

Université Paris
Saclay UFR Sciences
Département de
physique

Mention Electronique, énergie électrique, automatique

M1 E3A : Mobilité Électrique et Énergie Renouvelable

UE : 413 – Systèmes d'énergie autonomes

Compte rendu général

Rédigé par :

- ABAYAHIA Hamou Zinedine
- Gao Gehang

2023/2024

INTRODUCTION

Dans ce projet, nous allons modéliser l'ensemble d'un réseau électrique DC qui comporte un système éolien, une génératrice asynchrone, des batteries au lithium, des panneaux solaires photovoltaïques. Nous allons utiliser la représentation l'énergétique macroscopique afin de modéliser ce système multi sources. L'objectif principal est d'ajuster la production d'énergie électrique pour s'adapter au réseau, en maximisant le taux de production d'énergie. Nous analyserons également différents dispositifs de production d'énergie. En fonction de diverses situations, nous utiliserons le Maximum Power Point Tracking (MPPT) pour trouver le point de puissance maximale.

OBJECTIFS :

Au cours des 6 séances de TP, on effectuera la simulation des composants suivants :

- Machine asynchrone en mode génératrice avec transformation Park.
- Batterie lithium.
- Recharge photovoltaïque
- Algorithme MPPT pour PV.
- Modélisation d'un système éolien sous Simulink.
- La représentation énergétique macroscopique de l'ensembles de ces éléments liés à un bus DC.
- Dans le TP on doit faire représentation de modèle de chaque séance, étudier les hypothèses et le théorème utilisé, déterminer des grandeurs relatives avec notre modèles

TP1. MODELISATION DE MAS SOUS SIMULINK AVEC PARK

NOTIONS THEORIQUES

Afin de Construire notre modèle de la machine asynchrone dans le plan de Park, il nous faut poser les hypothèses suivantes :

- Nous avons un circuit-magnétique non saturé
- Les Pertes fers sont négligées
- Induction mutuelle dépend de la position seule

Loi de maille : déterminer relation de tension avec courant et le flux magnétique

Tension au stator :

$$\begin{array}{l} V_{s1} \quad R_s \quad 0 \quad 0 \quad i_{s1} \quad \varphi_{s1} \\ V_{s2} = 0 \quad R_s \quad 0 * i_{s2} + \frac{d}{dt} \varphi_{s2} \\ V_{s3} \quad 0 \quad 0 \quad R_s \quad i_{s3} \quad \varphi_{s3} \end{array} [1]$$

Tension au rotor :

$$\begin{array}{l} 0 \quad R_r \quad 0 \quad 0 \quad i_{r1} \quad \varphi_{r1} \\ 0 = 0 \quad R_r \quad 0 * i_{r2} + \frac{d}{dt} \varphi_{r2} \\ 0 \quad 0 \quad R_r \quad i_{r3} \quad \varphi_{r3} \end{array} [2]$$

Au stator :

l_s : inductance propre

m_s : inductance mutuelle entre les phases statoriques

m_1, m_2, m_3 : inductance mutuelles entre les bobinages rotoriques

$$m_1 = msr * \cos(\alpha)$$

$$m_2 = msr * \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3})$$

$$m_3 = msr * \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3})$$

$$\Phi_{s1} = l_s i_{s1} + m_s (i_{s2} + i_{s3}) + m_1 i_{R1} + m_2 i_{R2} + m_3 i_{R3}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \\ \Phi_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} + msr \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{R1} \\ i_{R2} \\ i_{R3} \end{bmatrix}$$

[3, 4, 5, 6]

TRANSFORMATION DE PARK :

Transformation de Park est utilisée afin de réduire notre système triphasé à un vecteur à deux composantes orthogonales constantes. Sans changer le modèle, On simplifie l'analyse.

Le vecteur par exemple tension, courant, champs etc. en triphasé ils tournent, c'est compliqué pour calculer, on utilise transformation de Clark pour réduire une dimension, mais le problème reste le 2 vecteur direct et quadrature sont tournant, donc l'avantage de Park, il fixe le vecteur direct et quadrature, simplifier le problème.

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} \quad [7]$$

V_{sd} : tension directe au stator

V_{sq} : tension quadrature

V_{s0} : tension composant homopolaire

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \left(\frac{d[\Phi_s]}{dt} \right)$$

$$[p][V_{sp}] = [R_s][P][I_{sp}] + \left(\frac{d[p][\Phi_{sp}]}{dt} \right)$$

multiply $[p]^{-1}$

$$[V_{sp}] = [R_s][I_{sp}] + [p]^{-1} \left(\frac{d[p]}{dt} \right) [\Phi_{sp}]$$

$$[p]^{-1} \left(\frac{d[p]}{dt} \right) [\Phi_{sp}] = \omega_s \begin{bmatrix} -\Phi_d \\ \Phi_d \\ 0 \end{bmatrix}$$

[8, 9, 10, 11, 12]

On obtient :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq}$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd}$$

$$V_{s0} = R_s i_{s0} + \frac{d\Phi_{s0}}{dt}$$

[13, 14, 15]

EQUATION DE FLUX :

Le flux au stator

$$\begin{aligned}
[\Phi_s] &= [l_s][I_s] + [m_{sr}][I_r] \\
[p(\theta_s)][\Phi_s] &= [l_s][p(\theta_s)][I_s] + [m_{sr}][p(\theta_r)][I_r] \\
&\text{multiply } [p(\theta_s)]^{-1} \\
[\Phi_s] &= [p(\theta_s)]^{-1}[l_s][p(\theta_s)][I_s] + [p(\theta_s)]^{-1}[m_{sr}][p(\theta_r)][I_r] \\
[p(\theta_s)]^{-1}[l_s][p(\theta_s)] &= \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s \end{bmatrix} \\
[p(\theta_s)]^{-1}[m_{sr}][p(\theta_r)] &= \frac{3}{2}msr \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&\quad [16, 17, 18, 19, 20]
\end{aligned}$$

On a le flux statorique

$$L_s = l_s - m_s$$

$$M_{sr} = \frac{3}{2}msr$$

$$\Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M_{sr} I_{rd}$$

$$\Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M_{sr} I_{rq}$$

$$\Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M_{sr} I_{sd}$$

$$\Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M_{sr} I_{sq} \quad [22, 23, 24, 25, 26, 27]$$

Puissance instantanée

$$\begin{aligned}
P_e &= V_{s1} i_{s1} + V_{s2} i_{s2} + V_{s3} i_{s3} = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\
P_e &= \left[R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sd} \right] I_{sd} + \left[R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sq} \right] I_{sq} \\
P_e &= \left[R_s I_{sd}^2 + R_s I_{sq}^2 \right] + \left[\frac{d\Phi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} I_{sq} + \omega_s (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd}) \right]
\end{aligned}$$

$$P_e = \Gamma_e \Omega_s$$

$$\Gamma_e = p(\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd})$$

[28, 29, 30, 31, 32]

On a déterminé toutes les équations de la machine asynchrone, on va les intégrer et enregistrer dans Simulink, faire la modélisation.

Donc on obtient :

$$\begin{aligned}
\Phi_{sd} &= \int V_{sd} + \omega_s \Phi_{sq} - R_s I_{sd} \\
\Phi_{sq} &= \int V_{sq} - \omega_s \Phi_{sd} - R_s I_{sq} \\
\Phi_{rd} &= \int \omega_r \Phi_{rq} - R_r I_{rd} \\
\Phi_{rq} &= \int -\omega_r \Phi_{rd} - R_r I_{rq} \\
I_{sd} &= \frac{M_{sr} \Phi_{rd} - L_r \Phi_{sd}}{(M_{sr}^2 - L_s L_r)} \\
I_{rd} &= \frac{M_{sr} \Phi_{sd} - L_s \Phi_{rd}}{(M_{sr}^2 - L_s L_r)} \\
I_{sd} &= \frac{M_{sr} \Phi_{rq} - L_r \Phi_{sq}}{(M_{sr}^2 - L_s L_r)} \\
I_{rq} &= \frac{M_{sr} \Phi_{sq} - L_s \Phi_{rq}}{(M_{sr}^2 - L_s L_r)} \\
&\quad [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]
\end{aligned}$$

SIMULATION

SIMULATION DE LA MACHINE

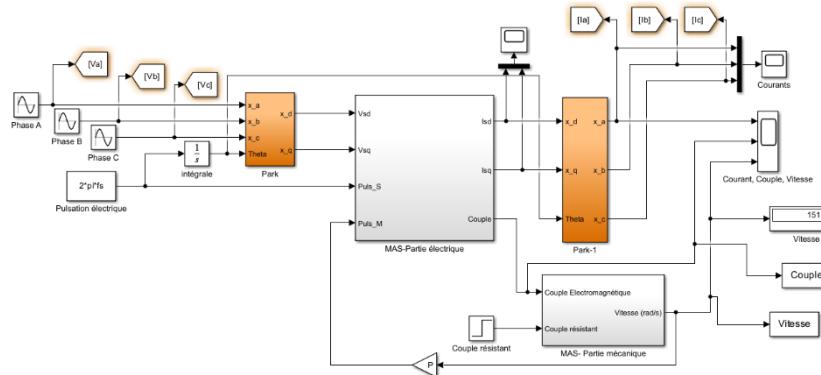


FIGURE 1 : SCHEMA COMPLET DE NOTRE MACHINE A CAGE

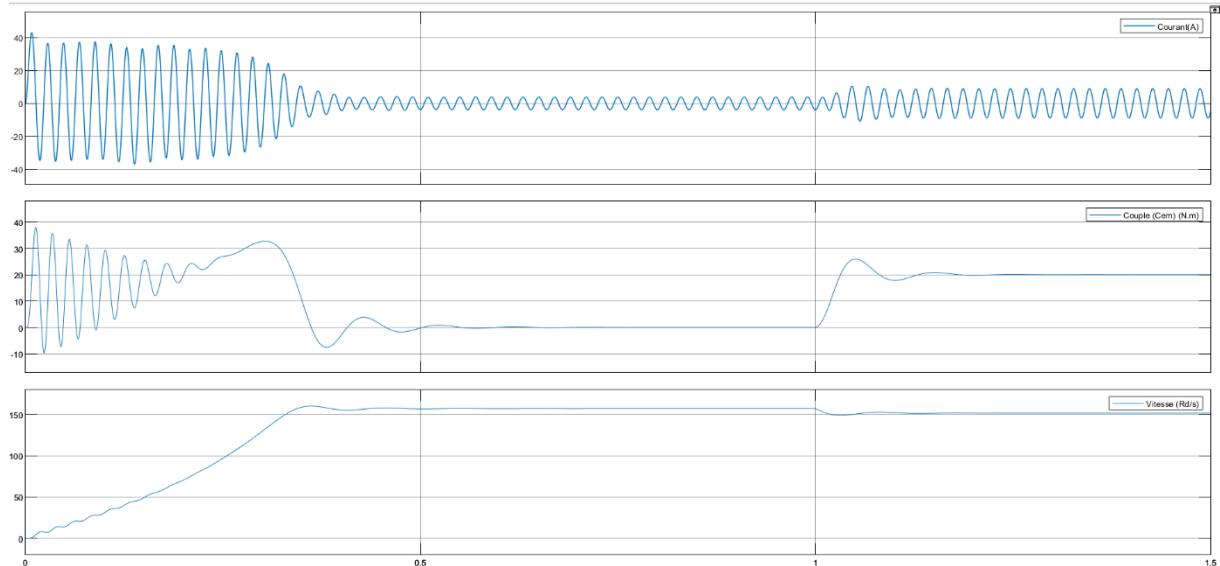


FIGURE 2 : ALLURES DE COURANT, COUPLE ET VITESSE (DE HAUT EN BAS)

Discussion

Après avoir compilé notre fichier slx, et en visualisant le scope « Courant, Couple, vitesse » on obtient trois allures : l'allure de courant, de couple et de vitesse respectivement.

On peut distinguer trois régions distinctes dans chaque allure

Région 1 : $t < 0.5\text{s}$: Régime transitoire.

Région 2 : $0.5\text{s} < t < 1\text{s}$: Régime permanent avant l'échelon du couple résistant.

Région 3 : $t > 1\text{s}$: Régime permanent après l'échelon du couple résistant.

Dans la région 1, on remarque un pic de courant qui est beaucoup plus élevé que le courant en régime permanent sans couple résistant (région 2). On remarque aussi une augmentation progressive de la vitesse et un couple. (en machine démarrage, la machine a besoin de beaucoup de courant pour créer le couple)

Dans la région 2, on remarque des courants statoriques moins importants, une vitesse constante (très faible glissement et donc vitesse proche de la vitesse du synchronisme) et un couple nul. On peut expliquer le fait que le couple moteur soit nul par le principe de l'inertie :

$$Cem - Cr = J \frac{d\Omega}{dt} = 0 \quad [41]$$

$$Cem = Cr \text{ et } Cr = 0 \quad [42]$$

Dans la région 3, on remarque une augmentation du couple moteur qui engendre une augmentation de la valeur des courants stators. Vu l'augmentation du couple résistant, le glissement est plus important et donc la vitesse de rotation diminue par rapport à la vitesse du synchronisme.

CARACTERISTIQUE COUPLE-VITESSE

On modifie notre modèle de telle sorte à pouvoir imposer la vitesse de rotation. Ensuite, on utilise un script Matlab afin de tracer la caractéristique couple-vitesse (voir le script dans l'Annexe [1]).

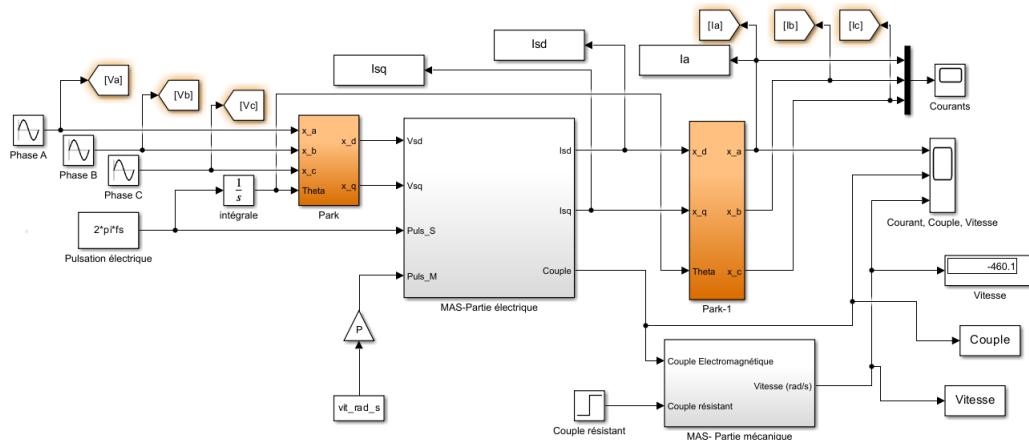


FIGURE 3 : MODELE DE MACHINE SYNCHRONE AVEC VITESSE MECANIQUE IMPOSEE AFIN DE DESSINER LA CARACTERISTIQUE COUPLE-VITESSE

Dans ce modèle la partie électrique on doit remplir nous même les blocs vides. Grâce aux équations précédentes, on remplit les blocs avec les équations du flux et du courant direct et quadratique dans notre modèle.

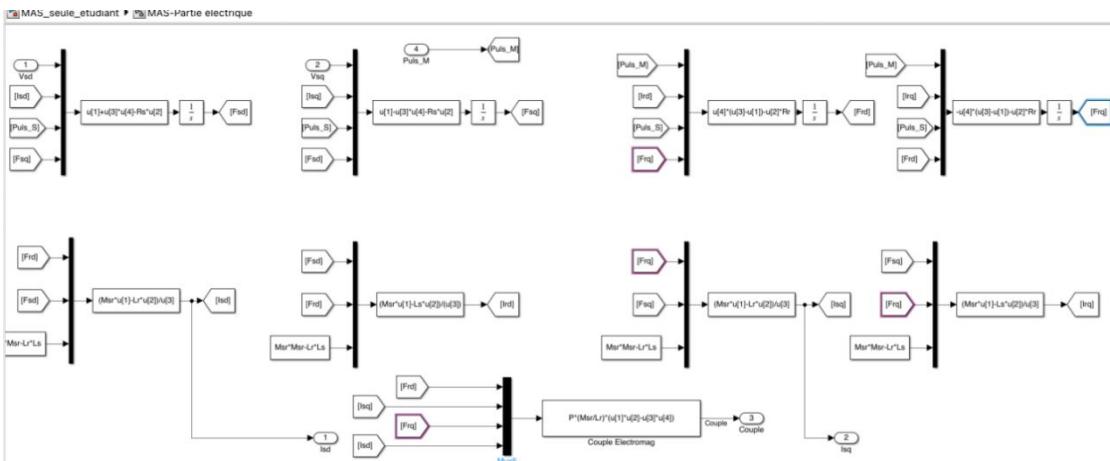


FIGURE 4 : INTERIEUR DU SOUS-SYSTEME DE LA MAS

Ensuite établir la partie de mécanique :

On a équation mécanique entre inertie et le couple :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f\Omega \quad [43]$$

développe cette équation en différentielle :

$$\frac{\Omega}{C} = \frac{1}{Js + f} \quad [44]$$

On obtient l'allure suivante :

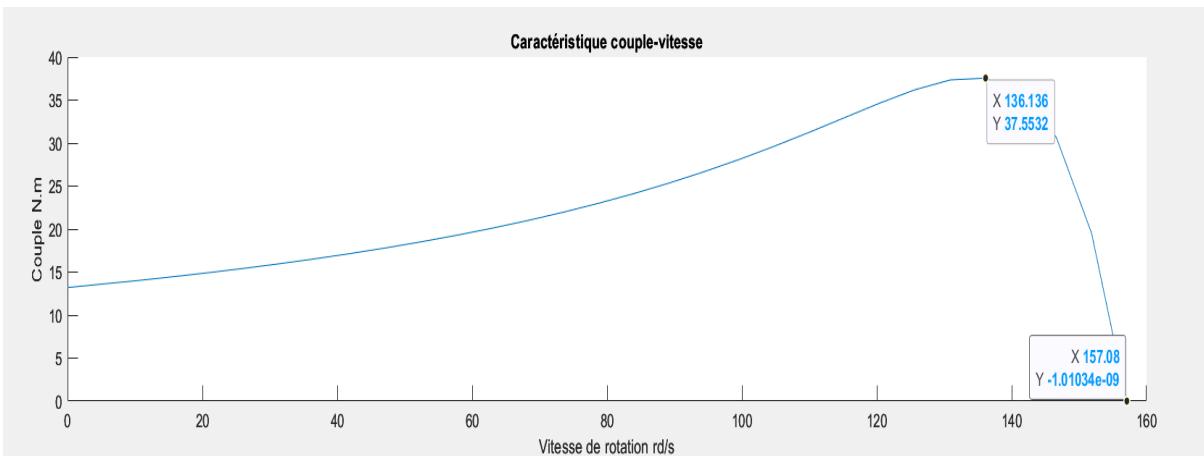


FIGURE 5 : CARACTERISTIQUE COUPLE-VITESSE

Discussion

On a bien obtenu la caractéristique d'une machine asynchrone avec un couple max de 37.5N.m. On calcule le glissement au couple max :

$$gcmax = \frac{\omega_s - p\Omega_{cmmax}}{\omega_s} = 0.1333 \quad [45]$$

CARACTERISTIQUE COURANT-VITESSE

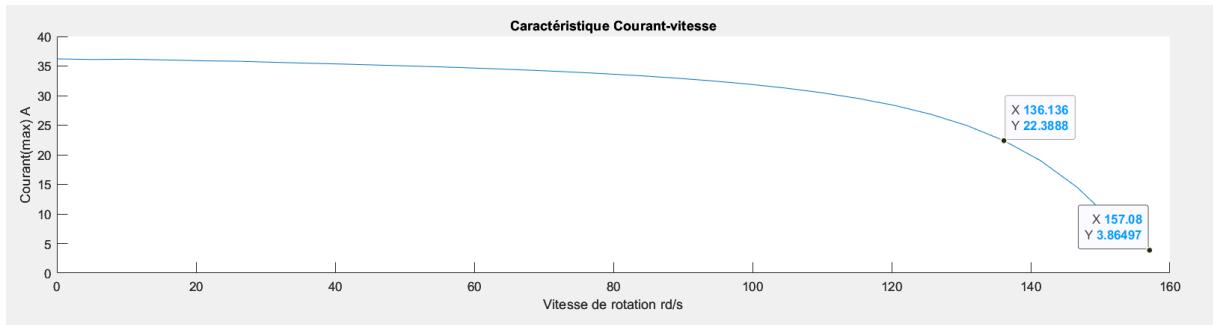


FIGURE 6 : CARACTERISTIQUE COURANT-VITESSE

Discussion

L'allure du courant montre que plus on se rapproche du synchronisme plus le courant stator est moins important et il représente le courant de pertes mécaniques au synchronisme (3.86A valeur max).

PIUSSANCE ABSORBEE ET PIUSSANCE REACTIVE

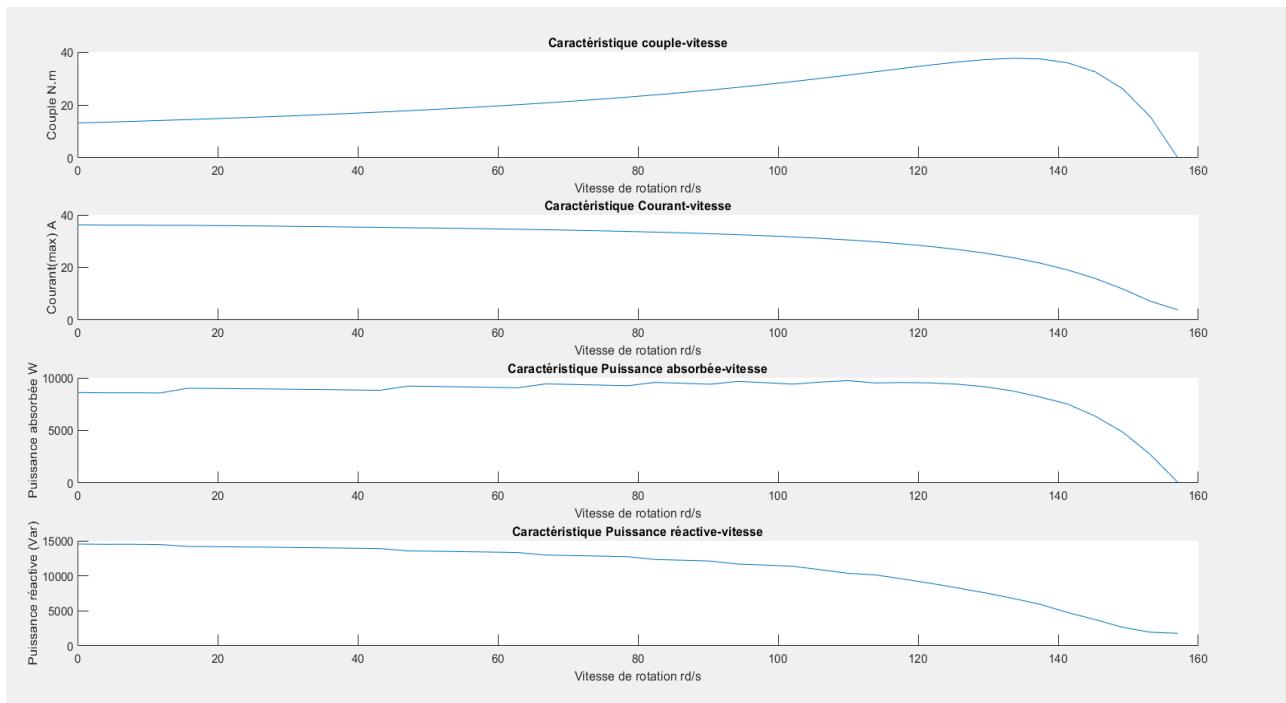


FIGURE 7 : PIUSSANCE ACTIVES ET REACTIVE EN FONCTION DE LA VITESSE.

Remarques

La puissance active et réactive diminuent à l'approche du synchronisme : cela est du au fait que le glissement diminue et donc on aura moins de courant qui circule dans le rotor.

Au synchronisme, la puissance absorbée n'est pas nulle est correspond en effet aux pertes mécaniques. Tandis que la puissance réactive correspond à l'inductance magnétisante.

ÉTUDE DU RENDEMENT

On commence par calculer le rendement au fonctionnement nominal :

Puissance utile **P_u = 3 kW**
 Tension **U=380 V**
 Courant absorbé **I = 6.3A**
 Facteur de puissance **cos φ = 0.84**
 Vitesse de rotation nominale **N = 1430 tr/mn**
 Couple nominal **C = 20Nm**
 Fréquence **f= 50 Hz**
 Nombre de paire de pôles de la machine **p=2**

FIGURE 8 : LISTE DE PARAMETRES DE LA MACHINE.

Depuis le support de cours de 413 avant les partiels.

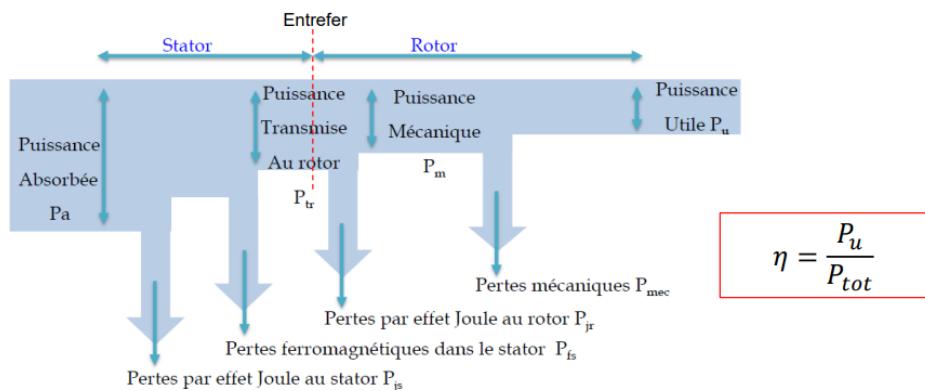


FIGURE 9 : ARBRE DE PUISSANCE MAS

Et donc

$$\eta \% = \frac{P_{mec}}{P_{abs}} \times 100 = \frac{Cem \times \Omega}{3 \times \frac{U}{\sqrt{3}} \times I \times \text{Cos}(\varphi)} \times 100 = 86\%$$

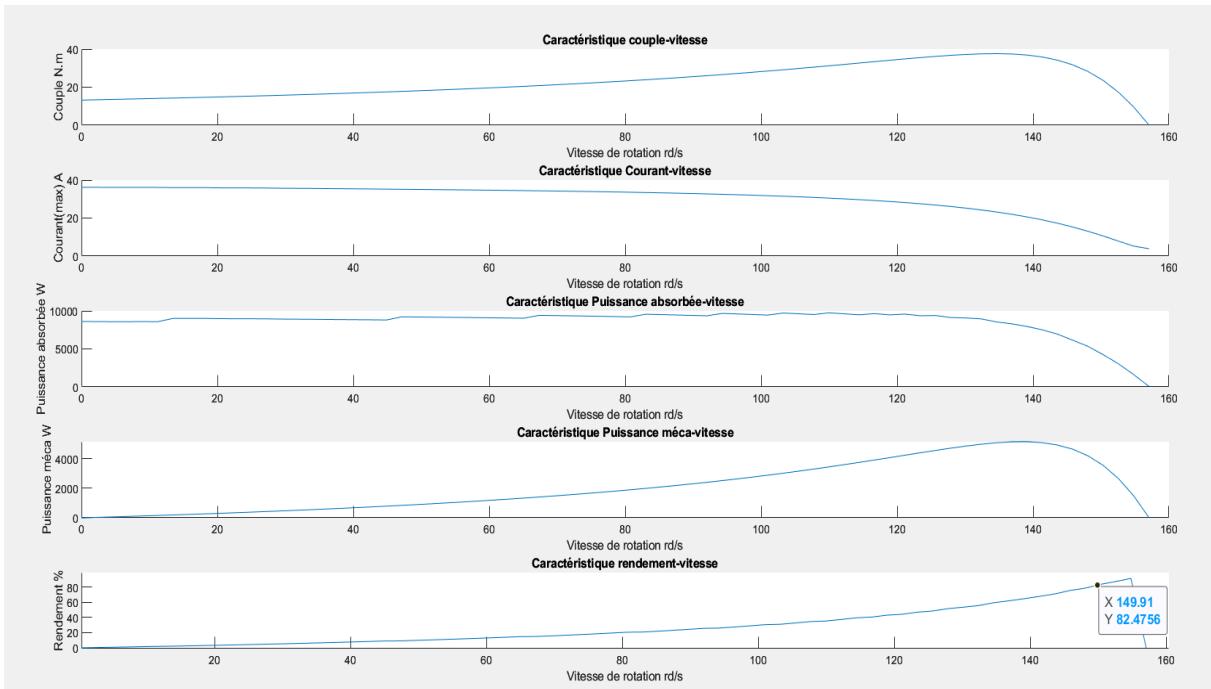


FIGURE 10 : ALLURES DU RENDEMENT ET LA PUISSANCE MECA EN FONCTION DE LA VITESSE

Remarques

- A la vitesse nominale de 1430 RPM (c'est-à-dire 149 rd/s) on trouve un rendement de 82%, et donc nous avons une erreur de 4.65% dans notre simulation par rapport à une mesure réelle de rendement (à travers une mesure réelle de puissance absorbée et de puissance mécanique).
- Le rendement est très faible en dehors de la région linéaire ce qui correspond aux notions étudiées dans le cours.

CONCLUSION

- La transformation de Park nous permet de représenter notre système triphasé par un vecteur de deux composantes constantes en quadrature ce qui simplifie la modélisation.
- Simulink est un outil robuste qui nous permet de modéliser les MAS à travers leurs équations physiques.

TP2. MODELISATION D'UNE BATTERIE DANS L'ENVIRONNEMENT

SIMULINK

PARTIE 1

INTRODUCTION DE BATTERIE

Les batteries sont des dispositifs de stockage d'énergie électrique qui convertissent l'énergie chimique en énergie électrique lorsqu'elles sont déchargées et vice versa lorsqu'elles sont rechargées. Elles sont largement utilisées dans de nombreux appareils électroniques, véhicules électriques, systèmes de stockage d'énergie renouvelable et bien d'autres applications.

Voici quelques généralités sur les batteries :

1. Composition chimique : Les batteries peuvent utiliser différentes compositions chimiques pour stocker et libérer de l'énergie. Les types les plus courants incluent les batteries au plomb-acide, les batteries lithium-ion, les batteries nickel-cadmium, les batteries nickel-métal hydrure et les batteries au sodium-ion, entre autres.
2. Anode et cathode : Une batterie est composée d'une anode (électrode négative), d'une cathode (électrode positive) et d'un électrolyte qui permet le transport des ions entre les deux électrodes lors de la charge et de la décharge.
3. Tension nominale : Chaque type de batterie a une tension nominale spécifique qui détermine sa capacité à fournir de l'énergie électrique. Par exemple, une batterie AA typique a une tension nominale d'environ 1,5 volt.
4. Capacité : La capacité d'une batterie est mesurée en ampères-heures (Ah) ou milliampères-heures (mAh) et représente la quantité d'énergie électrique qu'elle peut stocker. Une batterie avec une capacité plus élevée peut alimenter un appareil pendant une période plus longue.
5. Cycle de charge et décharge : Les batteries ont une durée de vie limitée déterminée par le nombre de cycles de charge et de décharge qu'elles peuvent subir avant de perdre leur capacité. Un cycle de charge et de décharge complet correspond à une charge complète suivie d'une décharge complète.
6. Chargement et déchargement : Les batteries doivent être chargées avec un courant adapté et dans des conditions appropriées pour assurer leur sécurité et prolonger leur durée de vie. Un déchargement excessif peut endommager la batterie et réduire sa capacité.
7. Entretien : Certaines batteries nécessitent un entretien régulier, comme les batteries au plomb-acide utilisées dans les voitures, qui doivent être vérifiées et rechargées périodiquement pour éviter la décharge profonde et prolonger leur durée de vie.
8. Recyclage : En raison de leur composition chimique, les batteries doivent être recyclées de manière appropriée pour éviter les risques environnementaux et récupérer les matériaux précieux qu'elles contiennent, tels que le lithium, le nickel et le cobalt.

Ces généralités offrent un aperçu des principaux aspects des batteries, mais il existe de nombreuses variations et nuances en fonction des types spécifiques de batteries et de leurs applications.

BATTERIE AU LITHIUM

La batterie lithium a marqué une révolution significative dans le domaine de la technologie des batteries. En comparaison avec les technologies précédentes telles que les batteries au plomb ou au nickel-cadmium, les batteries au lithium offrent une densité énergétique plus élevée, une durée de vie plus longue, une recharge plus rapide et un poids plus léger. Leur introduction a été particulièrement influente dans divers domaines tels que les téléphones portables, les ordinateurs portables, les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie renouvelable.[1]

COMPOSANTS D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION

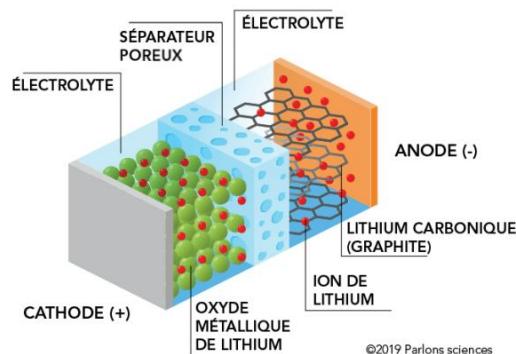


FIGURE 11 LA CONSTITUTION D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION

Les composants importants du lithium sont la cathode, l'anode, l'électrolyte et le séparateur.

La cathode et l'anode provoquent un mouvement directionnel des électrons pour produire un courant électrique. Elles sont reliées par un électrolyte et isolées électriquement par le séparateur.

Matériaux des composants :

Cathode : nickel NCA, NMC, phosphate de fer...

Anode : graphite, titanate de lithium, silicium...

Electrolyte : sel de lithium LiPF₆ dissous dans un mélange de carbonate d'éthylène, de carbonate de propylène ou de tétrahydrofurane...

Séparateur : élément microporeux en polymère

FONCTIONNEMENT :

La batterie lithium stocke l'énergie électrique en la convertissant en énergie chimique. À l'état initial, l'électrode négative perd des électrons lors d'une réaction d'oxydation. En état de décharge, l'électrode négative subit une réaction d'oxydation où le lithium est réduit en ions lithium, libérant des électrons, tandis que les ions Li⁺ se déplacent dans l'électrolyte. Les électrons circulent dans le circuit externe, contribuant à la réduction à l'électrode positive.

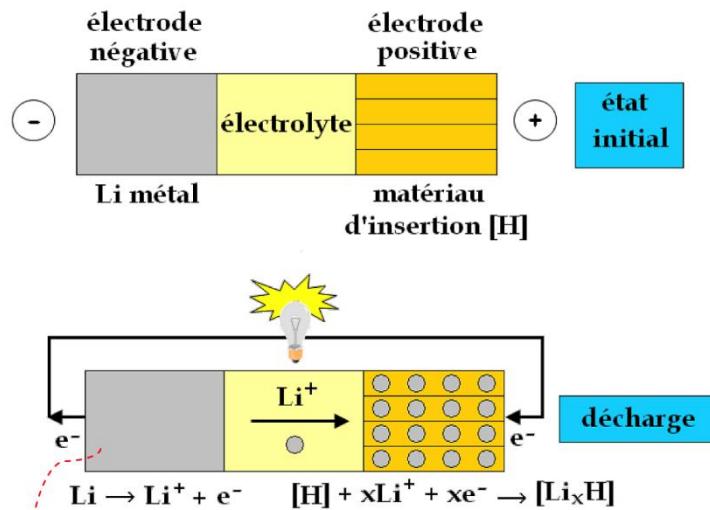


FIGURE 12 : REACTIONS CHIMIQUES DANS UNE BATTERIE LI-ION

La création d'un modèle de batterie pour la simulation est une méthode pratique et efficace pour optimiser et résoudre les problèmes. Bien que la fabrication de batteries soit principalement basée sur des processus chimiques, dans notre domaine, nous nous concentrons sur les aspects électriques. Pour simplifier et rendre plus visible le processus de simulation, nous remplaçons les caractéristiques réelles de la batterie par des composants électriques que nous connaissons. Par exemple, l'espace entre deux charges peut être représenté par un condensateur.

Composants utilisés : R₀ : résistance due aux électrodes Elle dépend de l'état de charge, de la température, du vieillissement, ...

R1//C1 : comportement dynamique de la batterie. C1 capacité due aux interfaces électrolyte/électrode R1 réactions électrochimiques aux électrodes.

SOC: State Of Charge (%)

OCV: Open Circuit Voltage

Pour plus de précisions :

$$\begin{aligned} R0 &= f(\text{SoC}, T^\circ, \text{signe}(I)) \\ R1 &= f(\text{SoC}, \text{signe}(I)) \\ C1 &= f(\text{SoC}) \end{aligned}$$

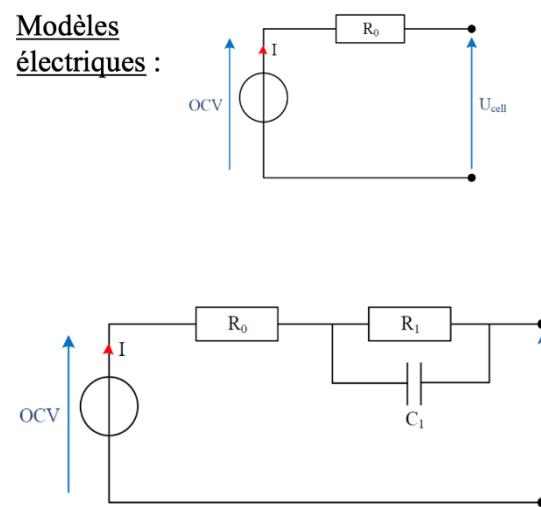


FIGURE 13 : SCHEMA ELECTRIQUE DU MODELE DE LA BATTERIE

Travail à effectuer : Construire et simuler un modèle de batterie lithium LiFePO4 (9.6 Ah, 3.2 Vnom)

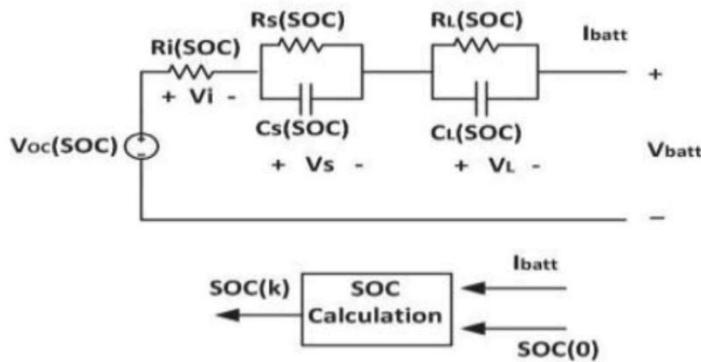


FIGURE 14 : SCHEMA ELECTRIQUE DU MODELE DE BATTERIE LITHIUM.

Source pour cette section: *Development of Single Cell Lithium Ion Battery Model Using Scilab/Xcos Sigit Arianto a), Rietje Y. Yunaningsih, Edi Tri Astuti, and Samsul Hafiz Lithium Battery Research Group Research Center for Physics - Indonesian Institute of Sciences Kawasan Puspitek, Serpong, Tangerang Selatan 15314.*

Pour calculer le SOC, on utilise l'équation [46], SOC₀ est le SOC initial, Ibatt est le courant de la batterie en Ampère, Eff est l'efficacité de la batterie (dans notre cas, 0,99), et Ccap est la capacité utilisable de la batterie (9,3 Ah, convertie en Ampères-secondes en multipliant par 3600). Le résultat est exprimé en pourcentage, donc on multiplie-le résultat d'intégration par 100. La photo illustre l'intérieur du bloc de calcul du SOC.[2]

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{E_f}{C_{cap} \text{ to }} \int \frac{I_{batt} \times 100}{3600} dt$$

[46]

V_i est calculé simplement comme le produit de I_{batt} et R_i tandis que R_i est calculé en utilisant la fonction polynomiale. V_i représente la chute de tension de la résistance interne continue R_i . L'équation en bas montre l'équation de calcul de V_i utiliser la matrice donnée(soc-ri)

$$V_i = I_{batt} R_i \quad [47]$$

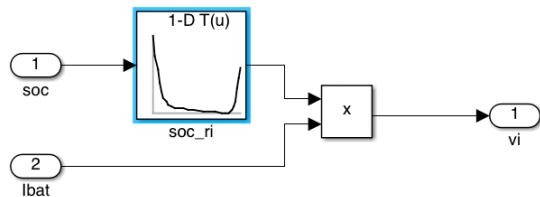


FIGURE 15 : SIMULINK REALISATION DE LA FONCTION QUI CALCULE VI

Les valeurs des résistances et des capacités (RC) sont nécessaires pour calculer les tensions de deux réseaux parallèles RC. Ces valeurs dépendent uniquement de l'état de charge (SOC) de la batterie et sont évaluées à l'aide d'une fonction polynomiale. Le calcul des valeurs RC est mis en œuvre dans une matrice donnée. Des blocs de calcul sont utilisés pour déterminer les tensions V_S et V_L en utilisant les valeurs RC calculées et les équations correspondantes. Enfin, la tension de la batterie est calculée à l'aide de l'équation et implémentée.

$$\begin{aligned}\dot{V}_S &= -\frac{V_S}{R_S C_S} + \frac{I_{batt}}{C_S} \\ \dot{V}_L &= -\frac{V_L}{R_L C_L} + \frac{I_{batt}}{C_L}\end{aligned}$$

$$V_{batt} = V_{OC} - I_{batt} R_i - V_S - V_L$$

[48, 49, 50]

Nous utilisions des « Lookup table » pour obtenir 'rs, cs, rl et cl'

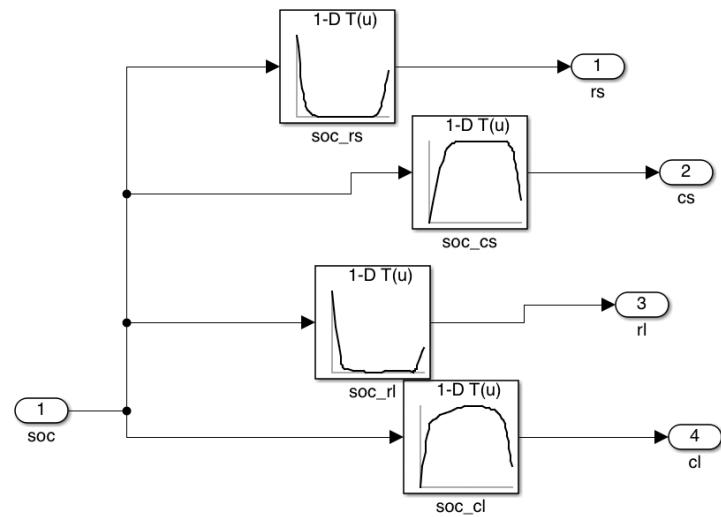


FIGURE 16:SIMULINK DE SOC ETABLIR 'RS, CS, RL ET CL'

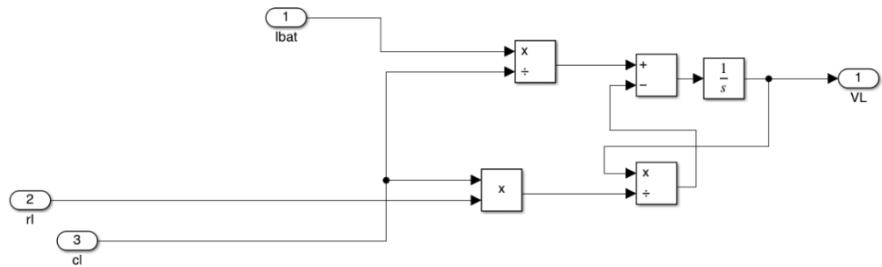


FIGURE 17 : SIMULINK DE SOC ETABLIR 'VL'

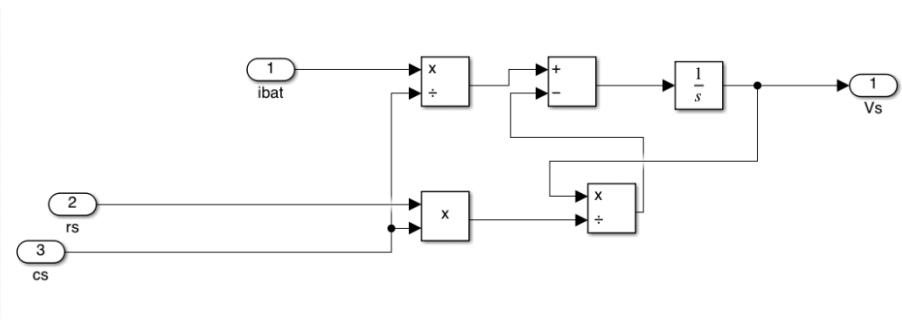


FIGURE 18 : SIMULINK DE SOC ETABLIR 'VS'

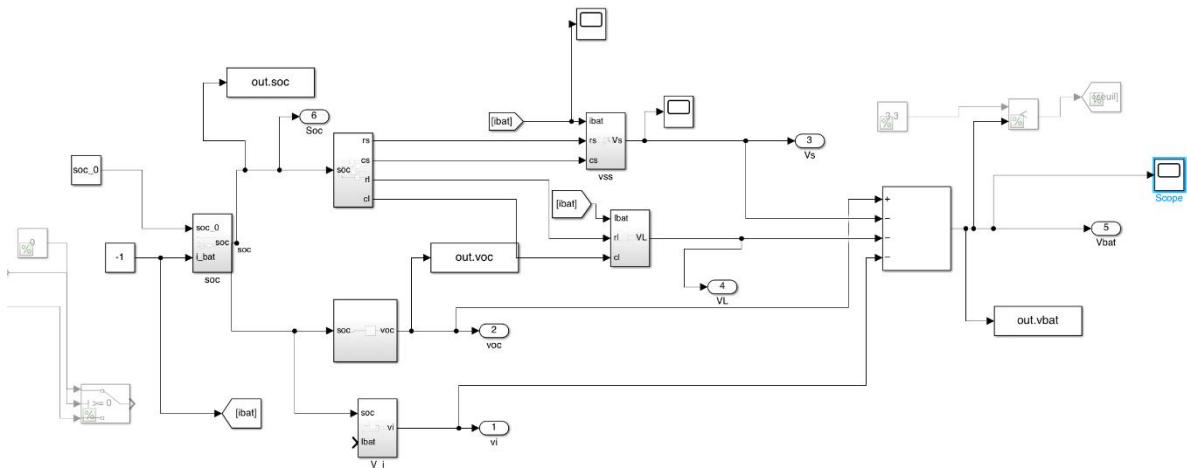


FIGURE 19 : MODELE DE SIMULATION DE BATTERIE LITHIUM SUR SIMULINK

On utilise ce modèle pour vérifier ce modèle est bien la caractéristique de
9.6 Ah, 3.2 Vnom.

On Trace la courbe de tension Vbat en fonction du Soc.

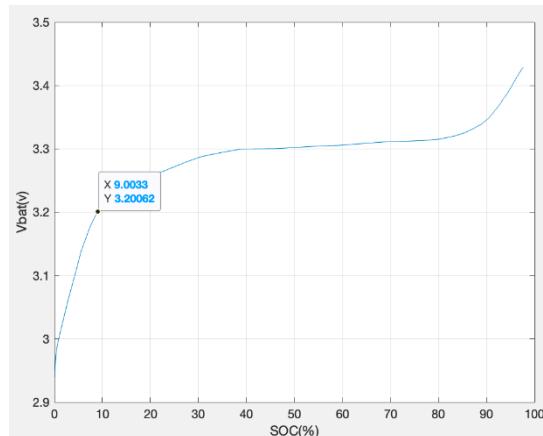


FIGURE 20 : LE COURBE DE TENSION VBAT CORRESPOND SOC

Protection de batterie

En réalité, on souhaite limiter la tension de charge et de décharge de la batterie afin de maximiser le nombre de cycles et sa durée de vie.

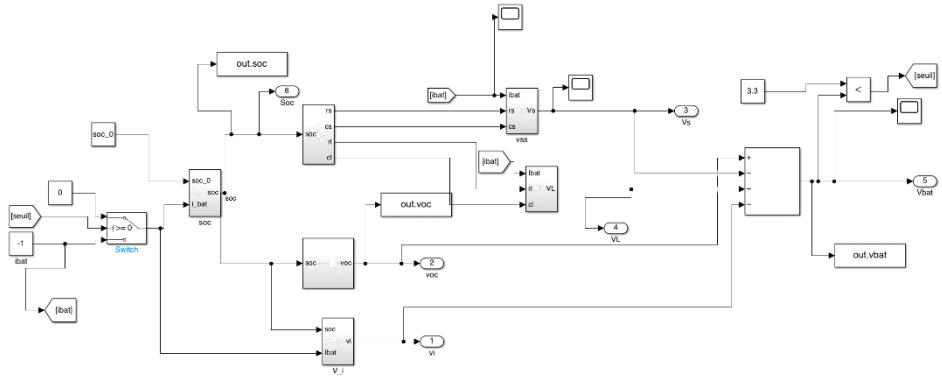


FIGURE 21: MODELE DE BATTERIE AVEC LIMITE DE TENSION

Pour réaliser limite de tension, on ajoute un comparateur, pour comparer la tension de batterie et la tension de référence est 3.3v, on ajoute un interrupteur ('switch') ouvert avec tension de sortie supérieur tension de référence 3.3v.

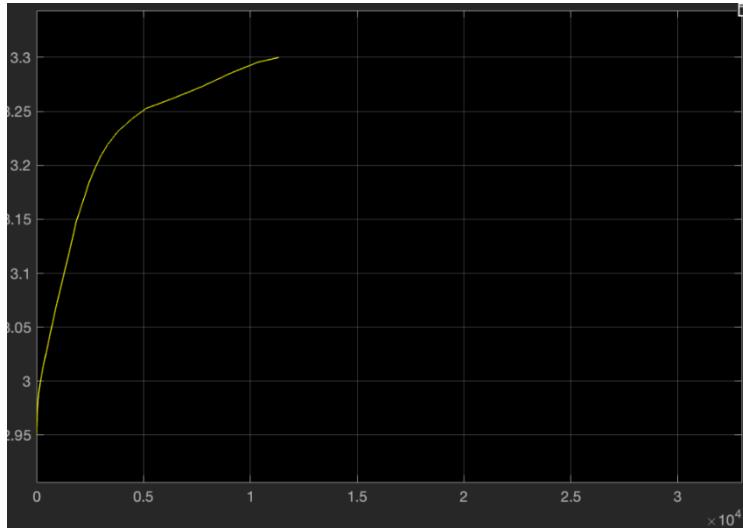


FIGURE 22 : FIGURE DE CHARGER BATTERIE AVEC TENSION DE LIMITE 3.3V SIMULER SUR SIMULINK.

Discussion:

Pour augmenter le nombre de cycles charges/décharges de notre batterie et afin de la protéger des sur-intensités et des sur-tensions et sous-tensions, on peut limiter le courant et la tension de la batterie.

COURBES DE DECHARGES :

En visualisant la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** on peut s'apercevoir du fait que la capacité qu'on peut extraire de la batterie diminue en fonction du courant de décharge (Peukert's Law).

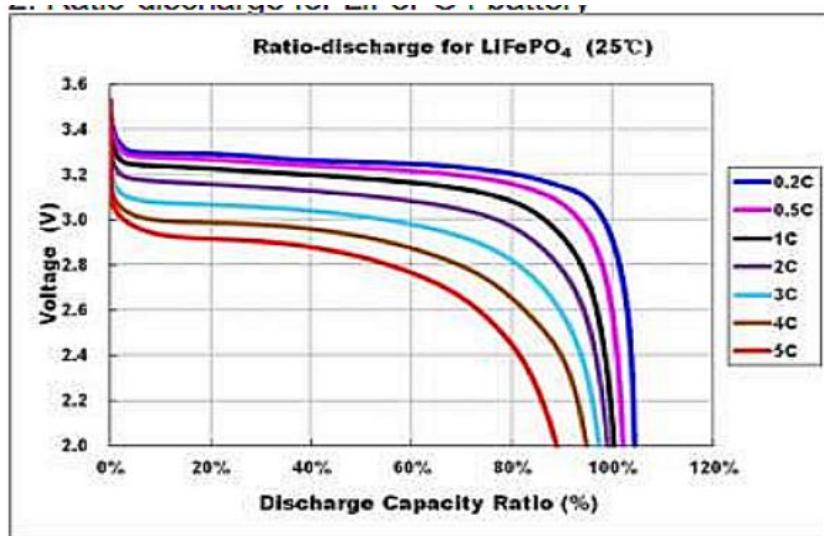


FIGURE 23 : COURBES DE DECHARGE

SOURCE : SUPPORT DE TP

On essaye de réaliser des tests de décharge pour plusieurs valeurs du courant afin de confirmer ce phénomène :

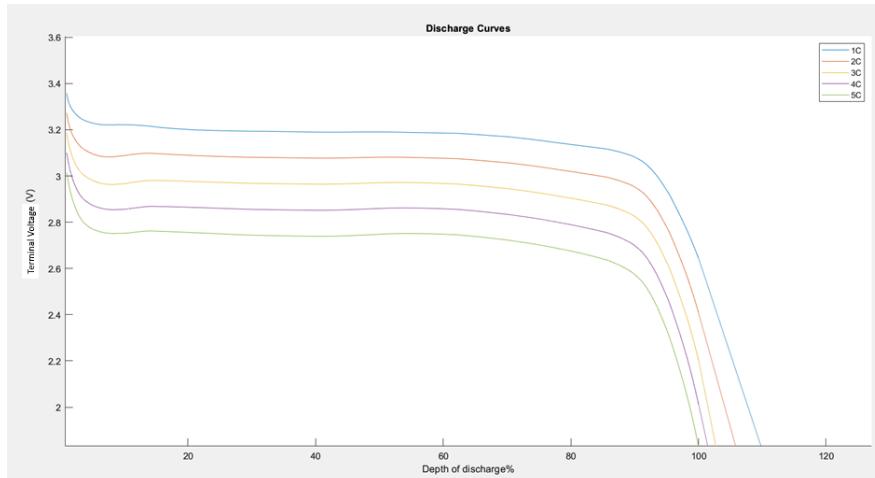


FIGURE 24 : COURBES DE DECHARGE OBTENUES

Remarques :

Effectivement, on voit que la capacité diminue quand le débit de décharge augmente.

TP3. PARTIE 3 MODELISATION D'UN SYSTEME PV ET SA COMMANDE ASSOCIEE SOUS SIMULINK

INTRODUCTION D'UN SYSTEME PV

La production d'énergie photovoltaïque est un processus qui utilise l'effet photoélectrique pour convertir la lumière du soleil en énergie électrique. Cette technologie est devenue une source importante d'énergie renouvelable.

Actuellement, nous utilisons des panneaux solaires photovoltaïques pour capturer l'énergie solaire et la transformer en énergie électrique en exploitant les propriétés des semi-conducteurs. Sa production d'énergie dépend de l'intensité de la lumière. En fonction des caractéristiques de tension et de courant, nous pouvons déterminer le rendement maximal. À ce jour, la technologie peut atteindre un rendement de conversion photoélectrique allant jusqu'à 19 %. Cependant, la production finale d'énergie dépend toujours de la durée d'ensoleillement et de l'irradiation solaire.

L'ensoleillement solaire se réfère au flux énergétique provenant du rayonnement solaire incident reçu par unité de surface, exprimé en watts par mètre carré (W/m^2). L'irradiation solaire, quant à elle, désigne la quantité d'énergie solaire horaire issue du rayonnement solaire incident reçue par unité de surface, exprimée en watt-heure par mètre carré (Wh/m^2).

Technologie de panneau solaire :

La lumière peut être envisagée comme un flux continu de particules sans masse appelées photons. Ces photons transportent de l'énergie. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à ce flux de photons, les électrons des atomes qui le composent peuvent absorber ces photons si leur énergie dépasse le seuil de la bande interdite. L'électron peut alors passer de la bande de valence à la bande de conduction, ce qui lui permet de se déplacer à l'intérieur du matériau. Ce phénomène, connu sous le nom d'effet photoélectrique, implique que la lumière peut arracher l'électron de l'atome auquel il était lié, créant ainsi ce qu'on appelle un "trou" dans le matériau, c'est-à-dire un atome qui manque d'un électron.

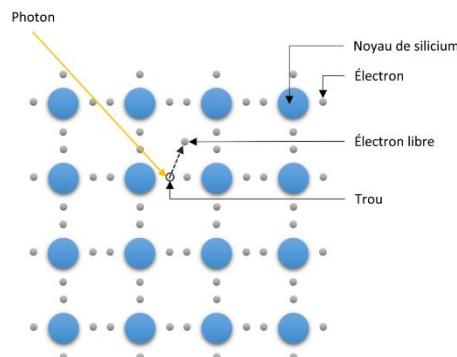


FIGURE 25 : EFFET PHOTOELECTRIQUE SUR UN SEMICONDUCTEUR CONSTITUÉ D'UN CRISTAL DE SILICIUM.

<https://www.revolution-energetique.com/dossiers/comment-fonctionne-un-panneau-photovoltaïque/>

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur la séparation des paires d'électrons et de trous afin d'empêcher leur recomposition. Cela se réalise en dirigeant les électrons vers une face du semi-conducteur et les trous vers l'autre face de manière symétrique. Pour obtenir ce mouvement opposé des électrons et des trous, une méthode couramment utilisée consiste à combiner deux plaques de semi-conducteurs dopés avec des éléments chimiques différents. (PN jonction)

Lors de la formation de la jonction et dans une région appelée Zone de Charge d'Espace (ZCE), située immédiatement à proximité de l'interface, les électrons libres de la couche N sont attirés par les trous présents dans la couche P. Ils traversent alors la jonction, se diffusent dans la couche P et se recombinent avec les trous. Ce processus crée un déficit d'électrons dans la couche N, la rendant ainsi

positivement chargée, tandis que l'excès d'électrons dans la couche P, près de la jonction, lui confère une charge négative. Cette répartition des charges génère un champ électrique permanent orienté de la couche N vers la couche P.

Les panneaux solaires photovoltaïques sont exposés aux rayons du soleil. En raison du champ électrique présent dans la jonction PN, lorsque les électrons capturent des photons et créent des paires électrons-trous libres, les électrons ont tendance à migrer vers la couche N où ils s'accumulent, tandis que les trous migrent préférentiellement vers la couche P où ils s'accumulent également. Ces accumulations de charges génèrent une tension entre les deux côtés de la jonction PN.

Lorsque les deux côtés de la jonction sont connectés à un circuit fermé, les électrons accumulés dans la couche N peuvent circuler à travers le circuit, se recombinant avec les trous accumulés de l'autre côté de la couche P, créant ainsi un courant électrique. Ce courant électrique circulant dans le circuit fermé est utilisable pour alimenter des appareils électriques. Sous l'irradiation continue du soleil, de nouvelles paires électron-trou sont constamment générées, assurant ainsi une production continue d'énergie électrique utilisable.

Transmission du réseau électrique photovoltaïque

Pour connecter un panneau solaire aux réseaux électriques en courant continu, il est nécessaire de respecter la condition selon laquelle la tension doit être identique et la puissance doit être supérieure pour obtenir un meilleur rendement.

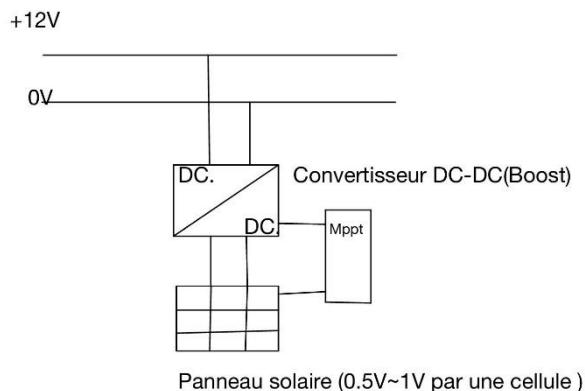


FIGURE 26 : TRANSMISSION PV ELECTRIQUE

MODELISATION DE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Une cellule photovoltaïque est construite comme une source de courant en parallèle avec une diode (qui représente le phénomène de polarisation) et une résistance (qui représente le courant de fuite au niveau de la jonction PN). Ces trois éléments sont connectés en série avec une résistance de contact et de connexion

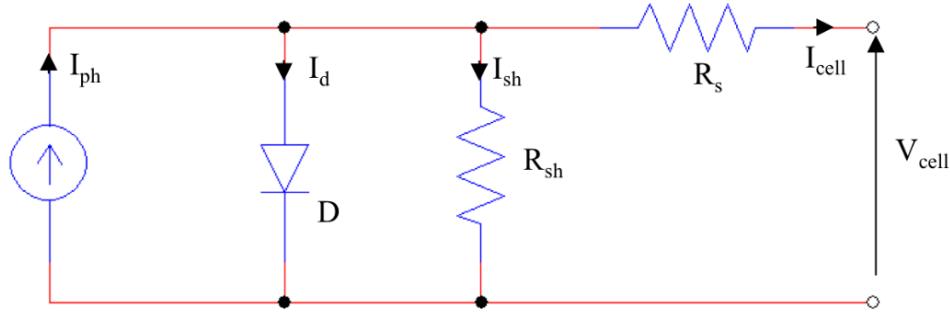


FIGURE 27 : SCHEMA ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE

Équation établir :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{A \cdot V_t} \right) - 1 \right] \text{ avec } V_t = \frac{k \cdot T_f}{q} \quad [51]$$

$$I_{sat} = I_{rs} \left[\frac{T_f}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_f} \right) \right] \text{ avec } I_{ref} = \frac{I_{cc}}{\exp \left(\frac{V_{cell_0}}{A \cdot V_t} \right) - 1} \quad [52]$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_r} [I_{cc} + k_t (T_f - T_{ref})] \quad [53]$$

Dans ces équations, on a :

- A : facteur d'idéalité de la jonction (A=2 pour une diode idéale)
- k : constante de Boltzmann ($1,380658 \cdot 10^{-23}$ J/ $^{\circ}$ K),
- Eg : énergie nécessaire pour changer de bande 1.12 ev (silicium)
- G : Irradiance en W/m²
- Gr : Irradiance de référence (1000 W/ m²)
- kt : coefficient de température en A/ $^{\circ}$ K
- Icc : courant de court circuit à 25°C et à 1000 W/m²
- Isat : courant de saturation de la diode
- q : charge de l'électron (-1,6022.10^-19 C)
- Tf : température de la cellule en $^{\circ}$ K
- Tref : température de référence (298.15 $^{\circ}$ K)
- Vcell_0 : tension à vide de la cellule
- Vt : potentiel thermodynamique,

MODELISATION D'UN MODULE PHOTOVOLTAIQUE

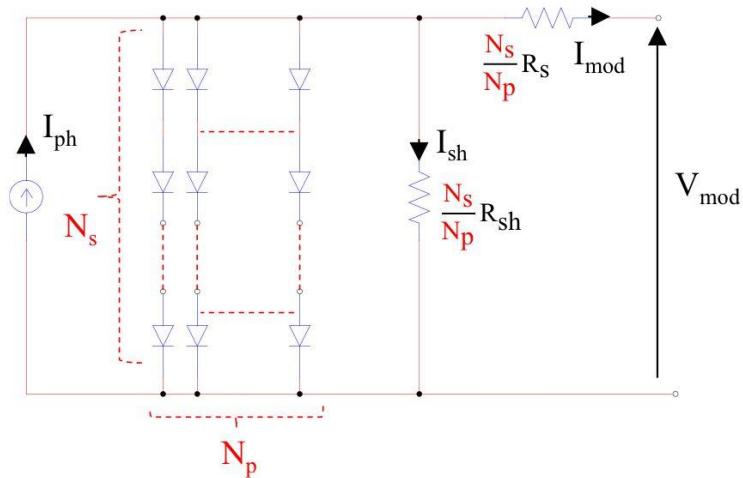


FIGURE 28 : SCHEMA ELECTRIQUE DE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

$$I_d = N_p \cdot I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V_{mod} + I_{mod} \frac{N_s}{N_p} R_s}{A \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad [54]$$

$$I_{sat} = I_{rs} \left[\frac{T_f}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_f} \right) \right] \text{ avec } I_{ref} = \frac{\frac{I_{cc}}{N_p}}{\exp\left(\frac{V_{cell-0}}{A \cdot V_t}\right) - 1} \quad [55]$$

$$V_{cell-0} = \frac{V_{mod-0}}{N_s}$$

CARACTERISTIQUE IV

CARACTERISTIQUES IV EN VARIANT L'IRRADIATION

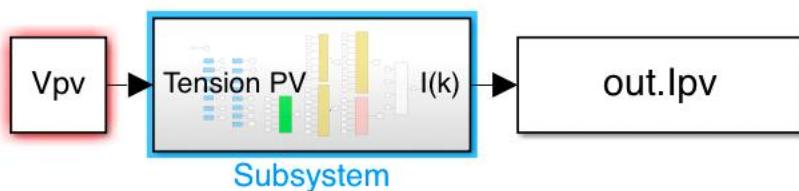


FIGURE 29 : SCHEMA PRINCIPAL DE PV.

On impose une valeur de tension afin d'obtenir le courant PV de ce modèle. Notre sortie est donc un courant.

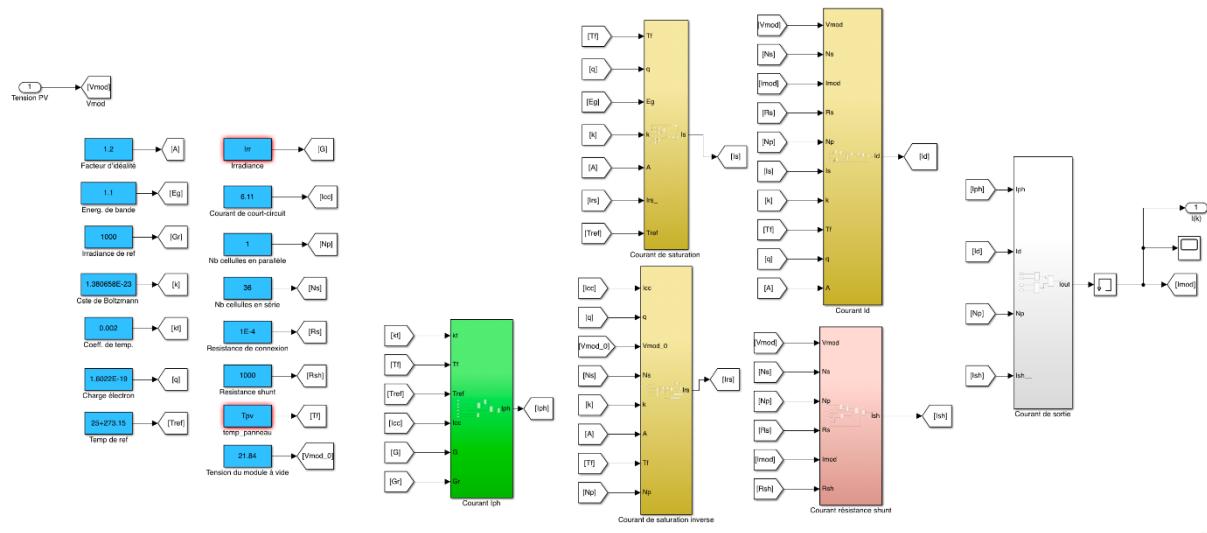


FIGURE 30 : SOUS-SYSTEME PV.

L'irradiance et la tension du panneaux sont définis comme variables.

D'abord on fixe la température et on fait varier l'irradiance

Voir Annexe[2]

- Tension de panneau de 0 à 21.84, un pas est 0.5
- Irradiation de 0 à 1000 W/m², un pas 200 W/m²
- Température fixé 273.15+25K.

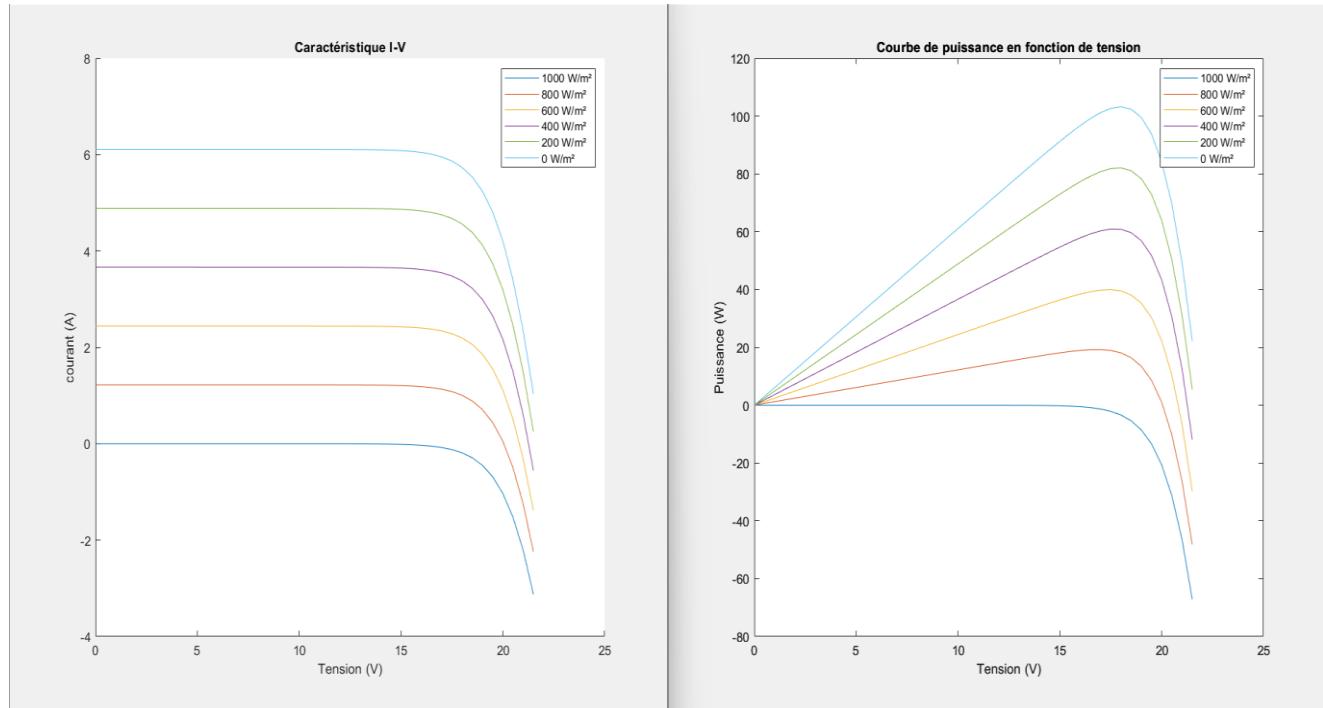


FIGURE 31 : LES COURBES CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION (A GAUCHE) ET PUISSANCE-TENSION (A DROITE). (VARIATION DE L'IRRADIATION)

Discussion :

- Une augmentation de l'irradiation entraîne une augmentation du courant en court-circuit et de la puissance maximale transformée.
- Au point de fonctionnement tension-courant optimal, la puissance électrique est maximale.

VARIATION DE TEMPERATURE

Dans cette partie on fixe l'irradiance et on fait varier la température :

Voir Annexe [3]

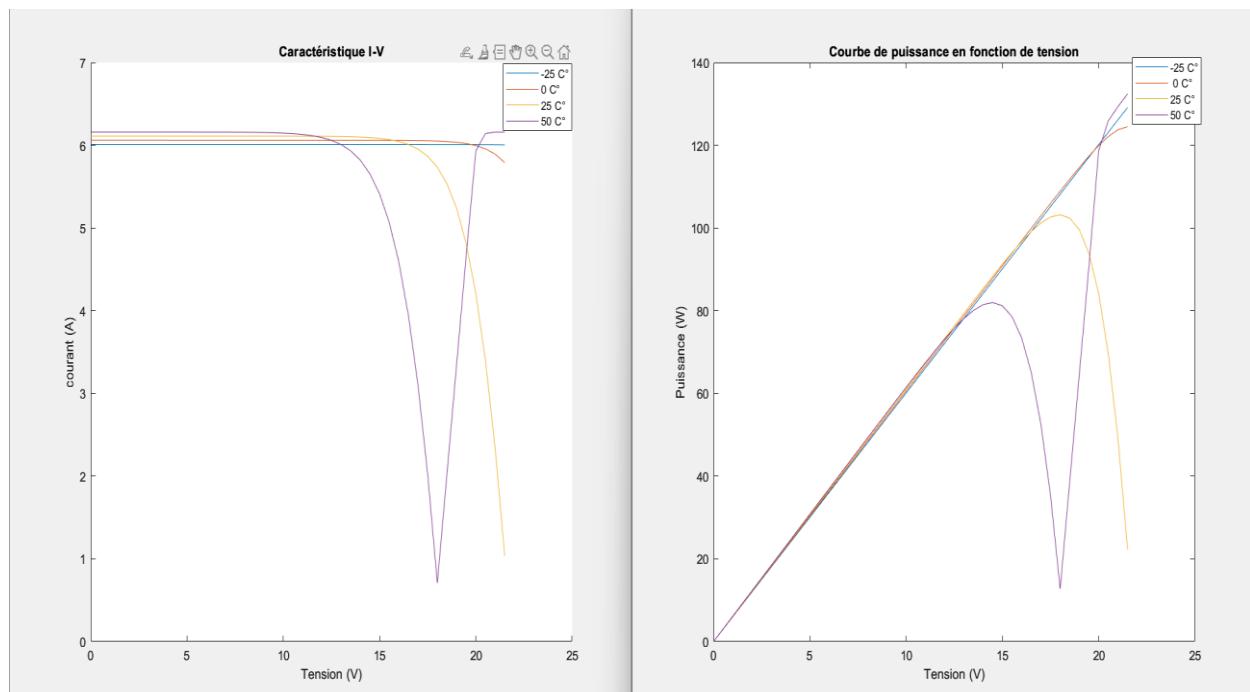


FIGURE 32 : LES COURBES CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION (A GAUCHE) ET PUISSEANCE-TENSION (A DROITE). (VARIATION DE TEMPERATURE)

Discussion :

- Lorsqu'on augmente la température la tension en circuit ouvert du panneau diminue et donc sa puissance diminue également.
- On constate l'inverse quand on diminue la température. Cela nous permet de conclure que les panneaux ont une meilleure capacité de production dans les climats froids.
- Le rebondissement de la courbe est dû à une erreur dans le modèle.

MPPT< MAXIMUM POWER POINT TRACKING>

Dans les systèmes de panneaux solaires, le contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour suivre le point de puissance maximale des panneaux solaires, afin de garantir une conversion maximale de l'énergie solaire en électricité. Le contrôleur MPPT ajuste dynamiquement le point de fonctionnement des panneaux solaires pour maintenir leur puissance de sortie à son niveau optimal, c'est-à-dire le point de puissance maximale. En surveillant en continu la sortie des panneaux solaires et en ajustant la tension et le courant du système, le contrôleur MPPT assure une efficacité de conversion

énergétique optimale, permettant ainsi de maximiser la collecte d'énergie des panneaux solaires dans différentes conditions d'éclairage et de température.

REALISATION DE MODELE DE MPPT

Le principe de fonctionnement du contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) consiste à suivre le point de puissance maximale des panneaux solaires:

1. **Surveillance de la sortie des panneaux solaires** : Le contrôleur MPPT surveille la tension et le courant de sortie des panneaux solaires pour évaluer la puissance de sortie actuelle.
2. **Calcul de la puissance** : En mesurant la tension et le courant, le contrôleur calcule la puissance de sortie des panneaux solaires.
3. **Recherche du point de puissance maximale** : Le contrôleur ajuste dynamiquement le point de fonctionnement des panneaux solaires en fonction de la puissance de sortie en temps réel, afin de trouver le point de puissance maximale (MPP), même dans des conditions de luminosité et de température variables, et ainsi obtenir une efficacité maximale de conversion énergétique.
4. **Ajustement du point de fonctionnement** : Une fois le point de puissance maximale trouvé, le contrôleur MPPT ajuste la tension et le courant du système pour que les panneaux solaires fonctionnent de manière optimale, maximisant ainsi la collecte d'énergie.
5. **Surveillance et ajustement continus** : Le contrôleur MPPT surveille en permanence la sortie des panneaux solaires et ajuste dynamiquement le point de fonctionnement en fonction des conditions en temps réel, garantissant ainsi une efficacité de conversion optimale dans des conditions de luminosité et de température variables.

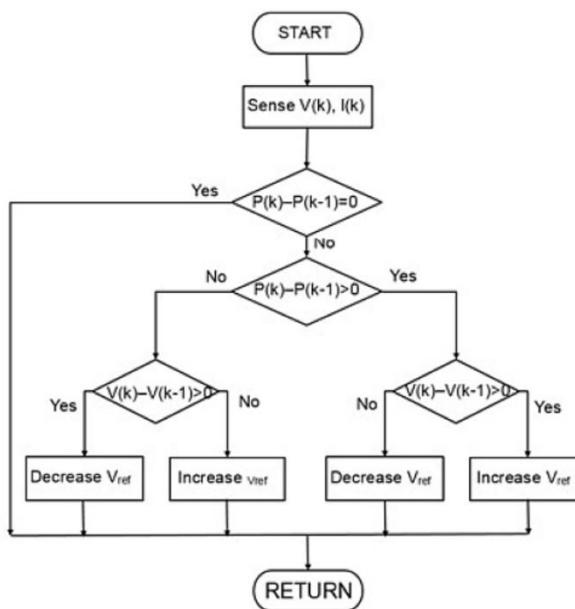


FIGURE 33 : DIAGRAMME DE LA METHODE MPPT "PERTURBATION ET OBSERVATION"

Explication de l'algorithme « Perturbation et Observation »

- 1, Première mesure de la puissance, de la tension et du courant.
- 2, des données dans la mémoire de l'ordinateur.
- 3, Deuxième mesure de la puissance, de la tension et du courant.
- 4, Comparaison des deux puissances (voir Annexe [4])

Si la deuxième puissance est maximale, aucune modification n'est nécessaire.

Sinon, détermination de laquelle est la plus grande :

Si la nouvelle puissance est supérieure, comparaison des tensions :

Si la nouvelle tension est supérieure à l'ancienne, augmentation de la tension.

Sinon, diminution de la tension.

Si la nouvelle puissance est inférieure, on compare les tensions :

Si la nouvelle tension est supérieure à l'ancienne, on diminue de la tension.

Sinon, augmentation de la tension.

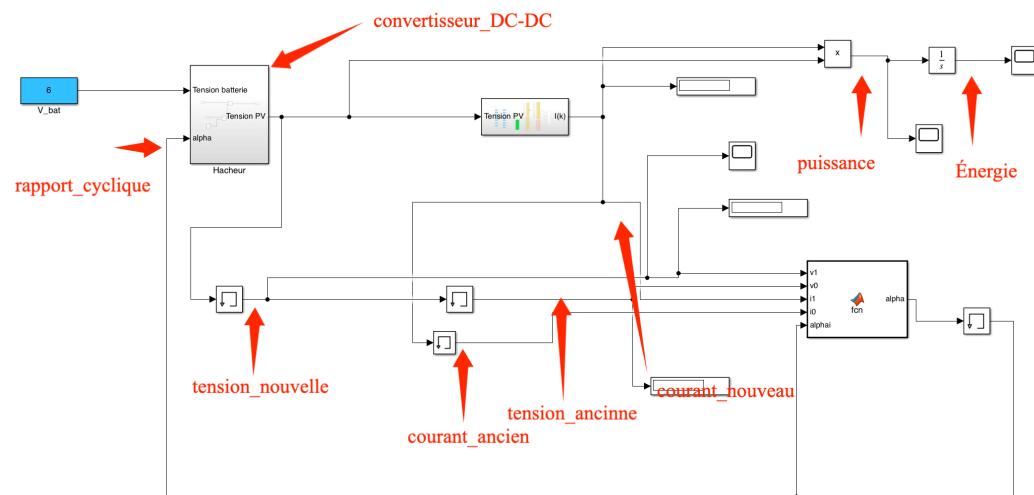


FIGURE 34 : SCHEMA SIMULINK DE LA MPPT.

MODELISATION CONVERTISSEUR BOOST

Ensuite le rapport cyclique envoie au convertisseur DC-DC pour asservir la tension, on souhaite le convertisseur boost, équation tension entrée-sortie :

$$V_s = \frac{1}{(1 - \alpha)}$$

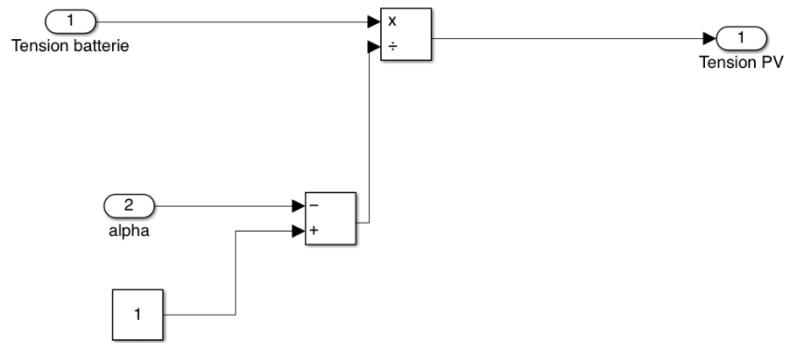


FIGURE 35 : MODELE DE CONVERTISSEUR BOOST

PIUSSANCE OBTENUE

1ère cas température et irradiation sont constante

Irradiation : 1000W/m^2

Température : $273.15+25^\circ\text{K}$

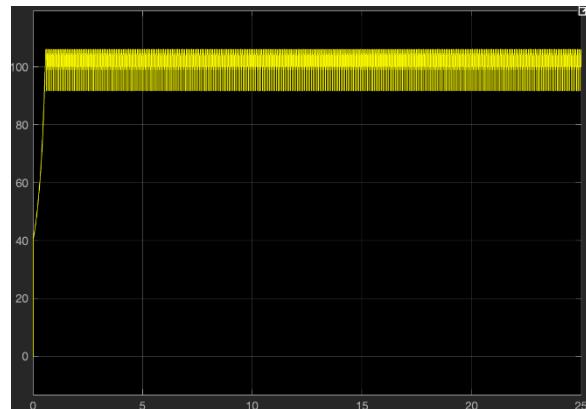


FIGURE 36 : ALLURE DE LA PUISSANCE VISUALISEE SUR SIMULINK (W) (IRRADIATION FIXE)

2ème cas irradiation varié pour vérifier le MPPT peut bien trouve la puissance maximum

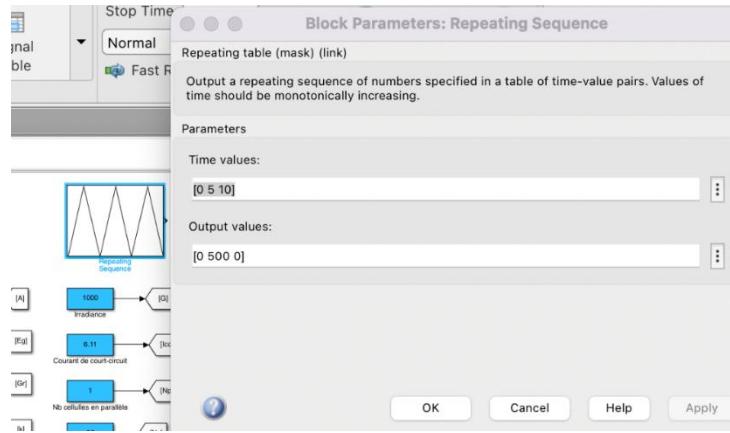


FIGURE 37 : IRRADIATION ON CHOISIT UN SIGNAL TRIANGLE 0 A 500 W/M².

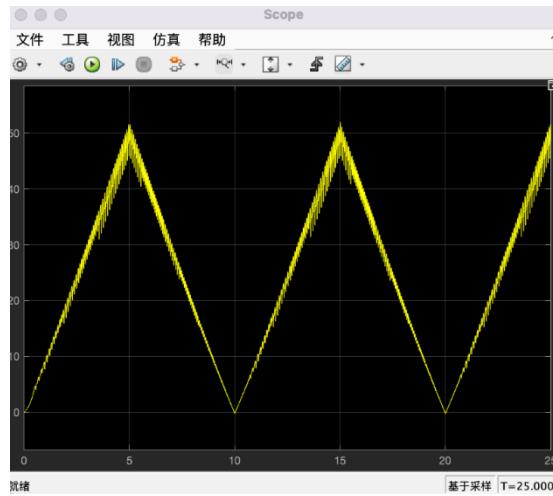


FIGURE 38 : PUSSANCE AVEC UN SIGNAL TRIANGULAIRE POUR L'IRRADIATION.

Discussion :

- Avec ces deux mesures, on peut conclure que notre modèle de MPPT peut bien trouver le point de fonctionnement qui nous garantit une puissance maximale

TP4. REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE, MODELISATION SOURCE EOLIEN ET OPTIMISATION DE SYSTEME

INTRODUCTION DE REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE REM

La <représentation énergétique macroscopique> est une méthode formalisme graphique pour la représentation synthétique de systèmes énergétiques multidisciplinaires. La REM conduit à une description fonctionnelle d'un système énergétique. Elle respecte la causalité intégrale du système étudié, ce qui permet d'en déduire de façon systématique une structure de commande.[3]

PRINCIPE DE REACTION ET INTERACTION <REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE>

Le principe des réactions et des interactions peut être examiné du point de vue de la représentation énergétique macroscopique. En physique, l'énergie est une grandeur fondamentale qui caractérise la capacité d'un système à effectuer un travail. Lorsque des objets interagissent les uns avec les autres, des échanges d'énergie peuvent avoir lieu, et le principe des réactions et des interactions est souvent associé à ces échanges énergétiques.

Par exemple, prenons le cas de la batterie au lithium : lorsqu'elle se décharge, l'énergie chimique se transforme en énergie électrique. L'action se manifeste par la tension appliquée à la charge, et le courant circulant dans le circuit constitue la réaction.

PRINCIPE DE CAUSALITE

Le principe de causalité, également connu sous le nom de principe de cause à effet, est un concept fondamental en philosophie, en science et en logique. Il stipule qu'il existe une relation de cause à effet entre les événements, ce qui signifie que tout événement est la conséquence d'une cause antérieure et qu'il produit à son tour des effets futurs.

PRESENTATION DE SYNOPTIQUE DE LA REPRESENTATION ÉNERGETIQUE MACROSCOPIQUE

Dans notre TP, on utilise des symboles pour signifier des relations entre différent grandeurs physique (électrique).

La conversion électrique sans accumulation fait référence à la transformation de l'énergie électrique d'une forme à une autre sans stockage significatif d'énergie électrique entre les différentes étapes du processus. Il existe plusieurs exemples de telles conversions dans divers domaines d'application.

L'élément avec accumulation dans le contexte de la conversion électrique, est un référence à des dispositifs ou des systèmes qui stockent de l'énergie électrique pour une utilisation ultérieure.

Le bloc de contrôle sans correcteur est un dispositif utilisé dans les systèmes de contrôle pour surveiller et ajuster les processus sans l'utilisation d'un correcteur ou d'un régulateur automatique.

Le bloc de contrôle avec correcteur est une composante clé d'un système de contrôle qui comprend à la fois un mécanisme de contrôle et un correcteur.

La source d'énergie est un moyen par lequel de l'énergie est fournie ou extraite pour être utilisée dans divers processus ou applications.

L'inversion d'un couplage avec une entrée de répartition est un concept souvent utilisé dans les systèmes de contrôle et les réseaux de communication. Cela fait référence à une technique où une entrée de répartition est utilisée pour diviser un signal d'entrée en plusieurs voies, chacune étant ensuite inversée individuellement avant d'être combinée à nouveau.

L'élément de couplage est un composant ou un dispositif utilisé pour connecter deux systèmes ou composants de manière à permettre un échange ou une interaction entre eux.

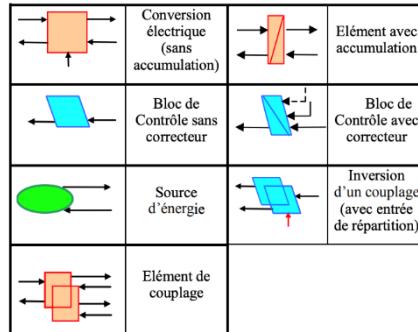


FIGURE 39 : SYNOPTIQUE DE LA REPRESENTATION ÉNERGETIQUE MACROSCOPIQUE

INTRODUCTION LA CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui utilise la force du vent pour générer de l'électricité. Les éoliennes, équipées de grandes pales, captent l'énergie cinétique du vent et la convertissent en électricité. Une éolienne est composée de plusieurs éléments clés, notamment les pales, le rotor, le générateur et le système de contrôle. Lorsque le vent fait tourner les pales, le rotor est entraîné à tourner, ce qui active le générateur pour produire de l'électricité. Dans un système de la machine asynchronisé (MAS), le générateur est équipé de rotor bobiné. Lorsque le rotor tourne sous l'effet du vent, il fait également tourner les bobinages à l'intérieur du générateur, induisant ainsi un courant électrique. Le courant électrique produit par le générateur est converti en courant alternatif (AC avec l'onduleur) compatible avec le réseau électrique. Il est ensuite acheminé vers des transformateurs qui ajustent la tension électrique selon les besoins du réseau.

Puissance du vent :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot v^3 \cdot Cp(\lambda) \quad [57]$$

Coefficient de puissance dépend de la vitesse spécifique :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4(\beta - 5) \right) e^{-\frac{16.5}{\lambda_1}} \text{ Avec } \lambda_1 = \frac{1}{\frac{1}{(\lambda+0.0089)} - \frac{0.035}{(\beta^3+1)}} \quad [58]$$

Relation entre vitesse spécifique et vitesse de rotation et vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad [59]$$

Équation de puissance mécanique :

$$P_{méca} = C \cdot \Omega \quad [60]$$

Avec l'équation [60] on peut en déduire le couple de la machine :

$$C = \frac{1}{2} \cdot s \cdot C_p \cdot \frac{V^3}{\Omega} [61]$$

INTRODUCTION LA REM EN CONVERSION ENERGIE EOLIENNE

La représentation macroscopique de la conversion de l'énergie éolienne avec une machine asynchrone (MAS) connectée au réseau commence par l'exploitation de l'énergie cinétique du vent par les éoliennes. Cette énergie est convertie puis injectée au réseau électrique.

Pour améliorer le rendement de la puissance, on utilise le MPPT pour trouver le point de puissance maximale. La vitesse du vent étant variable, il faut que le glissement soit adapté afin de garantir la vitesse de rotation mécanique optimale. Pour cela, on utilisera une commande V/F.

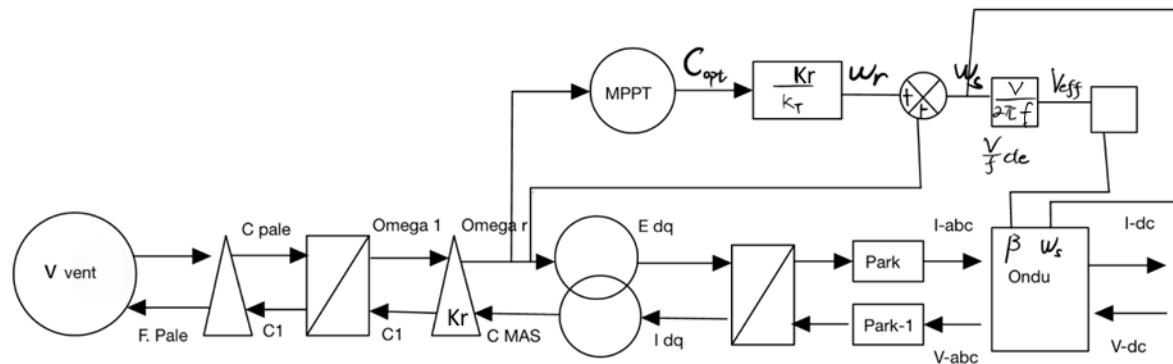


FIGURE 40 : LE SCHEMA DE REM DE CONVERSION ENERGIE D'UN SYSTEME EOLIEN

MODELISATION DE L'EOLIENNE

Avant de procéder à la réalisation du schéma de la Figure 40, on doit impérativement modéliser notre système éolien. On utilise les équations [57]-[61] afin de tracer les courbes Couple-vitesse de l'éolienne pour différentes vitesses du vent.

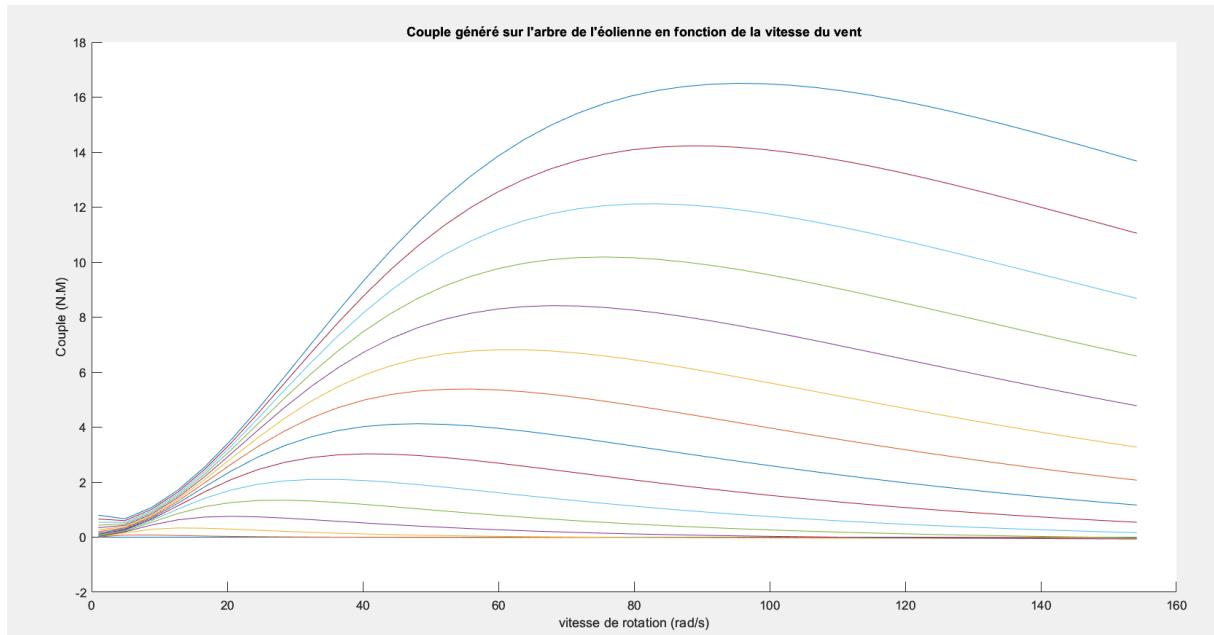


FIGURE 41 : COURBE DU COUPLE GENERE SUR L'ARBRE DE L'EOLIENNE POUR UNE VARIATIONS DE VITESSE DU VENT DE 0 A 14 M/S

Remarque

Nous avons fait varier la vitesse du vent de 0 à 14m/s, la courbe qui atteint la valeur la plus haute (en bleu foncé, tout en haut) correspond à 14m/s, la courbe en rouge à 13m/s ainsi de suite jusqu'à atteindre 0m/s.

Par la suite, nous allons trouver l'expression de la courbe qui touche les points du couple max pour chaque vitesse du vent. Cela nous va être utile afin de pouvoir choisir ce point de fonctionnement afin d'optimiser la production d'énergie. On utilise la fonction max () afin de trouver la valeur max du couple et son indice :

```
[cmax(j),indom(j)]=max(celc);
```

On trace la courbe du couple maximale afin de déterminer les points d'intersections avec nos courbes du couple généré sur l'arbre de l'éolienne et la courbe du couple max en fonction de la vitesse du vent:

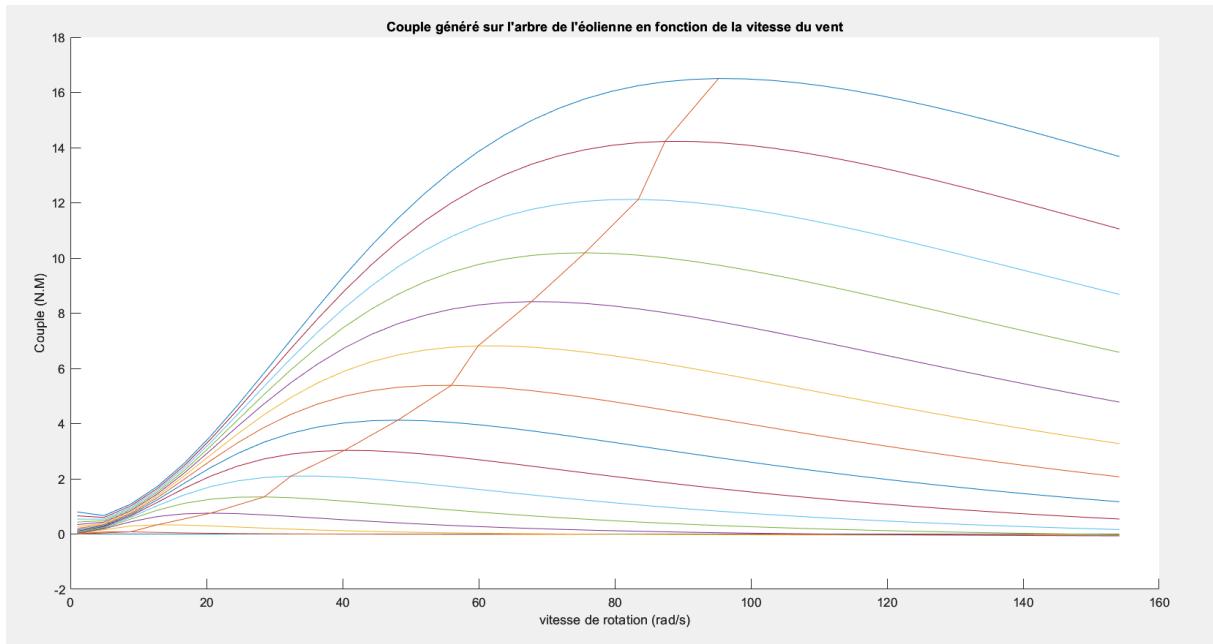


FIGURE 42 : COURBE DE PUISSANCE MAX.

Ensuite, nous utiliserons la fonctionnalité « Basic Fitting » de Matlab afin de coller un polynôme du 4ème degré sur la courbe du couple max. voir Annexe[5]

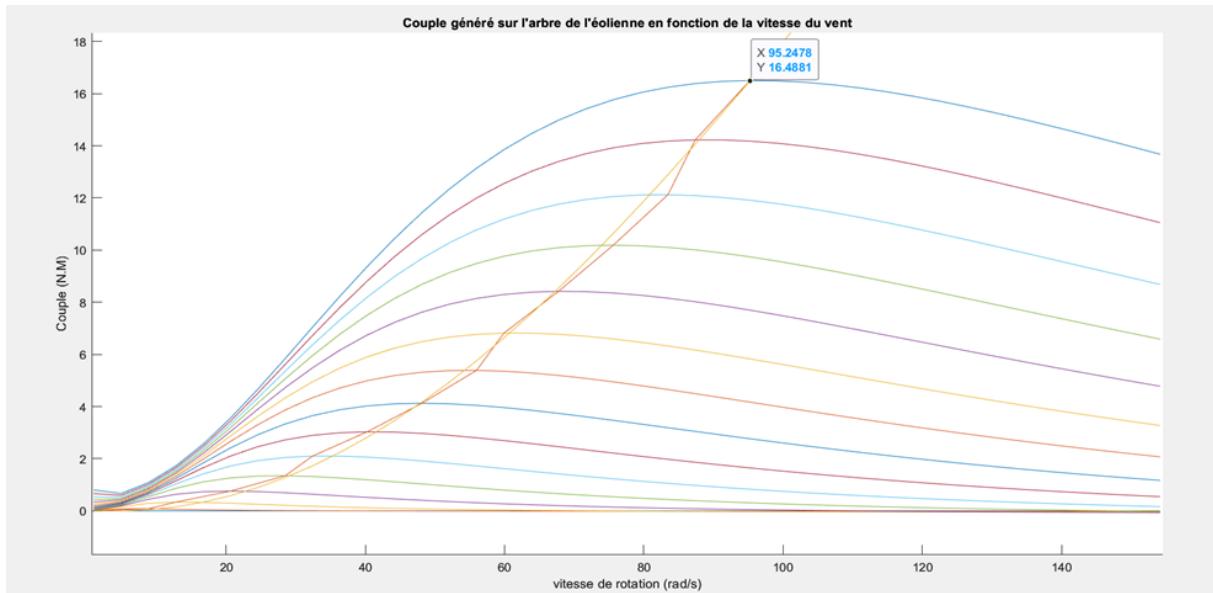


FIGURE 43 : POLYNOME DU QUATRIÈME DEGRÉ (COURBE JAUNE)

On peut désormais utiliser les données de cette courbe dans un « Lookup table » afin de déterminer le couple optimal à imposer pour maximiser la puissance générée.

Remarque

Pour une vitesse de vent de 14 m/s, nous avons un couple max de **16.48 N.m** à une vitesse de rotation de **95.24 rd/s**. Nous utiliserons cette valeur pour tester si notre système fonctionne bien.

REALISATION DU SCHEMA SIMULINK DU SYSTEME EN REM

En premier lieu, nous allons tester la partie éolienne dans notre schéma. Nous savons que pour une vitesse de vent de 14m/s le couple max est de 16.48N.m pour une vitesse de 95rd/s.

En simulant la partie éolienne du schéma, voici le résultat obtenu :

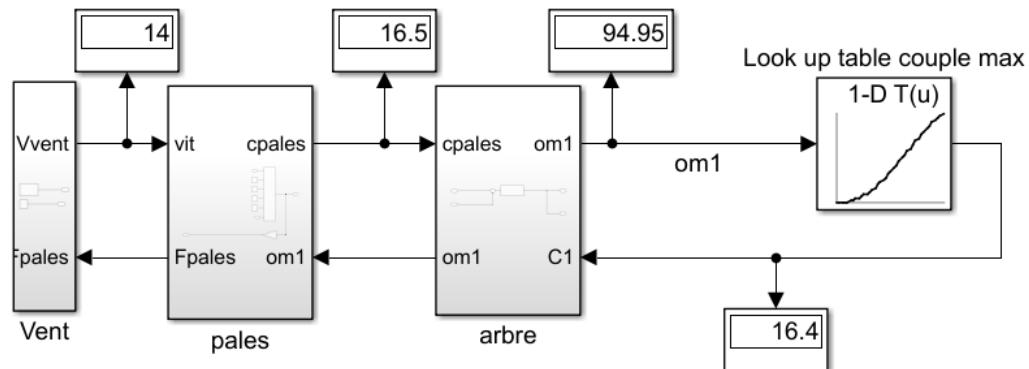


FIGURE 44 : REM DE LA PARTIE EOLIENNE

On voit bien que notre « MPPT » éolienne fonctionne : nous avons le couple max 16.5N.m qui est généré sur l'arbre de l'éolienne ce qui nous assure que notre production d'énergie est optimale. On va maintenant procéder à intégrer les autres parties de la Figure 40.

PARTIE MAS

En négligeant la partie mécanique de la MAS devant le moment de l'inertie de l'arbre de l'éolienne, nous allons incorporer la partie électrique de notre modèle MAS précédent dans la boucle afin de pouvoir contrôler la vitesse de rotation de l'éolienne en imposant un couple résistant qui nous garantit une vitesse de rotation optimale.

Équations du couple :

La MAS est conçue pour fonctionner dans une région à faible glissement, et donc on peut approximer le couple généré par les deux équations ci-dessous :

$$C_{em} = Kt * (wd) [62]$$

Où :

$$Kt = \frac{PV^2}{r'ws^2} [63]$$

Cem : Couple électromagnétique

Kt : Constante de couple

Wd : Pulsation des courants rotor.

P : nombre de paires de pôles

V : tension simple

R' : résistance rotor ramené au stator

Ws : pulsation des courants stator.

On peut déterminer la constante Kt en variant la vitesse de la machine sur sa droite de couple, d'après la courbe couple-vitesse de la Figure 5 , on doit varier notre vitesse mécanique de 138 rd/s à 157rd/s (synchronisme) en divisant le couple obtenu par la pulsation rotor et en moyennant les valeurs obtenues.

$$K_{tm} = \\ 1.5692 \\ fx >> |$$

FIGURE 45 : CONSTANTE KT OBTENUE

Nous allons utiliser les équations de cette partie afin de déterminer « Wd » et puis « Ws » de référence afin d'imposer un couple résistant sur l'arbre de l'éolienne.

REMARQUE IMPORTANTE

Afin d'éviter que le sens de rotation change lorsque le couple résistant de la MAS dépasse le couple généré sur l'arbre de l'éolienne, on utilise un bloc « Matlab function » afin de mettre la vitesse de rotation à zéro sans changer son signe à l'intérieur du bloc « arbre » (voir Figure 44 et).

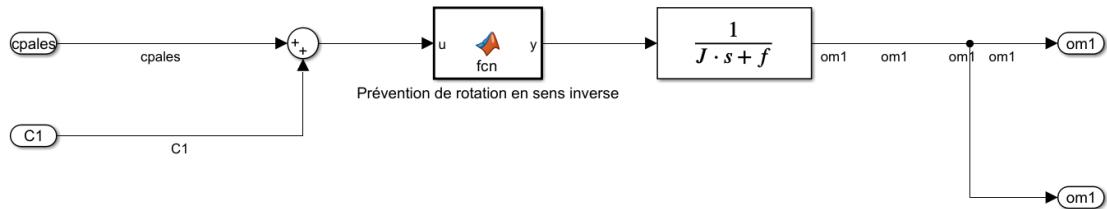


FIGURE 46 : PREVENTION DE ROTATION EN SENS INVERSE.

ONDULEUR

Lors de notre étude, nous avons négligé l'effet du découpage de l'onduleur, et donc notre onduleur produit des signaux purement sinusoïdaux.

$$\begin{aligned} i_1(t) &= I_M \cdot \sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t - \varphi) \\ i_2(t) &= I_M \cdot \sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t - \varphi - 2\pi/3) \\ i_3(t) &= I_M \cdot \sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t - \varphi - 4\pi/3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_1(t) &= 0,5 \cdot (1 + \beta \cdot \sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t)) \\ a_2(t) &= 0,5 \cdot (1 + \beta \cdot \sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t - 2\pi/3)) \\ a_3(t) &= 0,5 \cdot (1 + \beta \cdot \sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t - 4\pi/3)) \end{aligned}$$

$$\langle U_{12} \rangle(t) = (a_1(t) - a_2(t)) \cdot U_{dc} = 0,5 \cdot (\beta \cdot \sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t) - \beta \cdot \sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t - 2\pi/3)) \cdot U_{dc}$$

$$\langle U_{12} \rangle(t) = (\sqrt{3}/2) \cdot \beta \cdot U_{dc} \cdot \sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t + \pi/6)$$

[64]

Source : Support de cours « msap » de l'UE 412.

On peut en déduire :

$$V1(\max) = \frac{\langle U_{12} \rangle}{\sqrt{3}} [65]$$

$$Vi = \frac{U_{dc}}{2} \cdot B \cdot \sin(\omega t) [66]$$

Où Vi représente la tension instantanée de la phase i .

Et donc on peut déduire la valeur de la profondeur de modulation B :

$$B = \frac{Vi(\text{eff}) \cdot 2\sqrt{2}}{U_{dc}} [67]$$

On peut aussi déduire le courant de la source DC à partir de la relation [68] :

$$Idc = \alpha_1 I_1 + \alpha_2 I_2 + \alpha_3 I_3 [68]$$

COMMANDÉ V/F

Une commande simple à implémenter qui nous permet d'avoir une large plage de variation de vitesse ainsi que de minimiser les pertes joules est la commande V/f : le rapport V/f étant constant, on peut déterminer la tension appropriée après l'obtention de la pulsation statorique de référence « ω_s ».

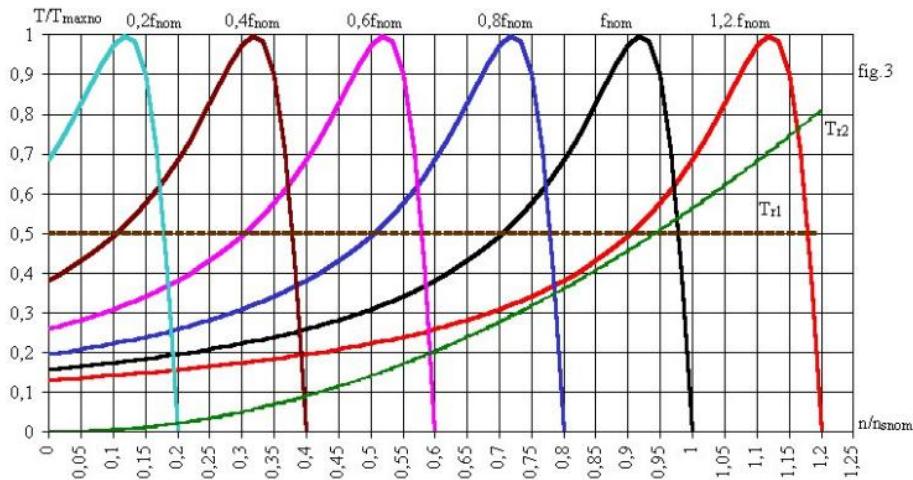


FIGURE 47 : LES COURBES COUPLE-VITESSE AVEC LA COMMANDE V/f D'UNE MAS A CAGE

SOURCE : SUPPORT DE COURS 413.

SIMULATIONS

Nous allons maintenant réaliser le schéma complet de la Figure 40 sous Simulink et nous visualiseront les résultats. Pour plusieurs vitesses du vent.

Avant cela, nous vérifierons les valeurs du couples max pour trois valeurs distinctes de la vitesse du vent :

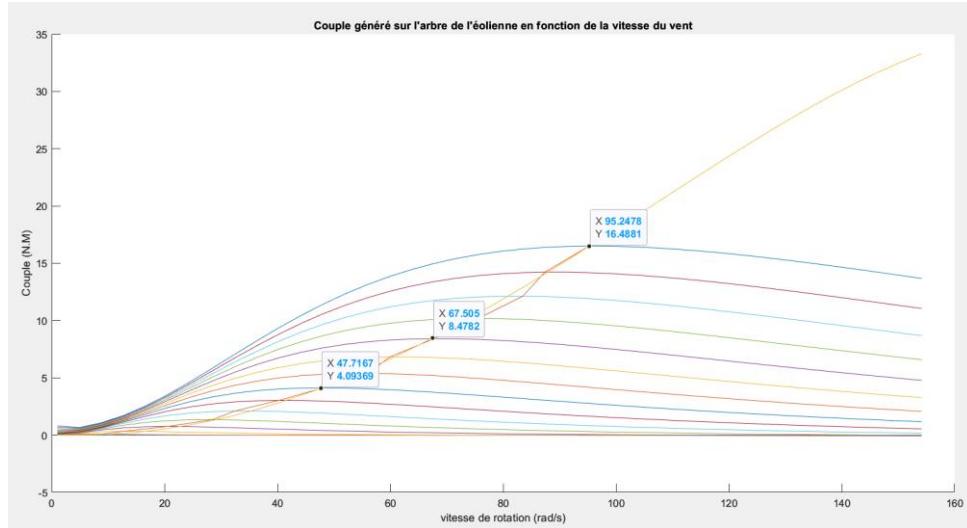


FIGURE 48 : COUPLE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT (TEST DU SYSTEME)

Points de fonctionnement désirés :

- Pour $V=14 \text{ m/s}$: $C_{\max}=16.48 \text{ N.m}$, $\Omega_{\max}=95 \text{ rd/s}$
- Pour $V=10 \text{ m/s}$: $C_{\max}=8.47 \text{ N.m}$, $\Omega_{\max}=67.5 \text{ rd/s}$
- Pour $V=7 \text{ m/s}$: $C_{\max}=4.09 \text{ N.m}$, $\Omega_{\max}=47.7 \text{ rd/s}$

On procède à la visualisation des résultats de simulation :

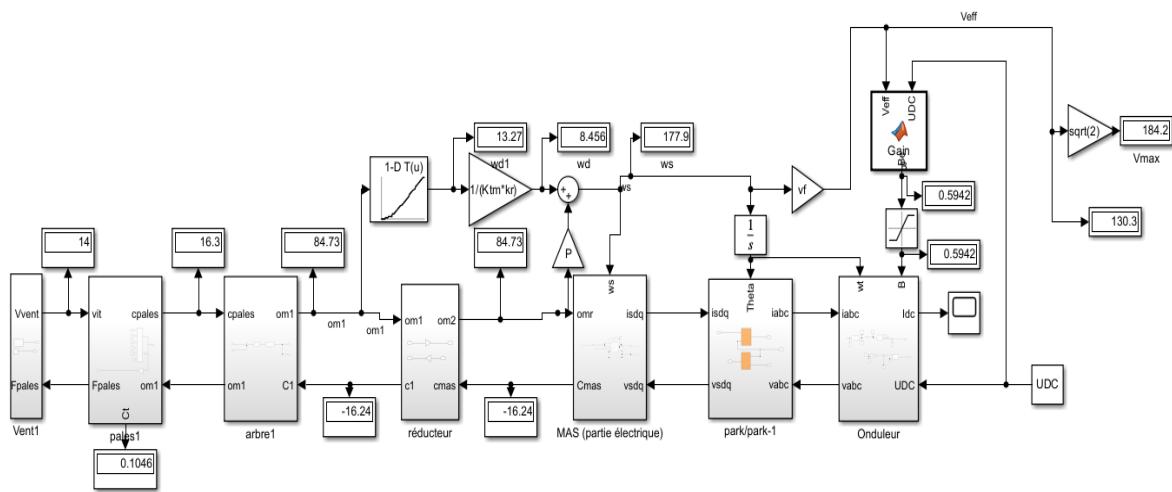


FIGURE 49 : RESULTAT DE SIMULATION REM POUR UNE VITESSE DE VENT DE 14M/S

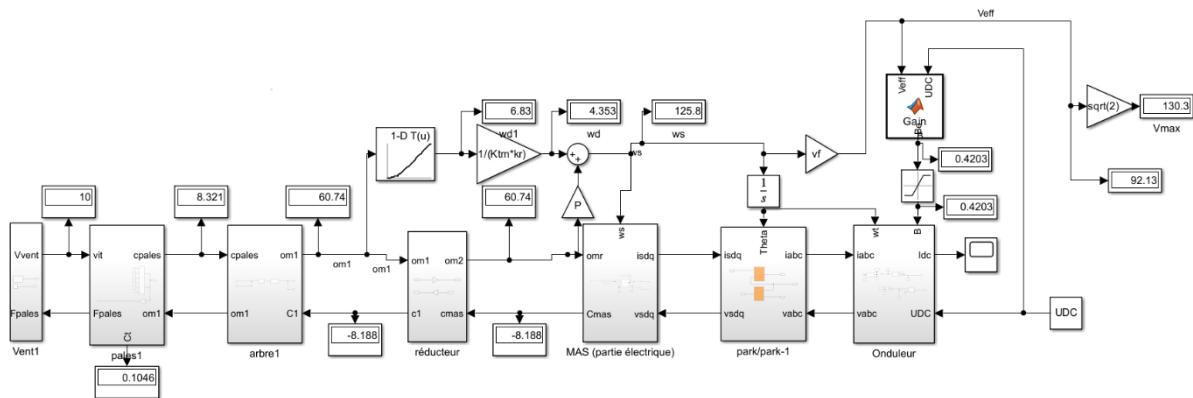


FIGURE 50 : RESULTAT DE SIMULATION REM POUR UNE VITESSE DE VENT DE 10M/S

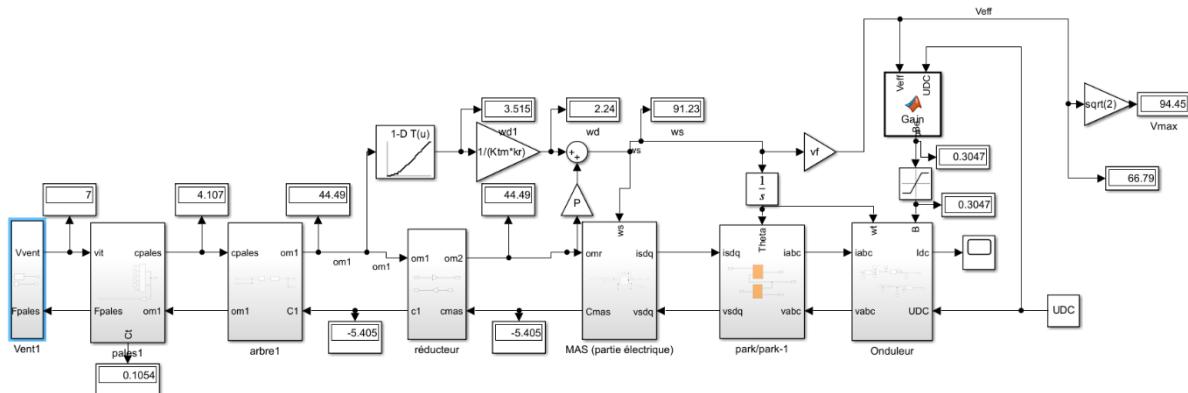


FIGURE 51 : RESULTAT DE SIMULATION REM POUR UNE VITESSE DE VENT DE 7M/S

Résultats et discussion

- Points de fonctionnement imposés :
- Pour $V=14 \text{ m/s}$: $C_{\max}=16.3 \text{ N.m}$, $\Omega_{\max}=84 \text{ rd/s}$
- Pour $V=10 \text{ m/s}$: $C_{\max}=8.32 \text{ N.m}$, $\Omega_{\max}=60.74 \text{ rd/s}$
- Pour $V=7 \text{ m/s}$: $C_{\max}=4.1 \text{ N.m}$, $\Omega_{\max}=44.49 \text{ rd/s}$

Les résultats sont légèrement inférieurs aux résultats anticipés (dans l'ordre de 10% d'erreur pour les vitesses, et 0.6% pour les couples). Cela peut être dû aux erreurs dans le calcul de la valeur de la constante « K_t » qui change drastiquement en fonction de l'intervalle choisi (par exemple si on choisit 136rd/s \rightarrow 157 rd/s elle devient 1.5 N.m/(rd*s-1) au lieu de 1.57 N.m/(rd*s-1) qu'on a trouvé). Cela crée une différence entre le couple de référence et le couple obtenu.

CONCLUSION

En conclusion, dans le cadre de la production et de la conversion d'énergie, nous avons élaboré la modélisation de plusieurs composants clés d'un bus DC sur MATLAB-Simulink. Tout au long de ce travail pratique, nous avons pris des précautions pour éviter les problèmes liés à la divergence des valeurs et à la division par zéro, qui sont des obstacles majeurs lors de la modélisation sur Simulink. La représentation énergétique macroscopique qui a été employée dans la dernière partie simplifie le processus de réalisation des systèmes complexes en mettant en évidence les relations de causalité entre les différents blocs qui le composent. Cette approche présente l'avantage de fournir un accès à la puissance de chaque bloc également.

Dans la réalité, lorsque le vent et l'irradiation sont suffisants, les éoliennes asynchrones et les panneaux solaires photovoltaïques fournissent de l'énergie au réseau. En utilisant le MPPT, nous trouvons le couple correspondant à la puissance maximale de l'asynchrone à une vitesse de vent spécifique, ainsi que la tension correspondant à la puissance maximale des panneaux solaires (en tenant compte de l'influence de la température sur ces derniers), afin de maximiser la production d'électricité. Nous utilisons ensuite les relations entre les grandeurs physiques et les rétroactions des résultats pour obtenir le rapport cyclique nécessaire à fournir à l'onduleur et à la modulation de largeur d'impulsion (PWM). L'énergie excédentaire est stockée dans les batteries au lithium. Lorsque le vent et l'irradiation sont insuffisants, les batteries au lithium fournissent de l'électricité au réseau. Dans le processus de modélisation, nous nous efforçons de représenter au mieux les grandeurs physiques que nous simulons, mais il existe toujours des écarts par rapport à la réalité, par exemple, en ne fixant pas de limite de tension aux batteries au lithium, elles peuvent monter à des tensions irréalistes. De même, une variabilité excessive de l'irradiation solaire peut rendre le système de production d'électricité instable. En fin de compte, toutes ces actions et réactions sont intégrées dans le REM (Réseau Électrique Modèle), et une analyse est effectuée pour déterminer le rapport cyclique optimal pour l'onduleur, permettant ainsi d'échanger de l'électricité avec le réseau conformément à nos besoins.

REMARQUE

Chatgpt 3.5 a été **uniquement** utilisé pour améliorer la rédaction et sa lisibilité.

BIBLIOGRAPHIE

[1] & Figure[11]: <https://enerdigit.fr/le-fonctionnement-et-le-role-des-batteries-de-stockage-dans-lequilibre-du-reseau-electrique/>

Figure [12]:https://ecampus.paris-saclay.fr/pluginfile.php/2134774/mod_folder/content/0/modele_batterie.pdf?forcedownload=1

Figure [13]:https://ecampus.paris-saclay.fr/pluginfile.php/2134774/mod_folder/content/0/modele_batterie.pdf?forcedownload=1

[2] & Figure [14] & équation [46, 47, 48, 49, 50] : *Development of Single Cell Lithium Ion Battery Model Using Scilab/Xcos Sigit Arianto a), Rietje Y. Yunaningsih, Edi Tri Astuti, and Samsul Hafiz Lithium Battery Research Group Research Center for Physics - Indonesian Institute of Sciences Kawasan Puspittek, Serpong, Tangerang Selatan 15314.*

[3]: *W. Lhomme, P. Delarue, A. Bouscayrol, and P. Barrade, "La REM, fonctionnement multiphysique de commande de systèmes énergétiques", Techniques de l'ingénieur, Nov. 2014.*

Figure [39]: Shabab Samimi, Francois Gruson, Philippe Delarue, Xavier Guillaud, Frédéric Colas. "Représentation Énergétique Macroscopique et diagramme PQ des convertisseurs modulaires multi-niveaux." Symposium de Génie Electrique 2014, July 2014, Cachan, France. <hal-01065316>.

ANNEXE

Ensemble du Code et des fichiers SLX :

https://drive.google.com/file/d/11W0txE2HliuPo-K-fEdtvBNyXa7xQUeD/view?usp=drive_link

```

1 - clear all
2 - P=2;
3 - J=4.5E-2;
4 - f=6.32E-4;
5 - Ls=0.256;
6 - Lr=0.2395;
7 - Msr=0.236;
8 - Rs=3.36;
9 - Rr=1.09;
10 - Vmax=220*sqrt(2);
11 - fs=50;
12
13 - vit_syn=fs/P*2*pi;
14 - temp=(0:vit_syn/40:vit_syn);
15 - for ind=1:1:max(size(temp))
16 -   vit_rad_s=temp(ind);
17 -   sim('MAS_seule_etudiant.slx');
18 -   vit_sauve(ind)=vit_rad_s;
19 -   couple_sauve(ind)=Couple(max(size(Couple)));
20 -   ind
21 - end
22 - plot(vit_sauve,couple_sauve);

```

Annexe[1]: la caractéristique couple-vitesse

```

6 - Vpvttmp=0:0.5:21.84;
7 - Irrtmp=0:200:1000;
8
9 - Tpv=273.15+25;
10
11
12 - for j=1:length(Irrtmp)
13 -   for i=1:length(Vpvttmp)
14 -     Vpv=Vpvttmp(i);
15 -     Irr=Irrtmp(j);
16 -     sim('partiel.slx');
17 -     Ipv_sauve(i)=ans.Ipv.Data(length(ans.Ipv.Data));
18 -     P_sauve(i)=Ipv_sauve(i)*Vpvttmp(i);
19 -   end
20 -   hold on;
21 -   figure(1);
22 -   title("Caractéristique I-V")
23 -   xlabel("Tension (V)")
24 -   ylabel("courant (A)")
25 -   plot(Vpvttmp,Ipv_sauve);
26 -
27 -
28 - hold on;
29 - figure(2);
30 - title("Courbe de puissance en fonction de tension")
31 - xlabel("Tension (V)")
32 - ylabel("Puissance (W)")
33 - plot(Vpvttmp,P_sauve);
34 -
35 -
36 -
37 -
38 -
39 - end
40 - hold off;

```

Annexe[2]:Le code Matlab pour tracer la caractéristique courant tension et puissance tension. (Varier l'irradiation)

```

6 - Vpvttmp=0:0.5:21.84
7 - temptmp=(0:3:60)+273.15;
8 -
9 -
10 -
11 - Irr=1000;
12 -
13 - for j=1:length(temptmp)
14 -   j
15 -     for i=1:length(Vpvttmp)
16 -
17 -       Vpv=Vpvttmp(i);
18 -       Tpv=temptmp(j);
19 -       sim('partiel.slx');
20 -       Ipv_sauve(i)=ans.Ipv.Data(length(ans.Ipv.Data)
21 -       P_sauve(i)=Ipv_sauve(i)*Vpvttmp(i);
22 -     end
23 -
24 -     indi=find(P_sauve>=0);
25 -     indp=find(Ipv_sauve>=0);
26 -
27 - hold on;
28 - figure(1);
29 - title("Caractéristique I-V")
30 - xlabel("Tension (V)")
31 - ylabel("courant (A)")
32 - plot(Vpvttmp(indi),Ipv_sauve(indi));
33 -
34 - hold on;
35 - figure(2);
36 - title("Courbe de puissance en fonction de tension")
37 - xlabel("Tension (V)")
38 - ylabel("Puissance (W)")
39 - plot(Vpvttmp(indp),P_sauve(indp));
40 -
41 -
42 -
43 -
44 - end
45 - hold off;

```

Annexe[3]: le code Matlab pour tracer la caractéristique courant-tension et puissance-tension. (en variant la température)

```
1 function alpha= fcn(v1,v0,i1,i0,alphai)
2 delta=0.01;
3 p1=v1*i1;
4 p0=v0*i0;
5
6 alpha=alphai;
7
8 if (p1==p0)
9 alphai=alphai;
10 else
11 if (p1>p0)
12 if (v1>v0)
13 alphai=alphai+delta;
14
15 else
16 alphai=alphai-delta;
17 end
18 else
19 if (v1>v0)
20 alphai=alphai-delta;
21
22 else
23 alphai=alphai+delta;
24 end
25
26 end
27
```

Annexe [4]: Implémentation de l'algorithme MPPT « Perturbation et Observation »

```

1 - clear all;
2 -clc;
3 -r=0.75;
4 -rho=1.20;
5 -b=15;%pi/180;
6 -J=0.0015;
7 -f=0.001;
8 -s=pi*r.^2;
9 - % parameters battery + MAS
10 -UDC=620;
11 -Ls=0.256;
12 -Lr=0.2395;
13 -Ms=0.236;
14 -Rs=3.36;
15 -Rr=1.09;
16 -kr=1;
17 -vf=230/(2*pi*50);
18 -Ktm=1.5692;
19 -P=2;
20 -B=1;
21 -Vevent=11.2;
22 -vit_syn=50/P*2*pi;
23 - %vitesse a glissement nul (synchrone) de la MAS
24 - temp=(1:vit_syn/40:vit_syn);
25 - %vecteur des vitesses de rotation de l'éolie,nne
26 - temp=0:1:14;
27 - %vecteur des vitesses du vent
28 - figure;
29 - hold on;
30 - indl=1;
31 - for j=1:length(tempv)
32 -     vit=tempv(j);
33 -
34 -     for i=1:length(temp)
35 -         om=temp(i);
36 -
37 -         lamb=r*om/vit;
38 -         lambi=1/(1/(lamb+0.089*b) - 0.035/((b.^3)+1));
39 -         Cp=0.5*(16/lambi - 0.4*(b-5))*exp(-16.5/lambi);
40 -         Ct=Cp/lamb;
41 -         ccelc(i)=(0.5*rho*Ct*r*s*vit.^2);
42 -
43 -     end
44 -     %on stocke les valeurs de Ct et lambda
45 -     Cpsv(indl)=Cp;
46 -     lambsv(indl)=lambi;
47 -     indl=indl+1;
48 - end
49 - [cmax,j],indom(j)=max(ccelc);
50 - title("Couple générée sur l'arbre de l'éoliennes en fonction de la vitesse du vent")
51 - xlabel("vitesse de rotation (rad/s)")
52 - ylabel("Couple (N.M.)")
53 -
54 - plot(temp,ccelc);
55 -
56 -
57 -
58 - end
59 - %Vecteur des vitesses de rotation de la MAS
60 - %vecteur des vitesses du vent
61 - %vecteur des vitesses de rotation de l'éolie,nne
62 - %vecteur des vitesses du vent
63 - %on stocke les valeurs de Ct et lambda
64 - %on stocke les valeurs de Ct et lambda
65 - plot(temp(indm),cmax);
66 - cmxfite=-4.78546620480099*(10.^-8)*temp.^4 + 3.49662102291610*(10.^-6)*temp.^3 + 0.00289286380926111*temp.^2 - 0.017610437791082
67 - %Polygone obtenu de basic fitting"
68 - plot(temp,cmxfite)
69 - hold off;
70 -

```

Annexe [5]:trouve le point de puissance Max avec MPPT, et enregistrer des paramètre.