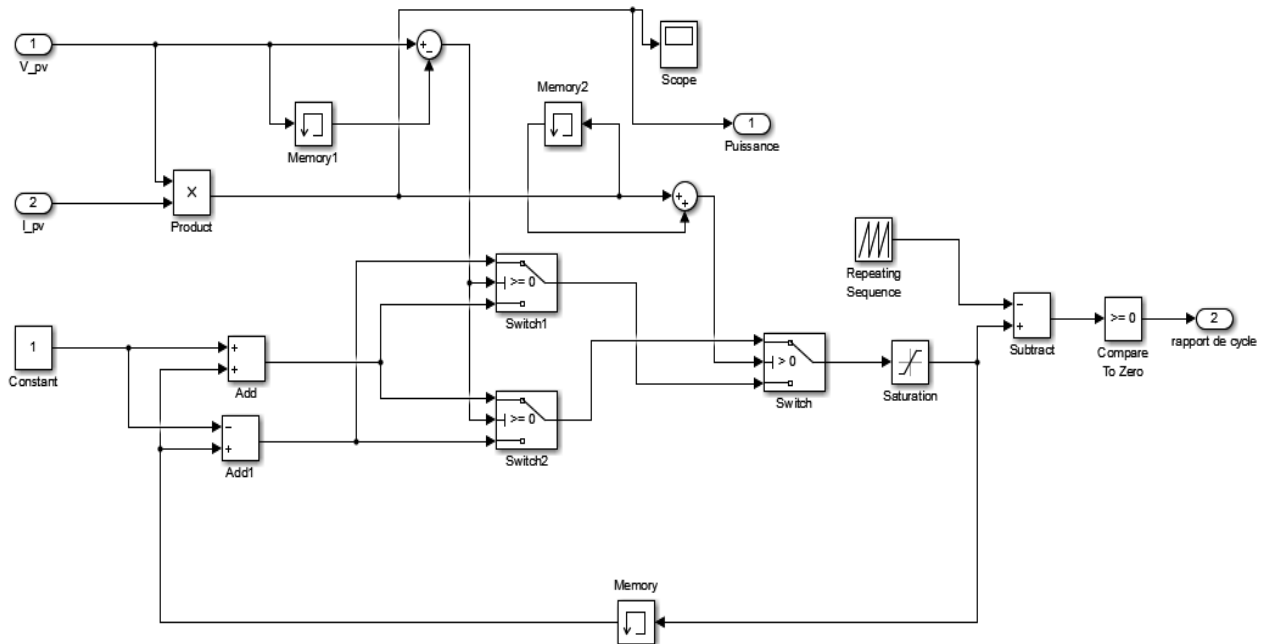


Figure (III.7) : Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).

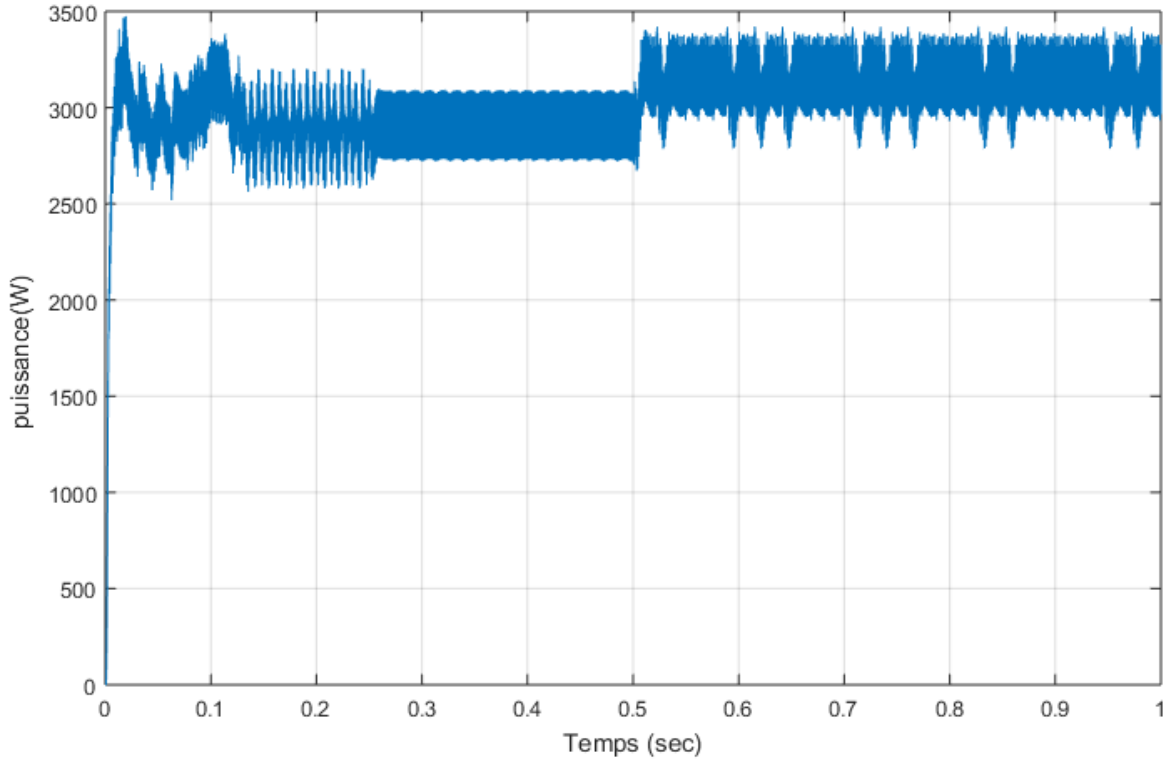


Figure (III.8) : Résultats de simulation de la poursuite du point de puissance maximale par la méthode (P&O).

Nous constatons que la commande MPPT nous donne la valeur maximale de la puissance P ce qui montre son efficacité, On constate des oscillations causées par l'algorithme de cette commande.

III.3.3 Simulation du convertisseur DC-DC (Hacheur Boost)

Le schéma bloc de la figure ci-dessous est réalisé à partir des équations du hacheur boost qui ont été développé dans le paragraphe (II.5).

Notre hacheur est composé d'une résistance $R=8\Omega$, une inductance $L=6e-3H$ qui permet de limiter les ondulations du courant et éviter le régime discontinu, deux condensateurs de $250e-6$ pour filtrer les parasites et éviter les discontinuités de tension.

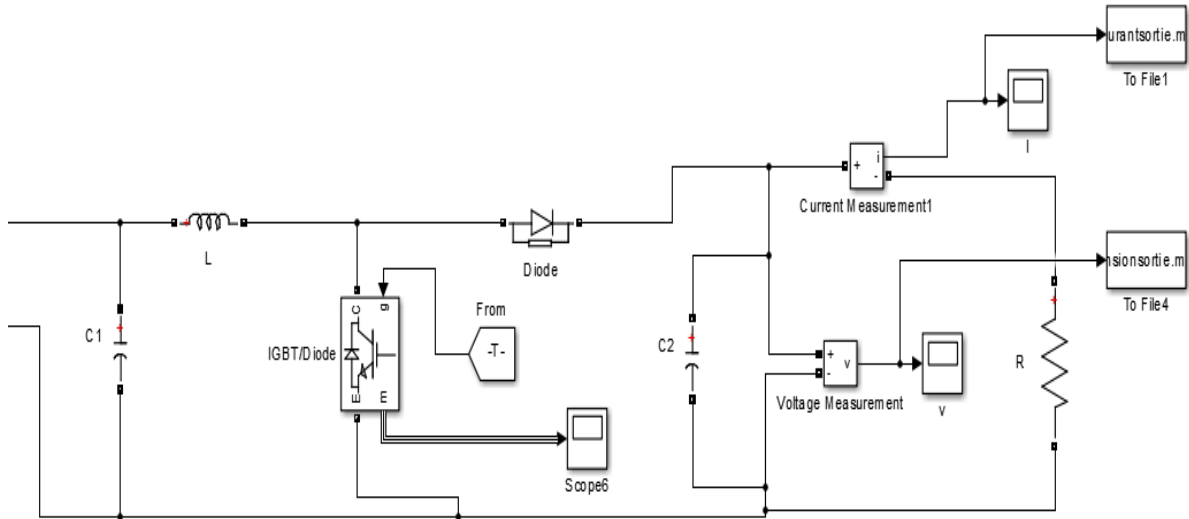


Figure (III.9) : schéma bloc du hacheur boost

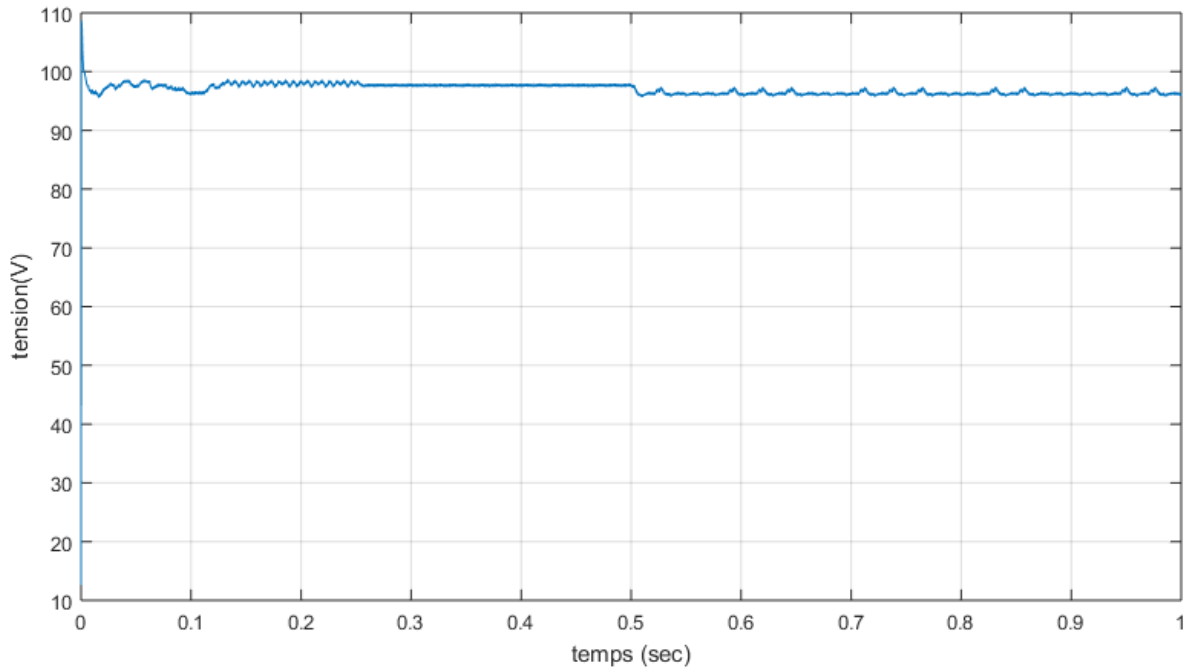


Figure (III.10) : Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur boost.

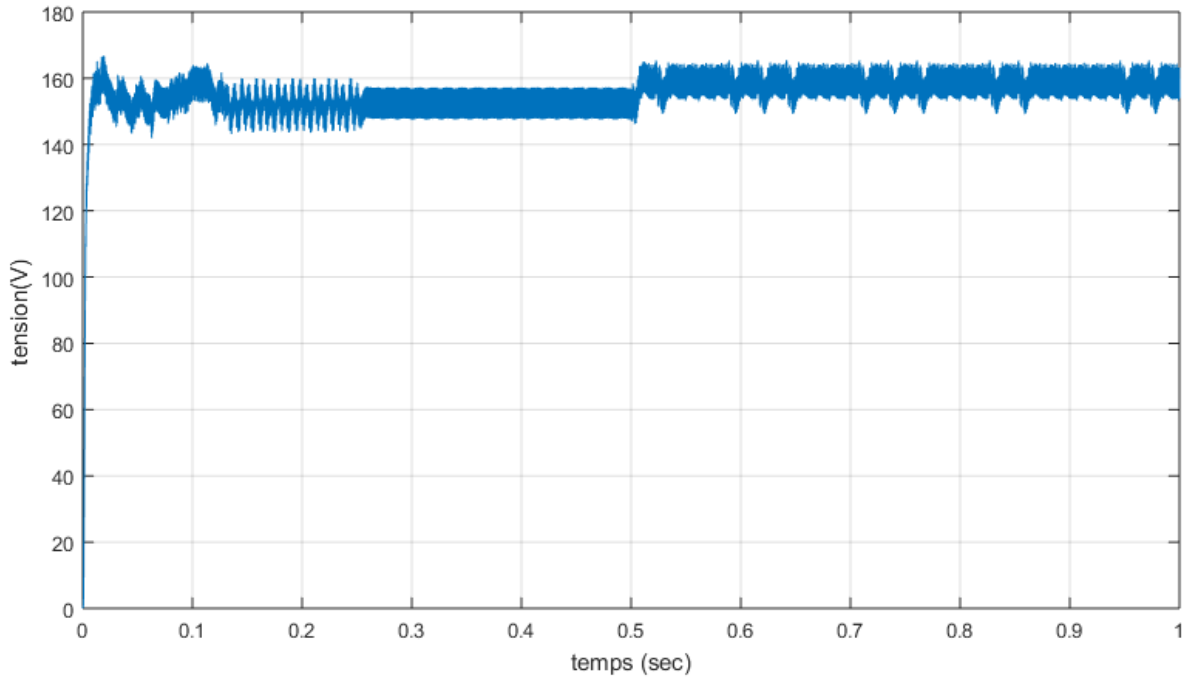


Figure (III.11) : Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur boost.

Les résultats de simulation du convertisseur boost représentés par les figures (III.10) et (III.11) nous montre que le hacheur boost effectué correctement sans rôle puisque la tension de sortie du hacheur est supérieur à celle l'entrée ($V_e=98V$ et $V_s=160V$).

III. 4 Simulation du convertisseur DC-AC (Onduleur) et la commande MLI

Pour la simulation de notre onduleur nous avons utilisé le schéma bloc de l'onduleur deux niveaux déjà présenté à base IGBT dans le chapitre précédant. La régulation envisagée est pour les courants de phases. Nous avons optés pour la commande MLI permettant de gérer les trois courants d'alimentation de notre machine à partir des courants de référence calculés au niveau de la commande. La figure (III.12) présente le schéma bloc de la commande MLI.

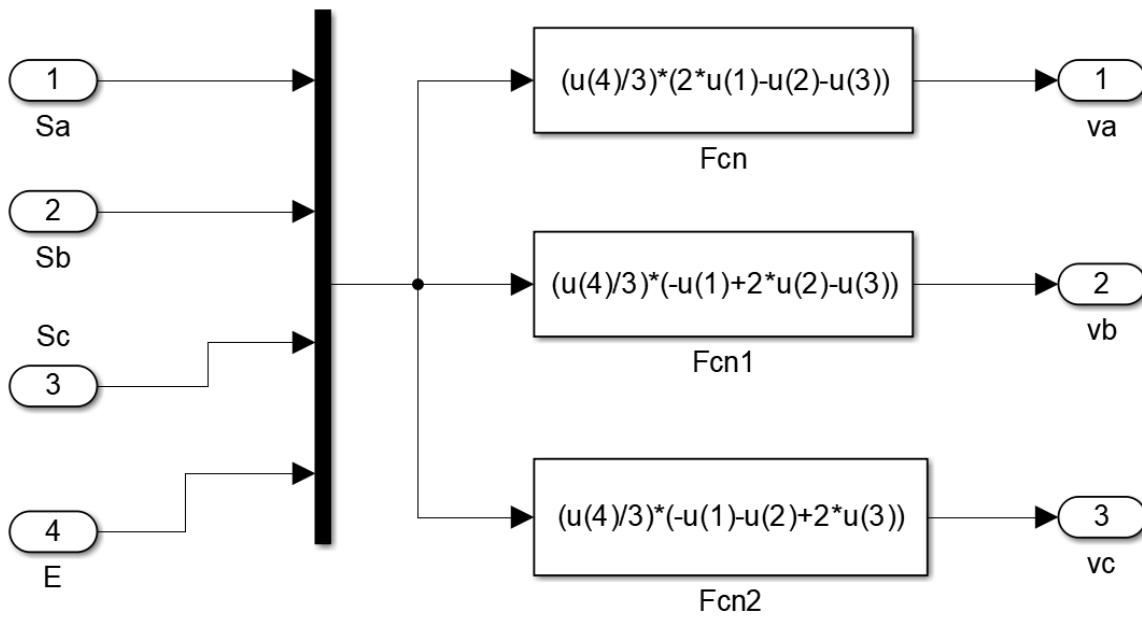


Figure (III.12): Schéma bloc de la commande MLI.

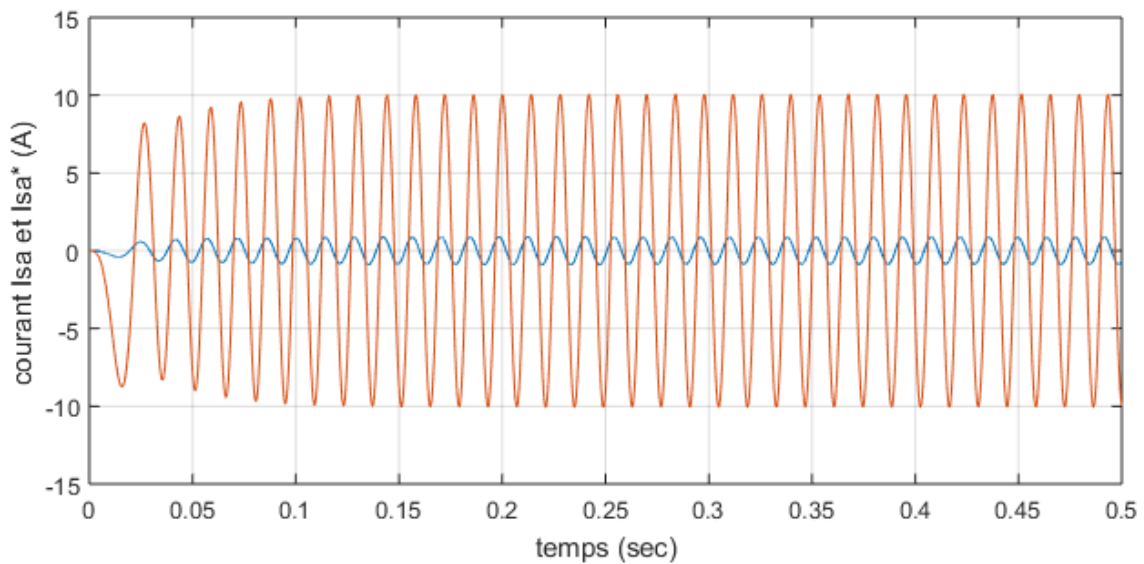


Figure (III.13): Résultats de simulation du courant Isa de référence et Isa mesuré

Nous constatons bien que le courant Isa suit parfaitement sa référence avec une bonne dynamique.

III.5 Simulation de la machine synchrone à aimant permanent et la commande vectorielle

Les paramètres de la machine utilisés sont présentés dans l'annexe B.

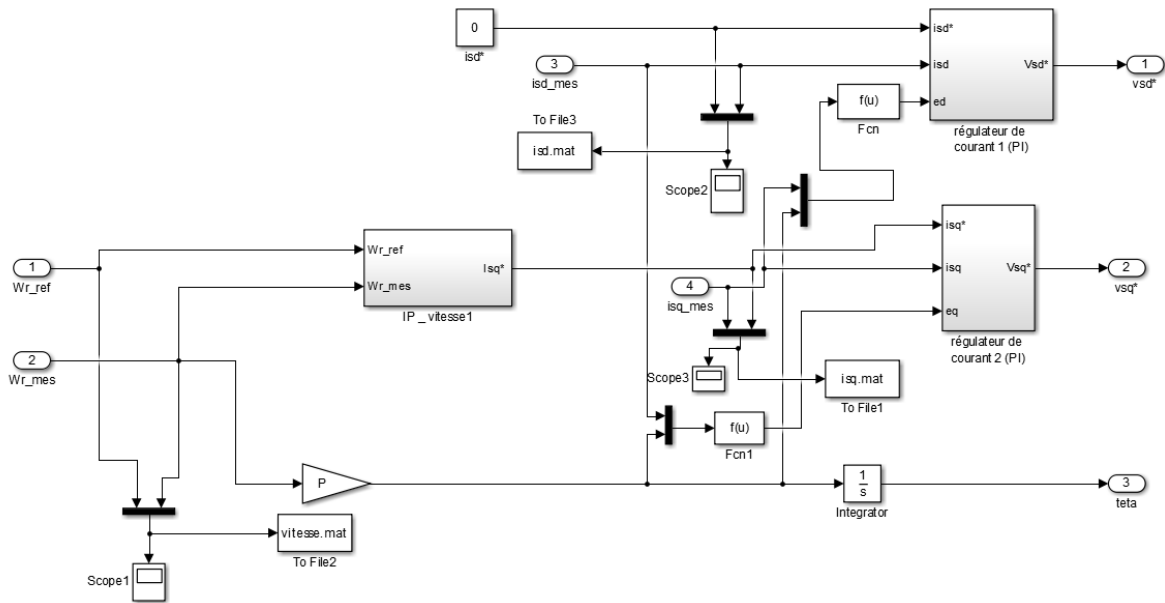


Figure (III.14): Schéma bloc de la commande vectorielle du moteur synchrone.

III.5.1 Vitesse de la machine

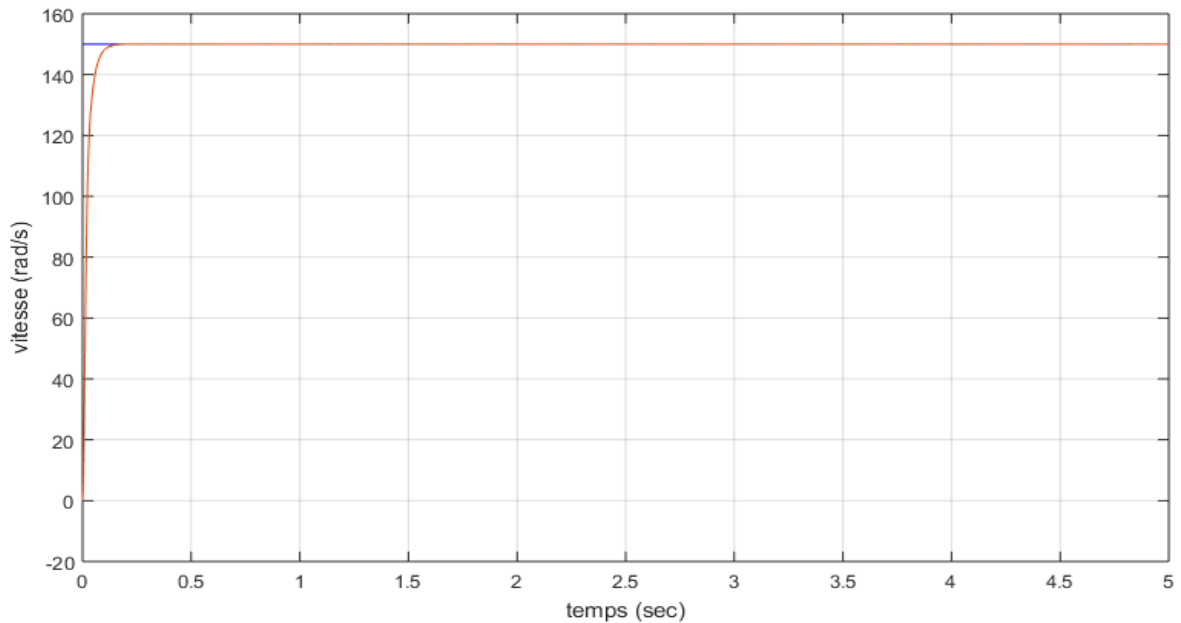


Figure (III.15): Vitesse de rotation de référence et vitesse mesurée.

Nous constatons bien que la vitesse de rotation ω suit parfaitement sa référence avec une bonne dynamique ce qui montre l'efficacité de ce régulateur comme attendu.

III.5.2 Couple électromagnétique, courant I_{sd} et I_{sq} du moteur synchrone

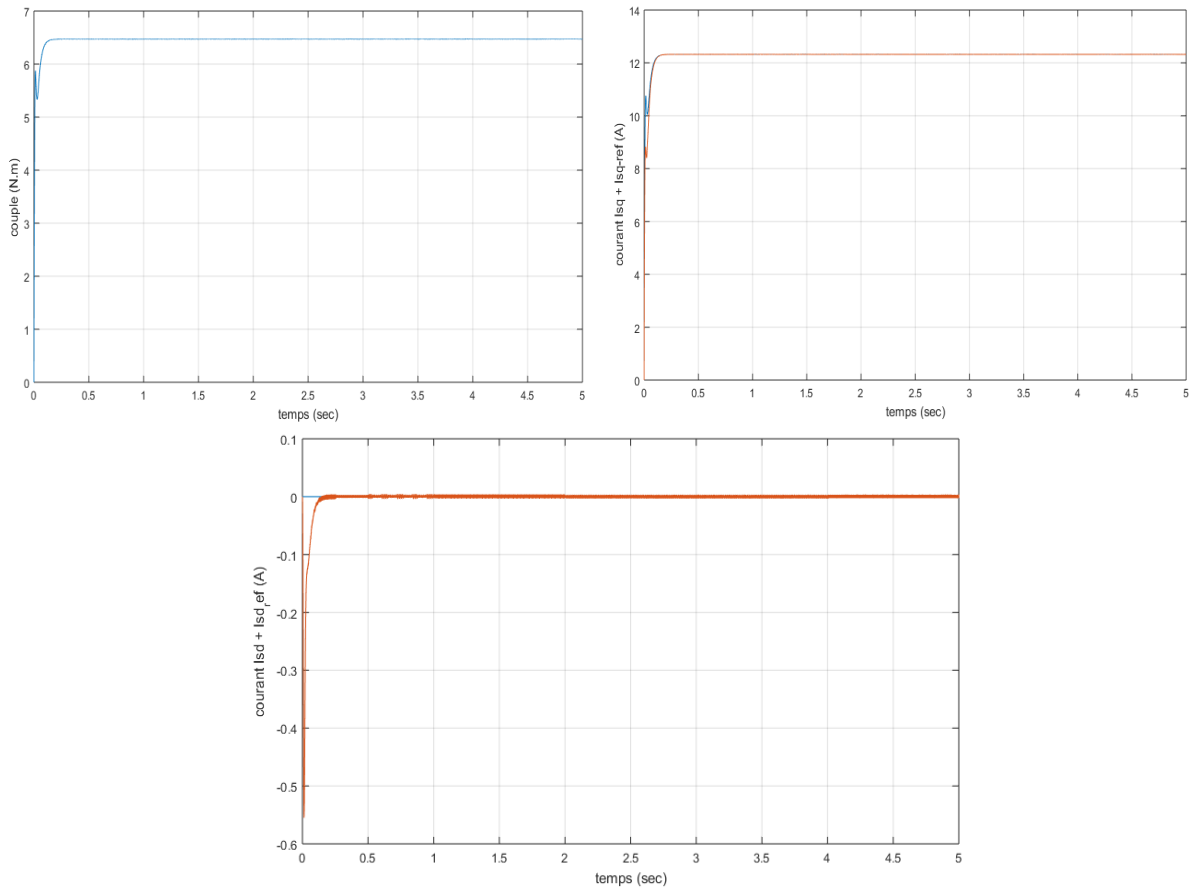


Figure (III.16) : Couple électromagnétique, courant I_{sq} et I_{sd}

La forme du couple électromagnétique est identique à celle du courant en quadrature i_{sq} ce qui montre bien l'effet de découplage, avec une valeur de courant direct I_d pratiquement nul.

Le régulateur IP a amélioré la dynamique de la vitesse et a rejet les perturbations c'est-à-dire l'absence du dépassement.

III.5.3 Simulation de la pompe

Le schéma bloc ci-dessous est développé à partir des équations de la pompe qui sont présentées dans le paragraphe (II.9.3) par les équations (II.96), (II.97), (II.98) et (II.99).

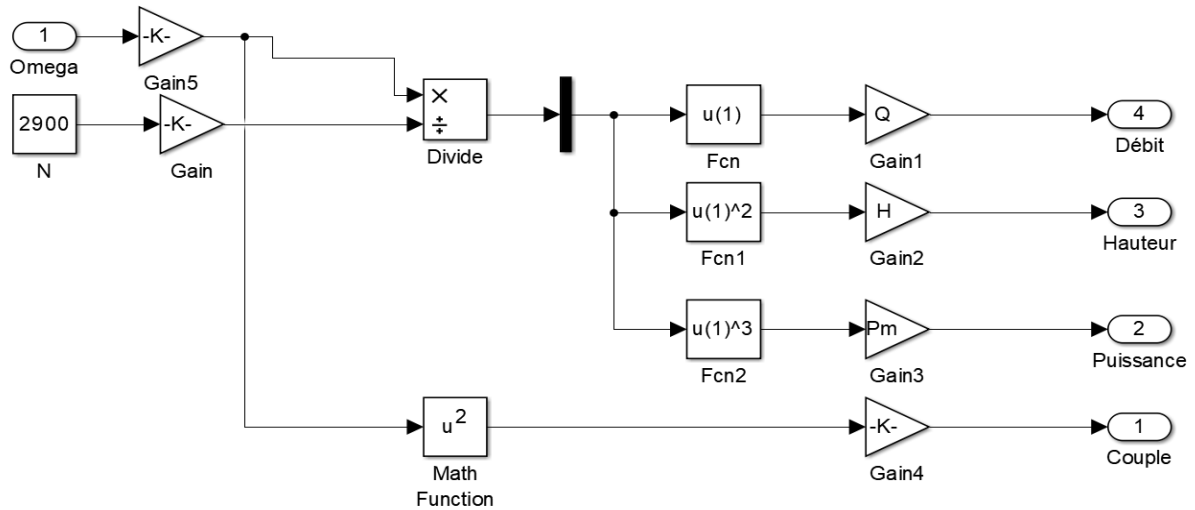


Figure (III.17): Schéma bloc d'une pompe.

Pour l'utilisation des pompes deux paramètres sont important le débit en mètre cube par heure et la hauteur ou la profondeur suivant l'utilisation.

III.5.4 Résultat de simulation de la pompe centrifuge avec un moteur synchrone

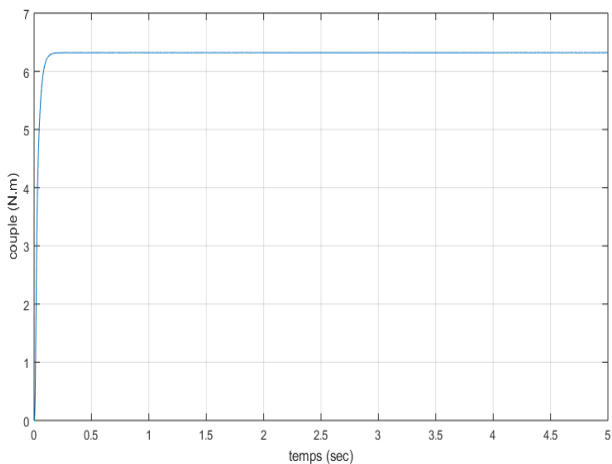


Figure (III.18): Couple résistant de la pompe.

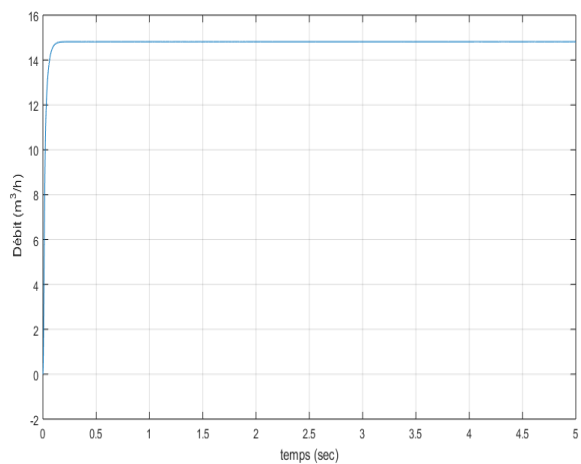


Figure (III.19): Débit de la pompe.

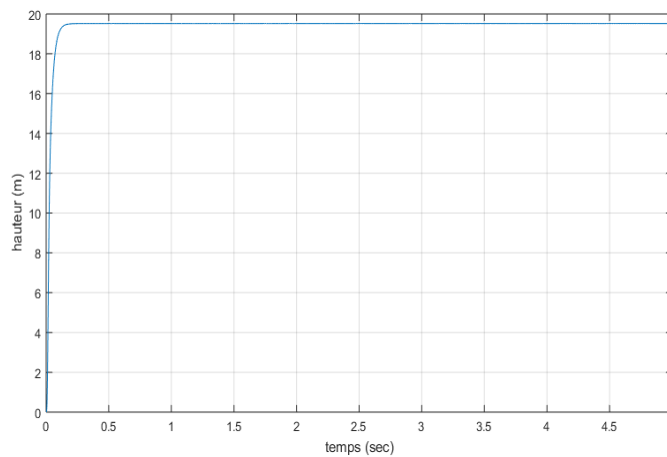


Figure (III.20): Hauteur du jet de la pompe.

On remarque que le couple résistant augmente jusqu'au régime permanent, $C_r \approx 7N.m$.

Le débit est appréciable pour ce type d'utilisation nous pouvons envisager en tous temps un débit constant de l'ordre de $15m^3/heure$ tant que la vitesse reste constante et suit la référence.

La hauteur du jet est de l'ordre de $19m$ qui est aussi une bonne valeur cependant si on doit augmenter cette dernière il faut revoir la vitesse de rotation du moteur.

III.5.5 Etude de la variation de la vitesse

Afin de valider notre modèle établi Figure (III.21), nous avons entrepris des variations sur la vitesse du moteur. Nous avons pris la valeur de départ de $1000tr/min$ comme vitesse de référence du moteur synchrone. A l'instant $t = 2s$, on provoque un changement dans la vitesse de référence pour passer à la valeur de $1500tr/min$, puis à une vitesse de $500tr/min$ à $t = 4s$. Les valeurs de l'ensoleillement et de la température sont maintenues respectivement à $1000W/m^2$ et $25^\circ C$ vue que leurs variations n'ont pas d'impact sur les valeurs de sortie de notre pompe qui sont le débit et la hauteur du jet. Il faut aller vers des valeurs très inférieures à $100W/m^2$ pour voir une variation significative. Les résultats de simulation sont illustrés par les figures suivantes :

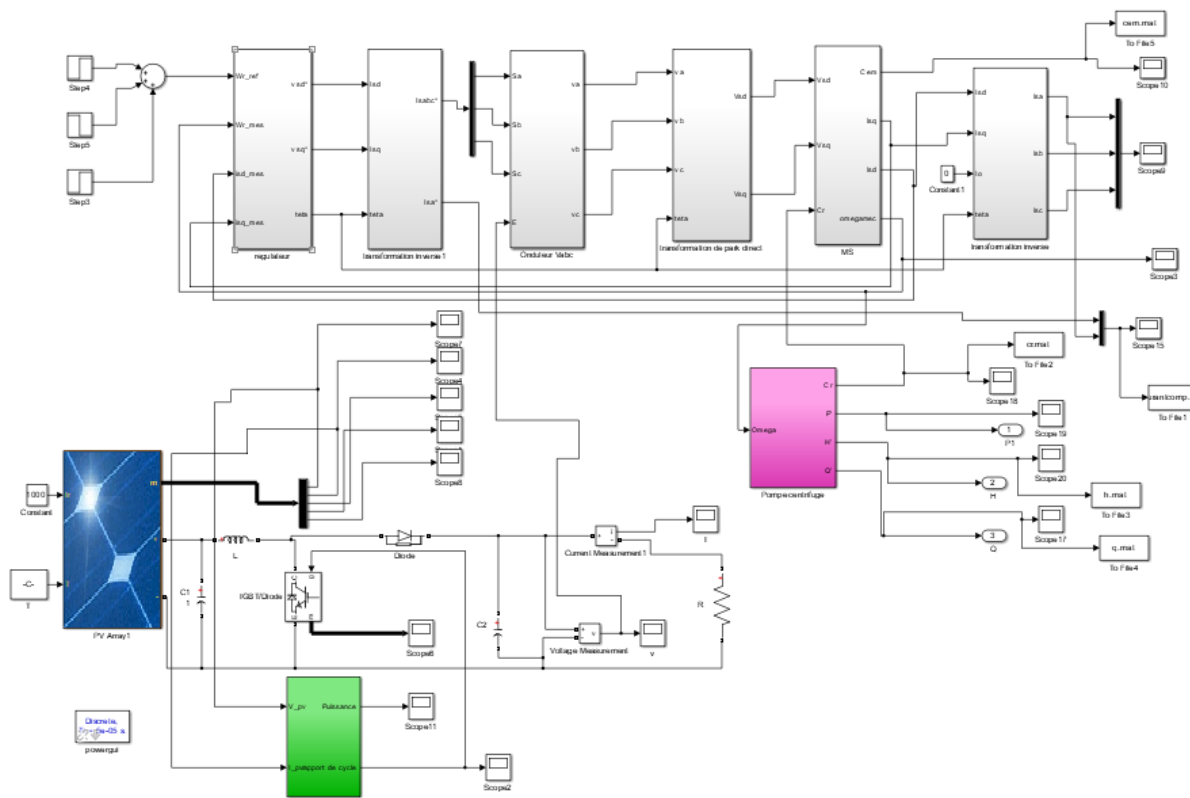


Figure (III.21) : schéma bloc du pompage PV avec une machine synchrone

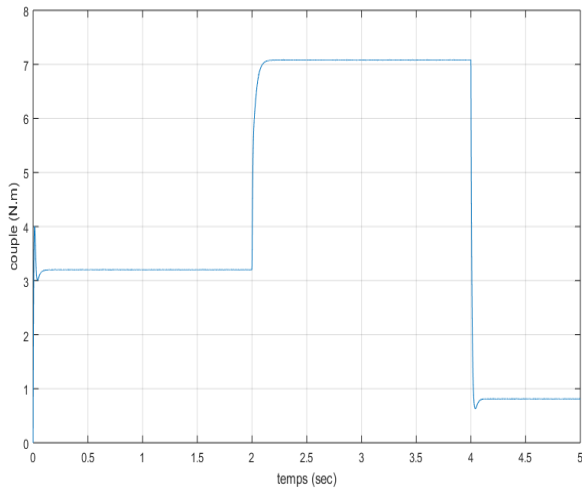


Figure (III.22) : Cem pour différentes vitesse

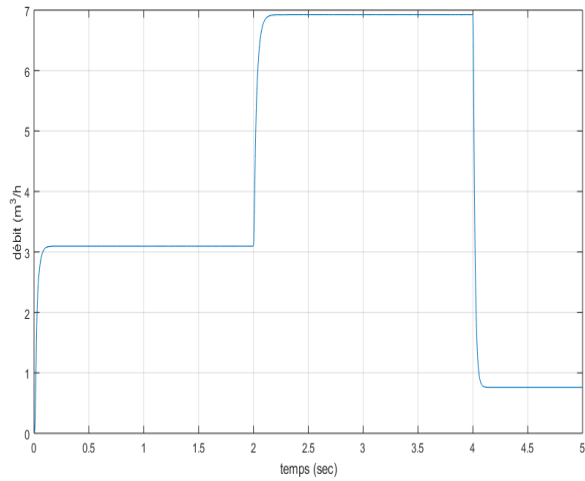


Figure (III.23) : Cr pour différentes vitesse

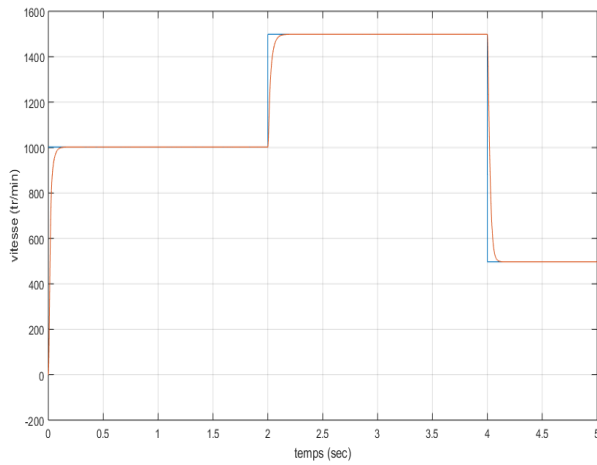


Figure (III.24) : vitesse du moteur

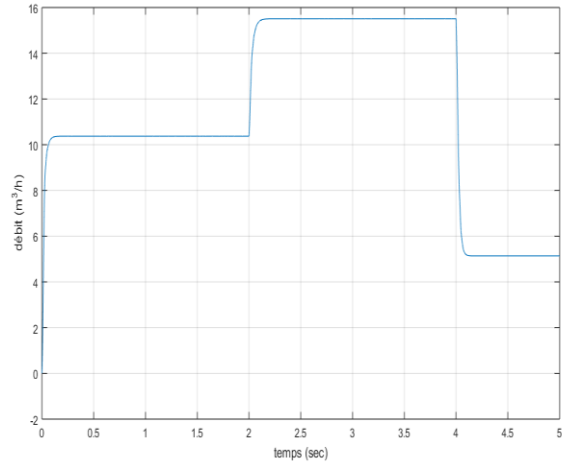


Figure (III.25) : débit de la pompe

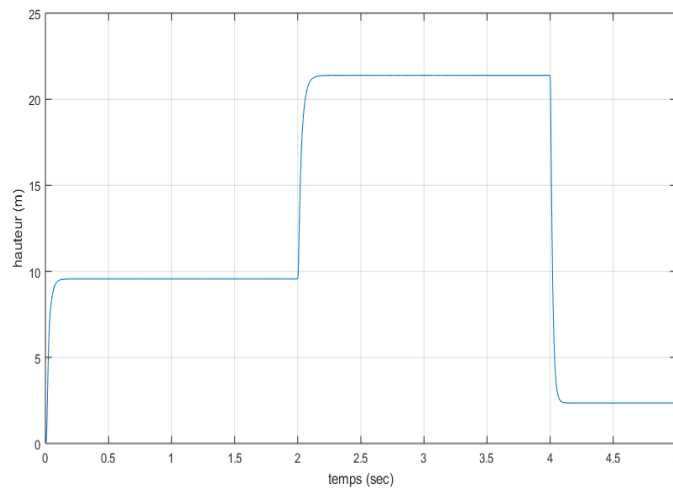


Figure (III.26) : variation de la Hauteur du jet de la pompe

Nous pouvons constater sur ces figures que les résultats de simulation sont satisfaisants, en effet les figures III.24 et III.25 montrent que la vitesse de notre moteur synchrone suit la vitesse de référence et par conséquent la valeur du débit souhaité.

III. 6 Simulation de la machine asynchrone et sa commande vectorielle

Les paramètres de la machine utilisés sont présentés dans l'annexe C.

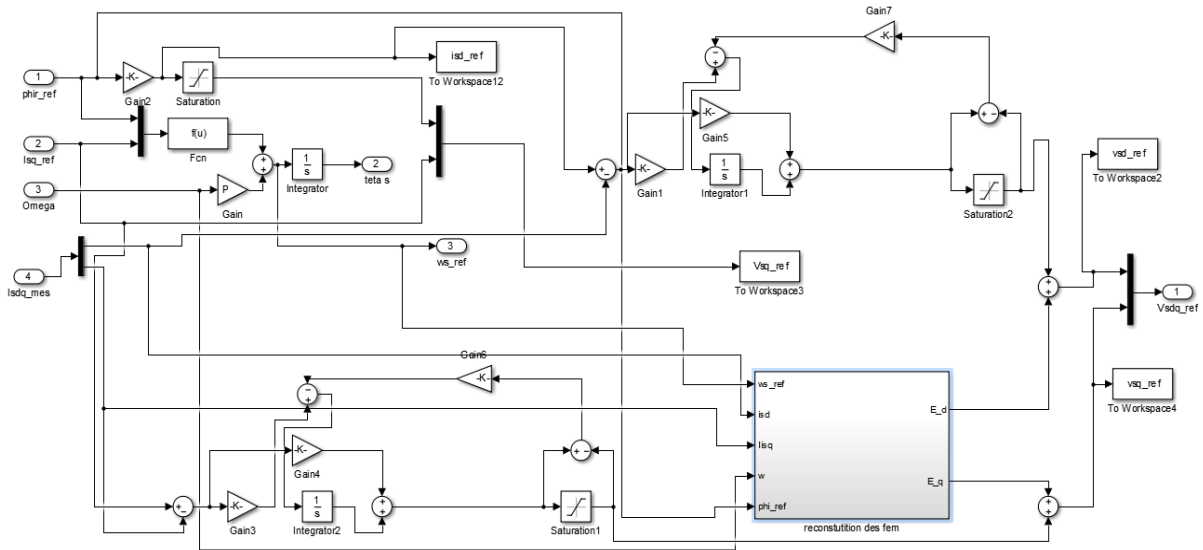


Figure (III.27): Schéma bloc de la commande vectorielle du moteur asynchrone.

III.6.1 Vitesse de la machine

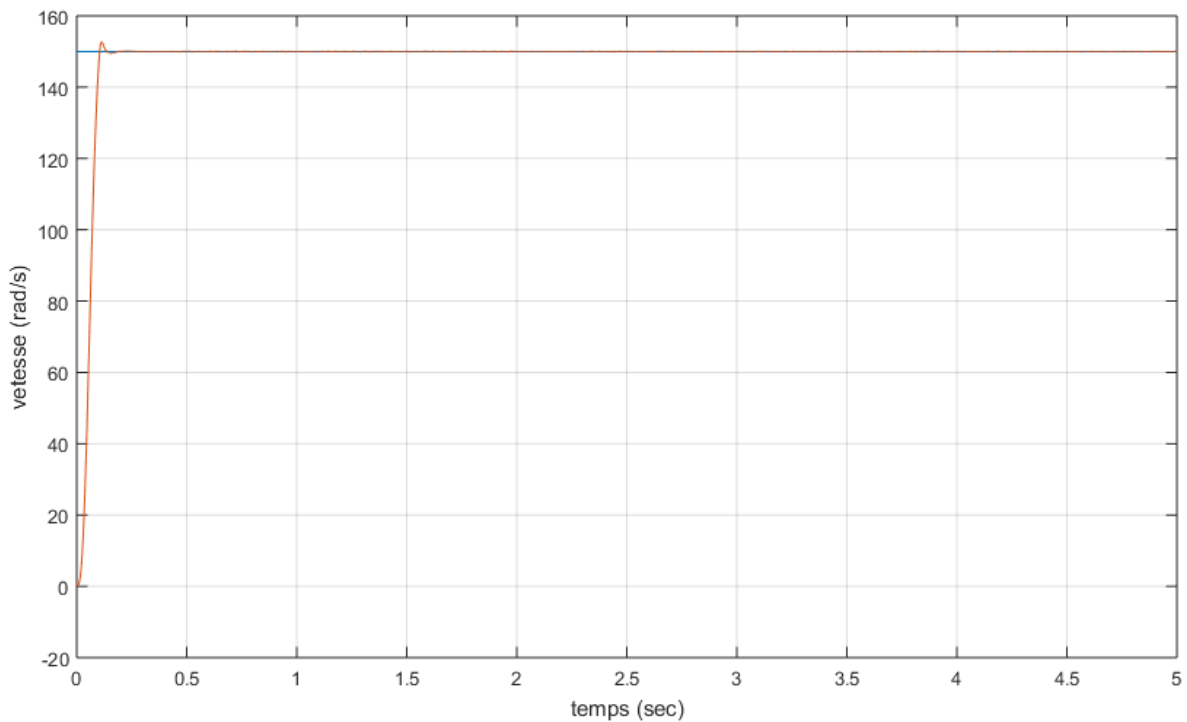


Figure (III.28): Vitesse de rotation de référence et vitesse mesurée du moteur asynchrone.

On remarque un léger dépassement de la vitesse de rotation Ω dans le régime transitoire mais elle suit parfaitement sa référence avec une bonne dynamique dans le régime permanent.

III.6.2 Couple électromagnétique, courant I_{sd} et I_{sq} du moteur asynchrone

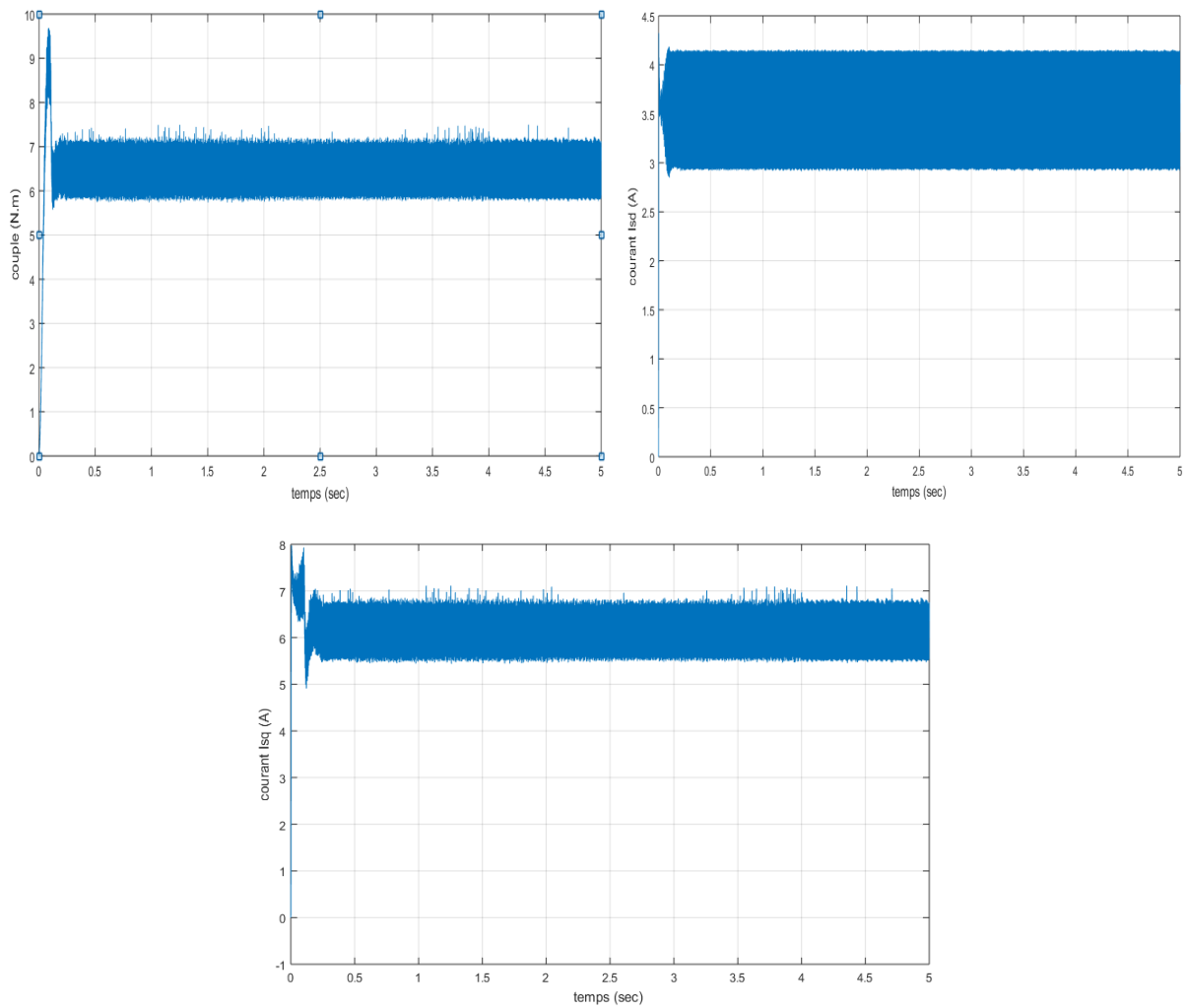


Figure (III.29) : Couple électromagnétique, courant I_{sq} et I_{sd} du moteur asynchrone

III.6.3 Résultat de simulation de la pompe centrifuge avec un moteur asynchrone

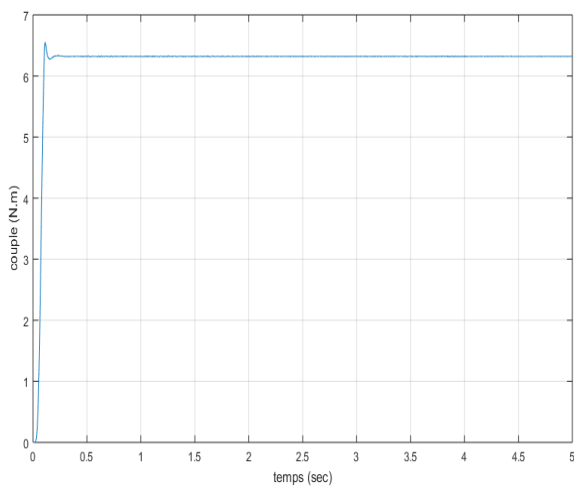


Figure (III.30): Couple résistant de la pompe.

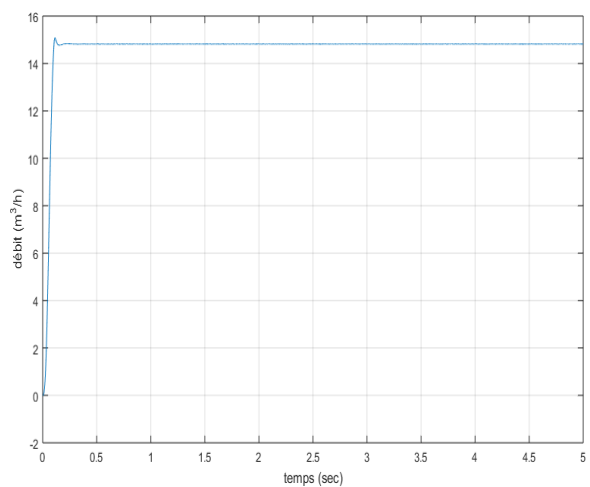


Figure (III.31): Débit de la pompe.

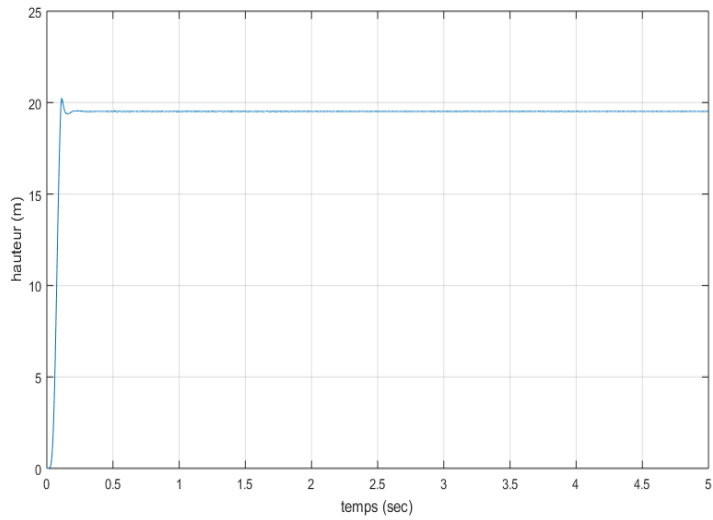


Figure (III.32): Hauteur du jet de la pompe.

III.6.4 Etude de la variation de la vitesse

Comme pour le moteur synchrone nous avons entrepris des variations sur la vitesse du moteur asynchrone en vue d'observer les différents changements.

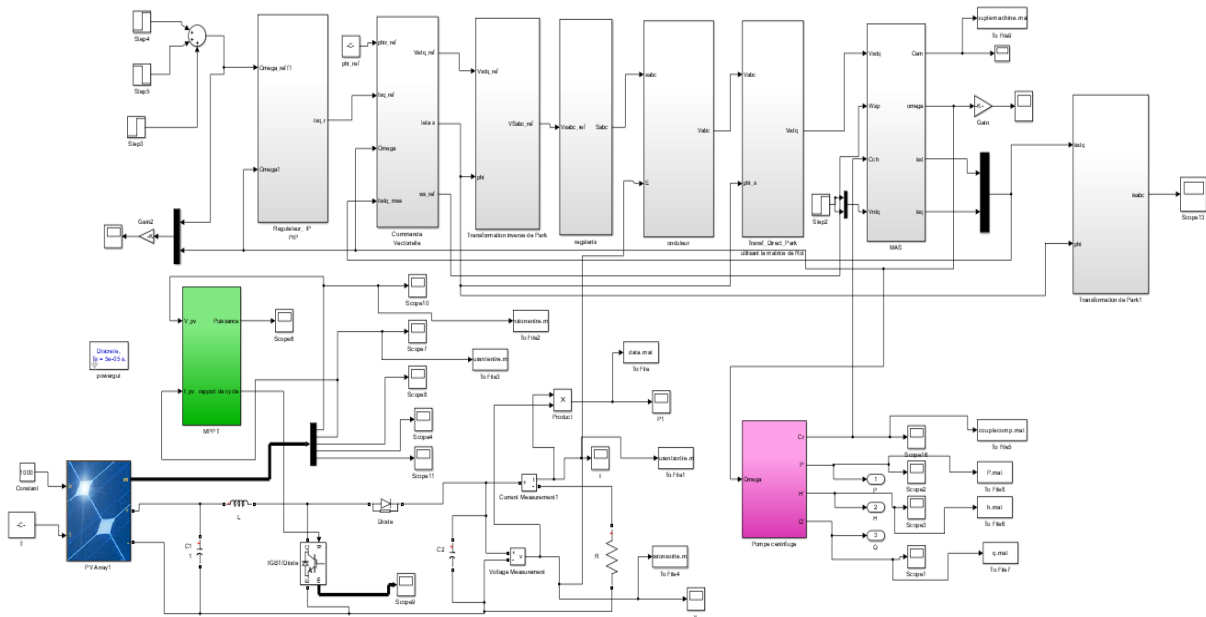


Figure (III.33) : schéma bloc du pompage PV avec une machine asynchrone

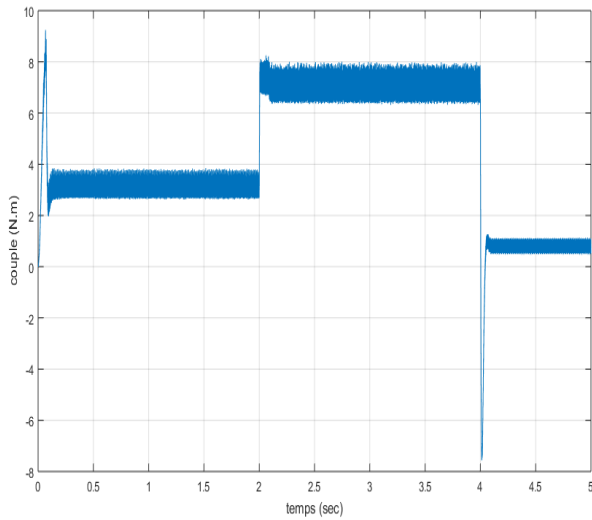


Figure (III.34) : Couple électromagnétique

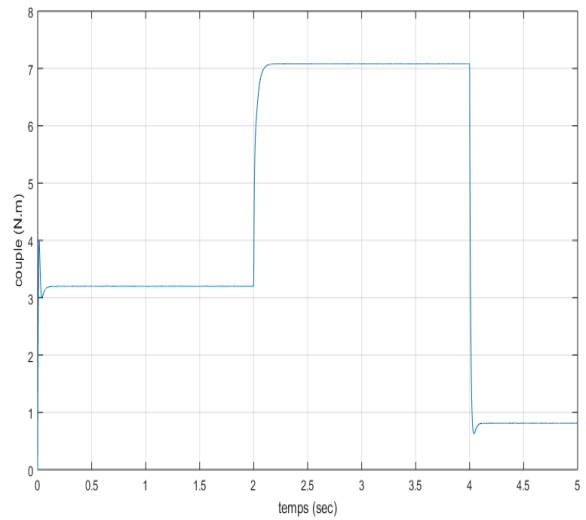


Figure (III.35) : couple résistant

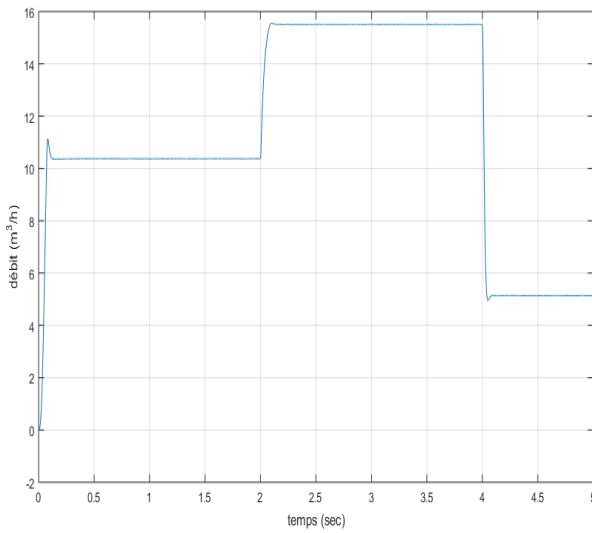


Figure (III.36) : Débit de la pompe

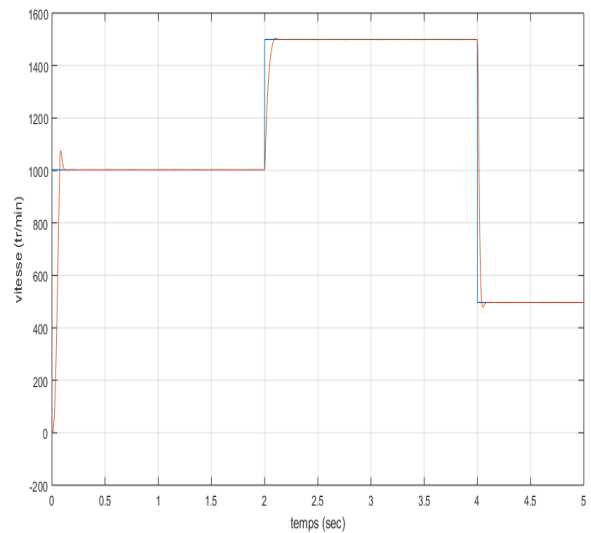


Figure (III.37) : vitesse du moteur

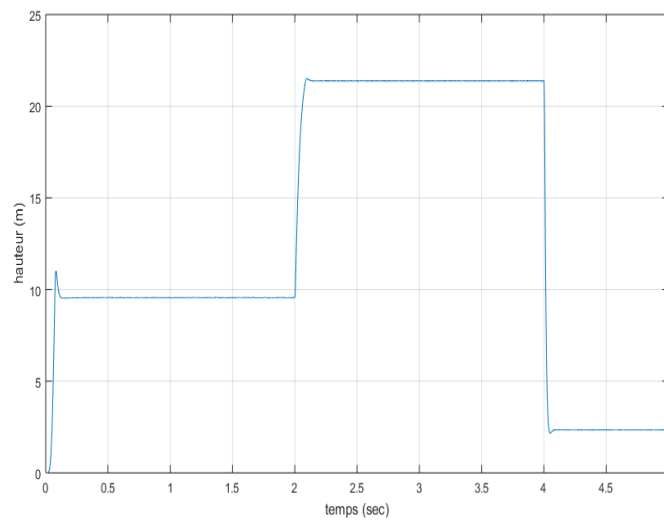


Figure (III.38) : Hauteur du jet de la pompe

III. 7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons simulé l'ensemble de la chaîne de pompage PV par le logiciel MATLAB/Simulink et l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) pour extraire la puissance maximale du GPV cette dernière est appelée perturbation et observation «P&O». La commande vectorielle est appliquée en vue d'améliorer les performances de nos machines utilisées. Un régulateur IP est utilisé pour réguler la vitesse de nos machines. Enfin on peut conclure d'après les résultats obtenus l'efficacité des commandes appliquées au système de pompage photovoltaïque.