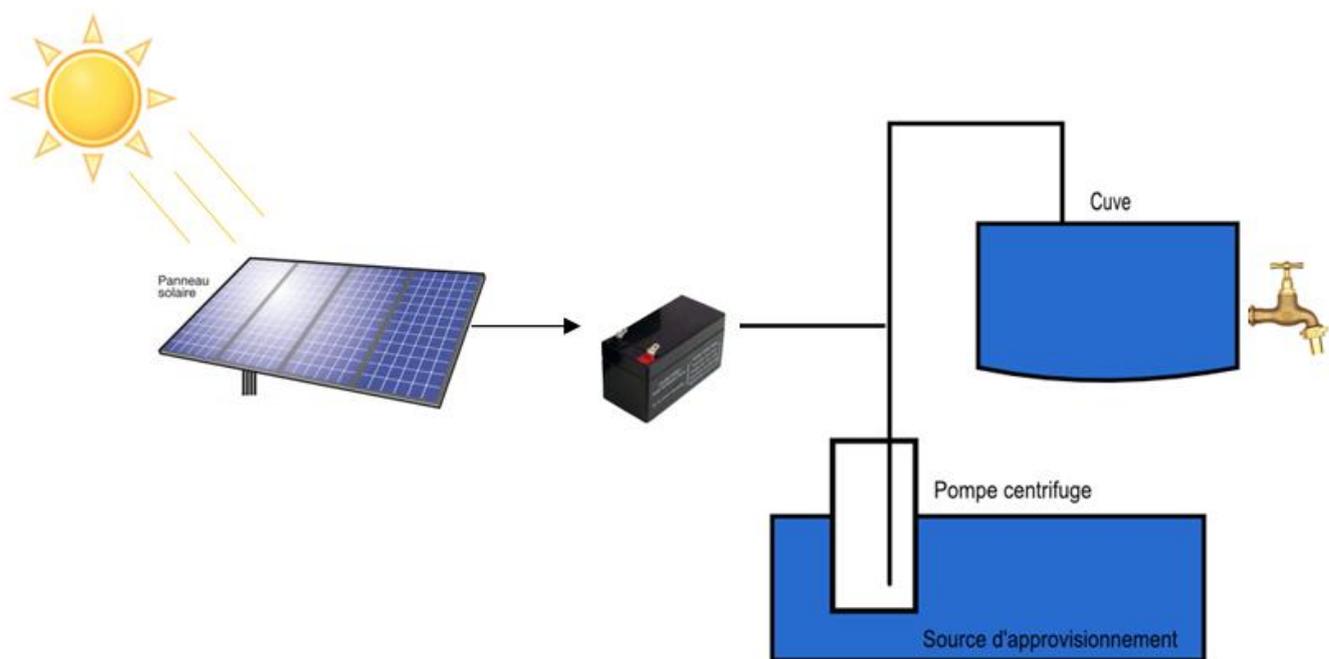


# Simulation d'un système de pompage photovoltaïque.

Bureau d'étude de Systèmes Energétiques (SE)



**Binôme :**

Katschnig Grégory  
Sambourg Julien

**Responsable Projet :**

Mr Lhomme Walter

# SOMMAIRE.

---

<b>I.</b>	<b>Présentation du projet.</b>	<i>Page 1.</i>
<b>II.</b>	<b>Modélisation du système (REM).</b>	<i>Page 1.</i>
<b>III.</b>	<b>Création de la SMC.</b>	<i>Page 2.</i>
<b>IV.</b>	<b>Exploitation des résultats.</b>	<i>Page 3.</i>
	<b>a. Exploitation du coté « Pompe ».</b>	<i>Page 3.</i>
	✓ Analyse de l'asservissement en courant.	<i>Page 3.</i>
	✓ Analyse de l'asservissement en vitesse.	<i>Page 4.</i>
	✓ Analyse du couple de la pompe.	<i>Page 4.</i>
	✓ Analyse de la puissance de la pompe.	<i>Page 5.</i>
	✓ Analyse de la puissance du moteur à courant continu.	<i>Page 5.</i>
	<b>b. Exploitation de la batterie.</b>	<i>Page 5.</i>
	✓ Analyse de la charge de la batterie.	<i>Page 6.</i>
	✓ Cas de la non-alimentation de la batterie.	<i>Page 6.</i>
	<b>c. Exploitation du coté panneaux PV.</b>	<i>Page 7.</i>
	✓ Analyse de la tension des panneaux photovoltaïque.	<i>Page 7.</i>
	✓ Analyse du courant et de la puissance des panneaux photovoltaïque.	<i>Page 7.</i>
	✓ Analyse de la MPPT du système.	<i>Page 8.</i>
<b>V.</b>	<b>Conclusion.</b>	<i>Page 8.</i>
<b>VI.</b>	<b>Annexes.</b>	<i>Page 9 et 10.</i>

## I. Présentation du projet.

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries. La technologie sans batteries a quelques inconvénients, son principal défaut est d'avoir un débit d'eau qui dépend de l'ensoleillement au cours de la journée. Nous allons ainsi faire une étude avec l'ajout de batteries dans le système de pompage photovoltaïque. Notre objectif sera donc de déterminer si les performances du système choisi sont adaptées à ses exigences.

## II. Modélisation du système (REM = Représentation Macroscopique Energétique).

Afin de pouvoir faire une étude plus complète, il faut tout d'abord faire la REM du système de pompage photovoltaïque.

Voici ci-dessous le schéma à modéliser :

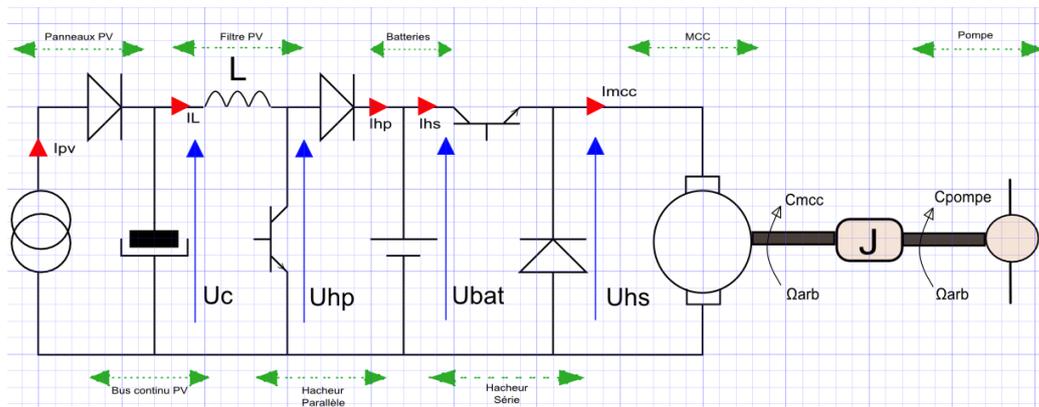
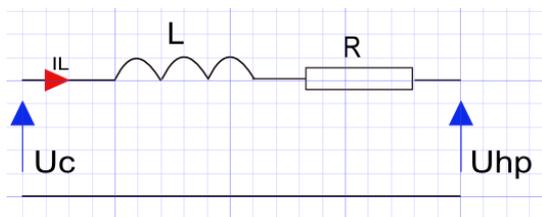


Figure 1. Schéma structurel du système de pompage photovoltaïque étudié.

Exemple : Création de la REM du filtre PV.

- Schéma du filtre PV :

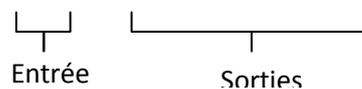


*L'inductance du filtre PV est utilisée pour filtrer les harmoniques générés par le hacheur parallèle et pour respecter les alternances des sources entre les batteries et le bus continu.*

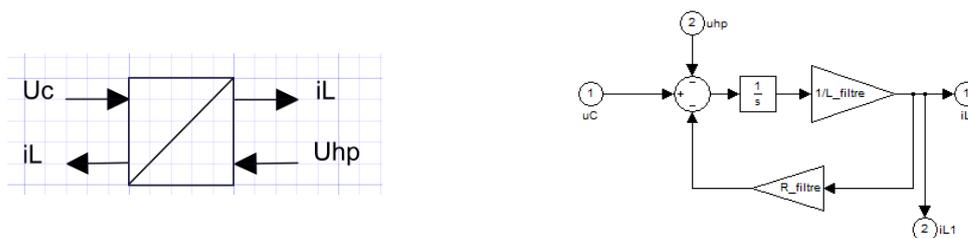
- Inductance du filtre : 10mH.
- Résistance série du filtre : 25mΩ.

Le filtre PV est ainsi régi par l'équation suivante :

$$\text{Equation 1: } I_L = \int (U_C - U_{hp} - R * I_L) dt$$



Cette équation nous permet de créer sa REM ainsi que de l'introduire sur MATLAB (Simulink).



La modélisation complète (REM) du système de pompage photovoltaïque est en Annexe 1.

### III. Création de la SMC (Structure Maximale de Commande).

Pour la création de la SMC, il faut partir de la chaîne de réglage et l'inverser pour créer un asservissement sur les éléments d'accumulation.

Pour exemple, l'asservissement en vitesse sera décrit de deux façons, avec un correcteur proportionnel (P) et un correcteur proportionnel intégral (PI).

#### Correcteur Proportionnel (P) :

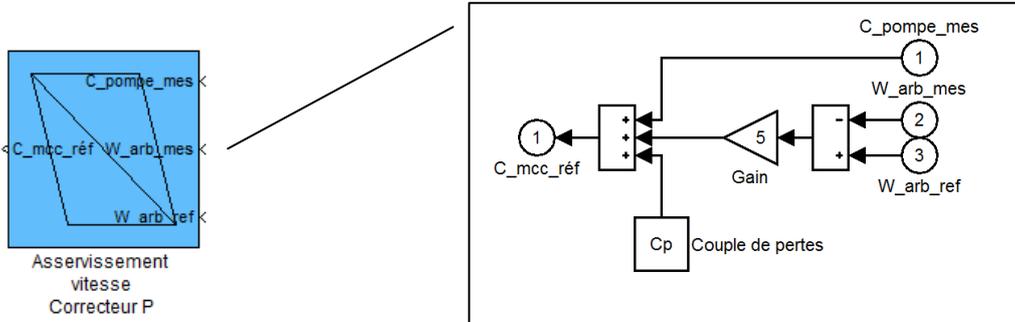
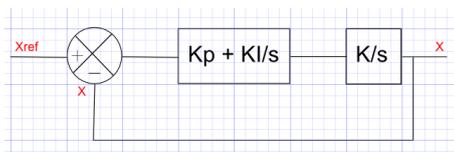


Figure 2. Synthèse du correcteur P.

#### Correcteur Proportionnel Intégral (PI) :



$$\frac{X}{X_{ref}} = \frac{\frac{K_p}{K_I} * s + 1}{1 + \frac{K_p}{K_I} * s + \frac{1}{K * K_I} * s^2}$$

On sait que :  $1 + \frac{2\varepsilon}{\omega n} * s + \frac{1}{\omega n^2} * s^2$

Par conséquent :

$$\frac{2\varepsilon}{\omega n} = \frac{K_p}{K_I}$$

$$\frac{1}{K * K_I} = \frac{1}{\omega n^2}$$

Avec :

- Dépassement 0%
- $\omega n_{tr5\%} = 4,744$
- $\varepsilon = 1$

Voici sous MATLAB, le rendu de la SMC :

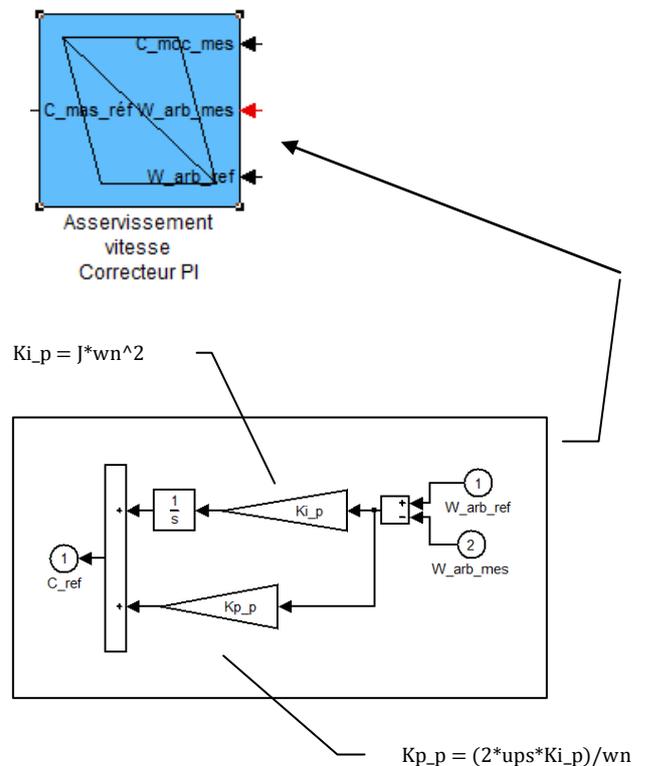


Figure 3. Synthèse du correcteur PI.

Nous verrons l'analyse des asservissements dans la partie « Exploitation des résultats ». La modélisation complète (REM+SMC) du système de pompage photovoltaïque est en Annexe 2.

#### IV. Exploitation des résultats.

##### a. Exploitation du côté « Pompe ».

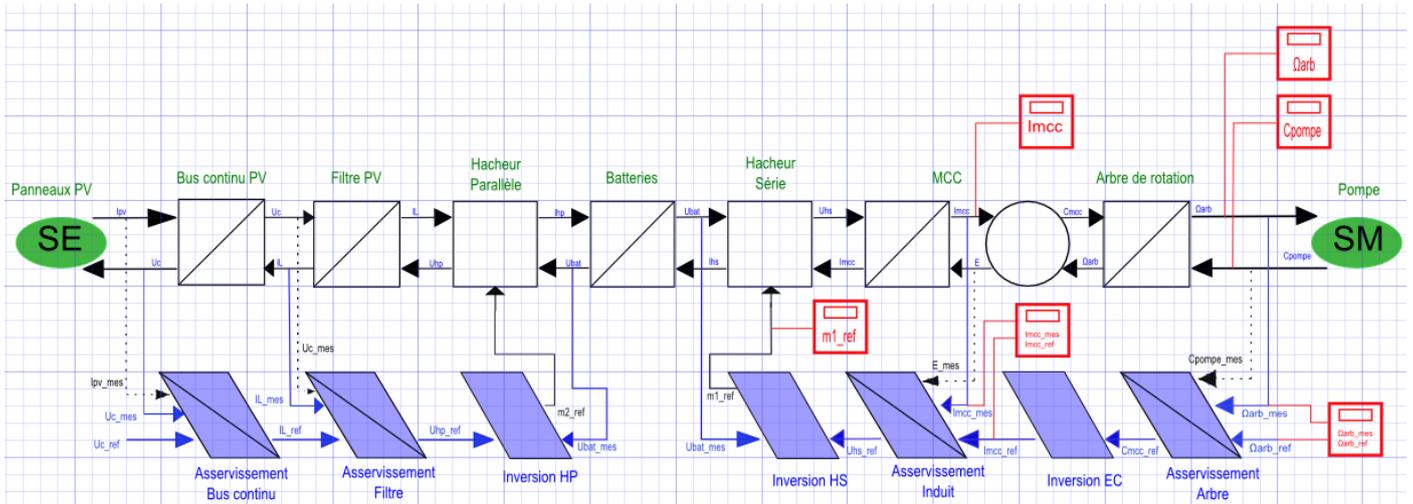


Figure 4'. Schéma complet de la REM et de la SMC.

Pour l'exploitation des résultats, nous commencerons par l'analyse du côté « POMPE » :

- $Imcc\_mes \Rightarrow Imcc\_ref$ .
- $Cpompe$ .
- $\Omegaarb\_mes \Rightarrow \Omegaarb\_ref$ .

#### Cahier des charges :

##### MCC :

- Puissance utile : 0,2kW
- Tension nominal : 12V
- Courant nominal : 10A
- Vitesse nominale : 1000tr/min -> 104,7 rad/s

##### Pompe :

- $Cpompe = 1,5Nm$

#### Analyse d' $Imcc\_mes \Rightarrow Imcc\_ref$ : Analyse de l'asservissement en courant.

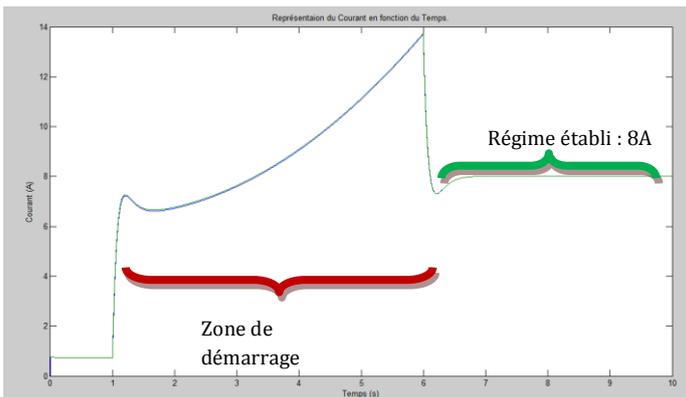


Figure 5. Représentation du courant en fonction du temps.

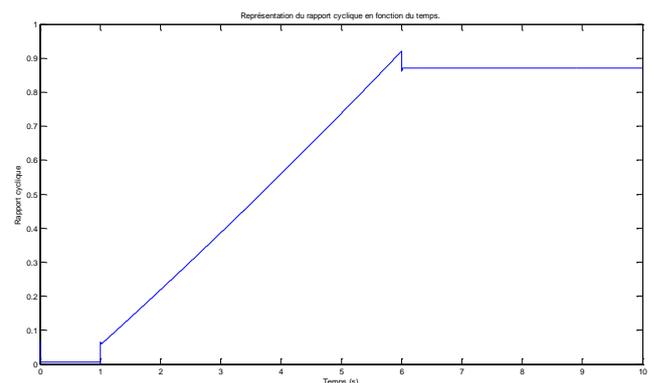


Figure 6. Représentation du rapport de transformation  $m1$ .

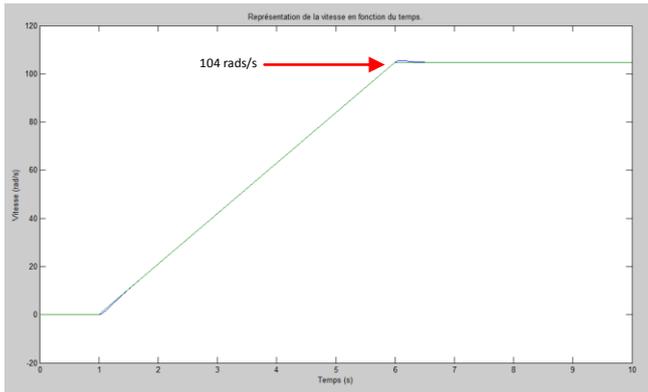
On observe que le courant de la MCC suit la progression du rapport de transformation «  $m1$  ». Ce rapport de transformation est imposé par l'utilisateur.

On constate un courant de démarrage d'une durée de 5 secondes et d'un courant crête de 14A, ainsi, à partir de 6 secondes, ce stabilise en régime établi à 8A.

Le cahier des charges impose 10A en courant nominal, on en déduit par conséquent que nous respectons les exigences du système.

Analyse de  $\Omega_{arb}$  mes  $\Rightarrow \Omega_{arb}$  ref : Analyse de l'asservissement en vitesse.

*Asservissement avec correcteur PI :*



*Asservissement avec correcteur P :*

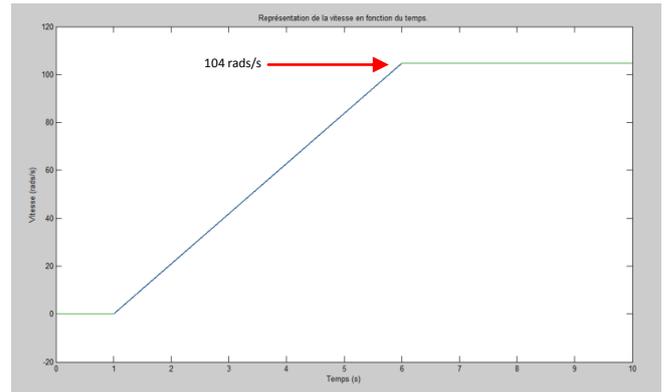


Figure 7. Représentation de l'asservissement de la vitesse avec deux correcteurs différents.

On aperçoit que le système est bien asservi avec les deux correcteurs et atteint dans les deux cas la vitesse nominale du moteur à courant continu (1000tr/min  $\Rightarrow$  104,7rad/s).

Cependant on observe un dépassement sur le correcteur Proportionnel Intégral, l'équation de l'asservissement est de la forme suivante :

$$\frac{X}{X_{ref}} = \frac{\frac{K_P}{K_I} * s + 1}{1 + \frac{K_P}{K_I} * s + \frac{1}{K * K_I} * s^2}$$

L'origine du dépassement est qu'au numérateur, nous n'avons pas un numérateur de la forme d'un gain unitaire.

Analyse de C pompe :

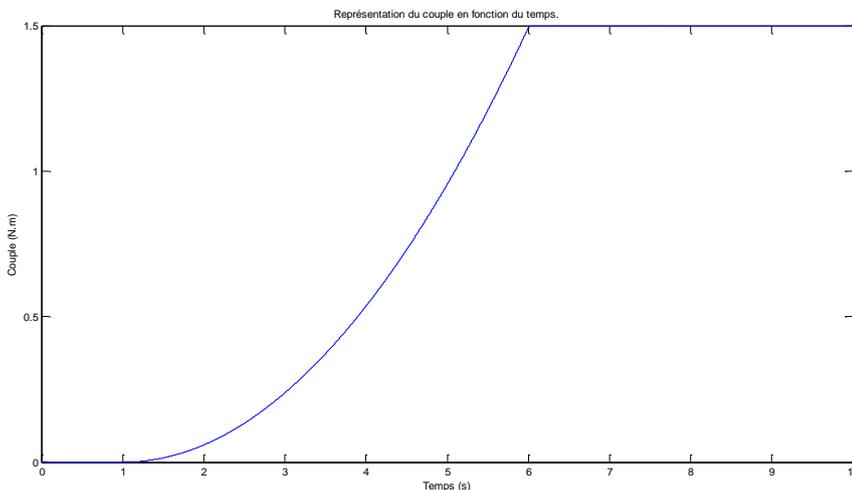


Figure 8. Représentation du couple de la pompe.

La pompe est de type centrifuge, son couple est exprimé de la façon suivante :

$$C_{pompe} = K_{pompe} * \Omega_{arb}^2$$

Pour assurer un débit convenable, le groupe motopompe devra fonctionner à vitesse nominale de la MCC (104,7rad/s) pour un couple de pompage de 1,5Nm.

Le débit de la pompe et la vitesse du moteur à courant continu sont liés par l'équation précédente, cependant on remarque que sur l'analyse précédente, la vitesse est atteinte par les deux correcteurs. Par conséquent, le débit de la pompe est bien assuré, il atteint bien un débit convenable de 1,5Nm.

## Analyse de P pompe :

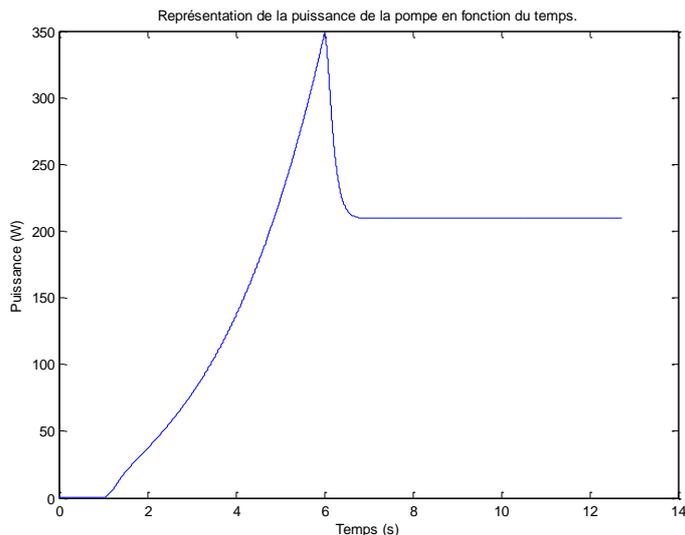


Figure 9. Représentation de la puissance de la pompe.

On constate que la puissance de la pompe croît de façon exponentielle pendant le démarrage du moteur continu, et atteint une puissance de 200 Watts au régime établi.

## Analyse de la puissance du moteur à courant continu :

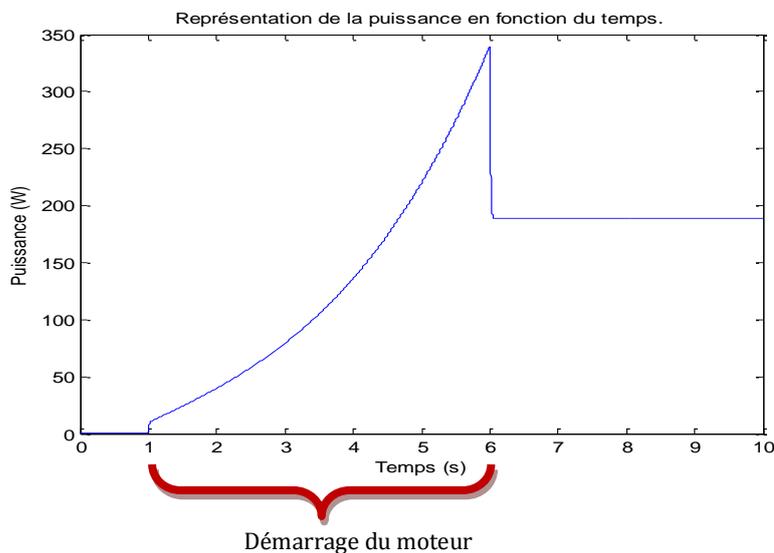


Figure 10. Représentation de la puissance de la MCC.

On observe si le moteur à courant continu va supporter la puissance qui lui sera infligé.

### Cahier des charges de la MCC :

- Puissance utile : 0,2kW
- Tension nominale : 24V
- Courant nominal : 10A

On observe que le démarrage du moteur à une durée de 5 secondes, avec une puissance crête de 340 Watts, néanmoins le courant nominal du moteur atteint 195 Watts. Par conséquent, il est donc adapté aux exigences de la MCC.

### b. Exploitation de la batterie.

#### Cahier des charges des batteries :

- Capacité de stockage : 17Ah
- Tension nominale : 12V
- Tension minimale : 9V
- Tension maximale : 14,4V
- Nombre de batteries mises en série par module : 3
- Nombre de modules en parallèle pour batterie : 16

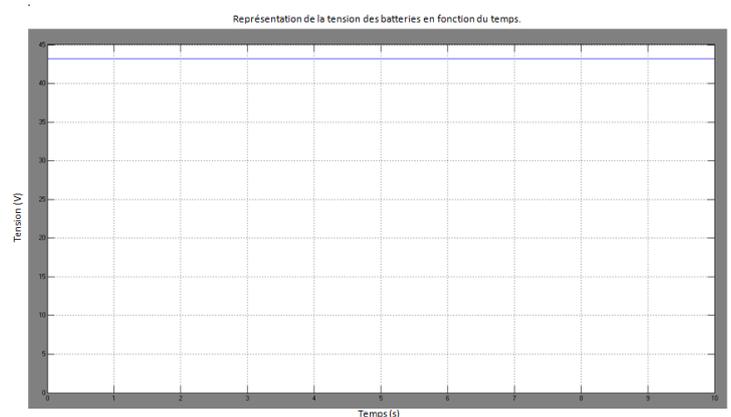


Figure 11. Représentation de la tension de batteries.

### Calcul de la batterie équivalente :

On sait que :

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{U_{bat\_max} - U_{bat\_min}} = 1,13 * 10^4 F$$

En série :

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{3}{C} \rightarrow C_{eq} = \frac{C}{3} = 3,77 * 10^3 F$$

En parallèle :

$$C_{batt} = 16 * C_{eq} \rightarrow C_{batt} = 6,044 * 10^4 \rightarrow \text{Capacité du condensateur parfait}$$

### Analyse de la charge de la batterie :

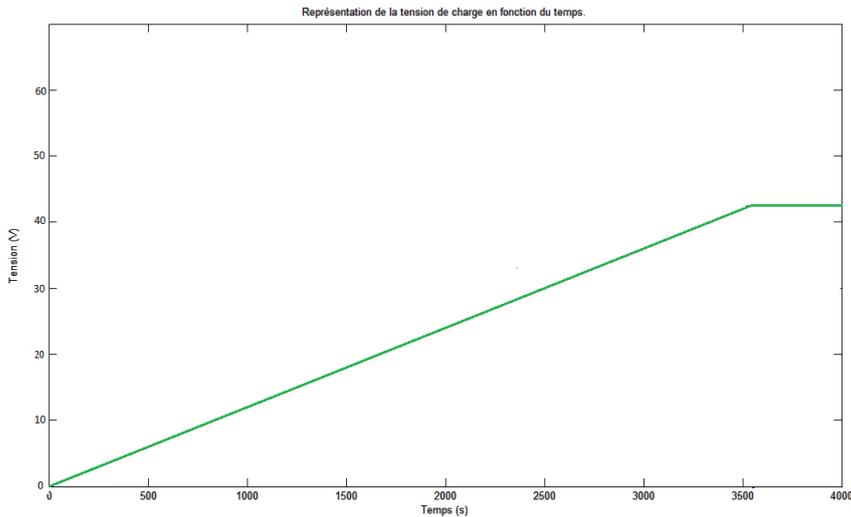
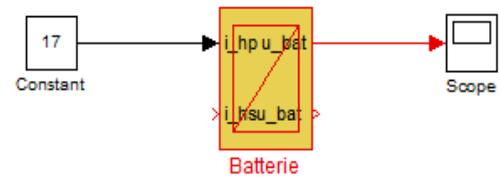


Figure 12. Représentation de la tension de charge.



On constate que lorsque que l'on écarte la batterie, et qu'on lui inflige un courant de 17 Ampères, nous observons sur la courbe ci-dessus que la charge de batterie est au maximum. Nous pouvons en conclure ainsi que la batterie fonctionne correctement.

### Cas de la non-alimentation de la batterie (Exemple : La nuit) :

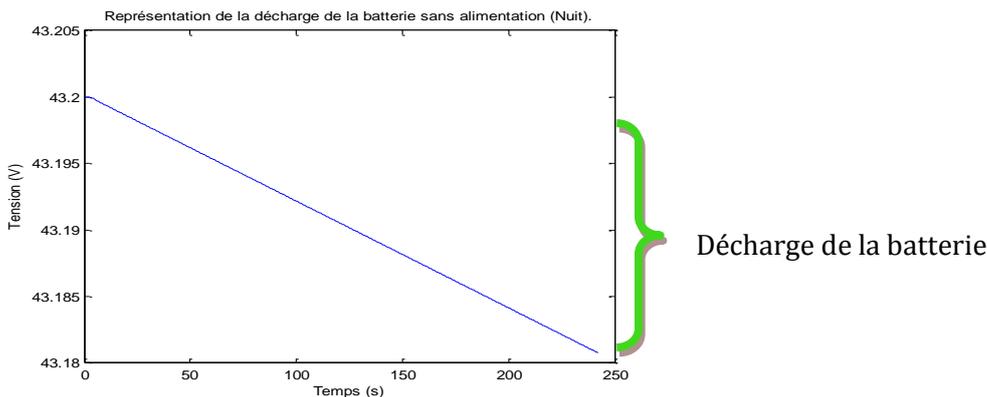


Figure 13. Représentation dans le cas de la non alimentation de la batterie.

Nous avons fait l'essai d'une simulation sans approvisionnement en courant des panneaux PV, ce qui revient à une simulation de nuit.

On constate donc que la batterie se décharge, ce qui veut dire que le moteur à courant continu est toujours alimenté, par conséquent, l'approvisionnement en eau est assuré à débit constant.

c. Exploitation du côté « Panneaux PV ».

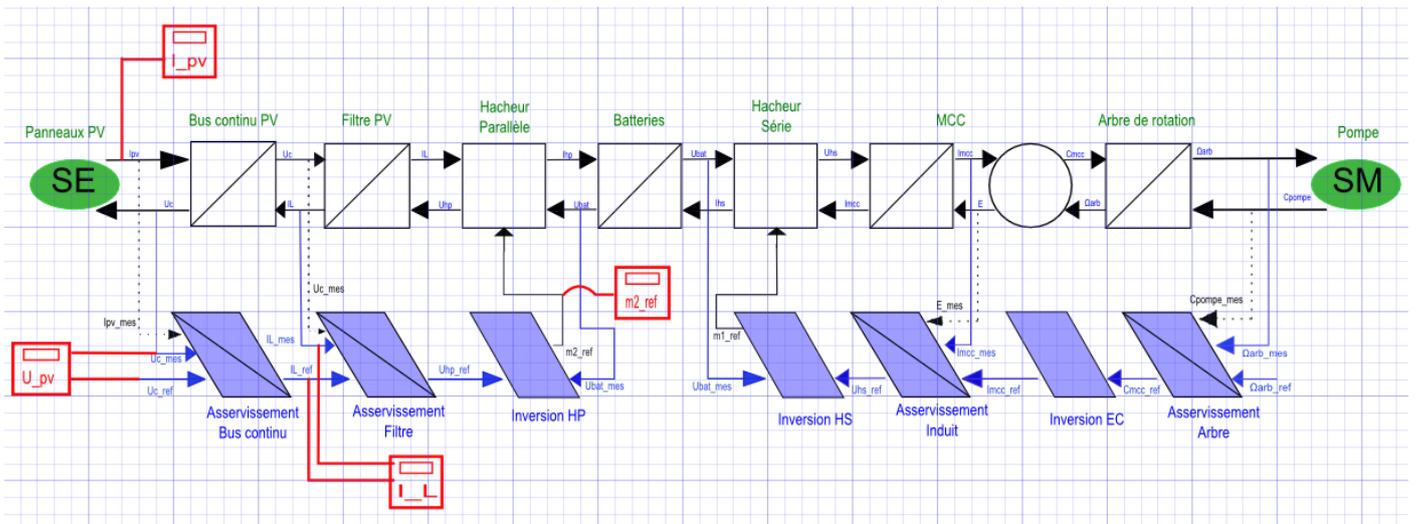


Figure 14. Schéma complet de la REM et de la SMC avec scope côté panneaux PV.

Dans cette exploitation, nous allons observer et commenter :

- Tension des panneaux PV :  $U_{PV}$
- Courant des panneaux PV :  $I_{PV}$
- Courant du filtre :  $I_L$

Analyse de la tension des panneaux photovoltaïque :

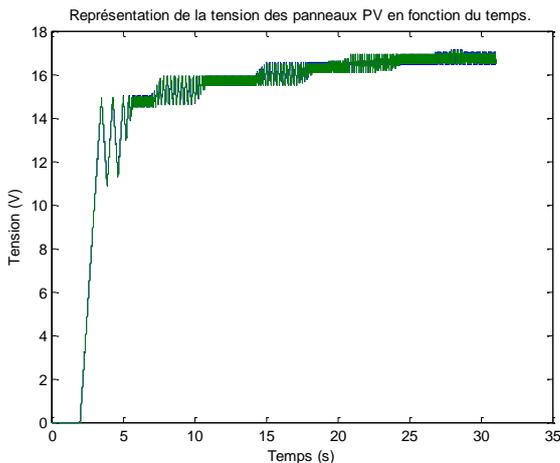


Figure 15. Représentation de l'asservissement de la tension des panneaux.

On constate que la tension est bien asservie par le correcteur Proportionnel Intégral est que la tension obtenue en régime établi est adapté aux exigences données par le constructeur des panneaux photovoltaïque (Voir données constructeur Annexe 3).

Analyse du courant et de la puissance des panneaux photovoltaïque :

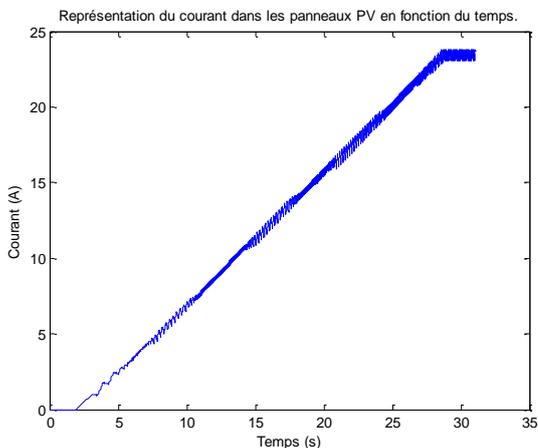


Figure 16. Représentation du courant des panneaux PV.

Ainsi on constate que le courant est bien égal au courant du panneau photovoltaïque noté sur la documentation. (Voir données constructeur Annexe 3). Ce courant est égal au 6 panneaux photovoltaïques reliées en parallèle.

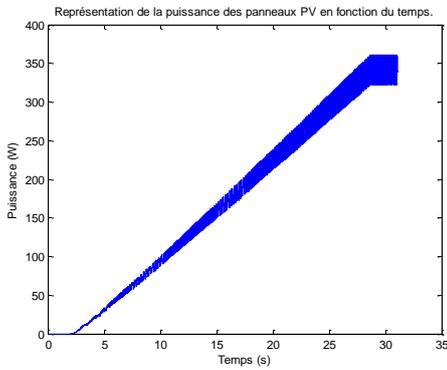


Figure 17. Représentation de la puissance des panneaux PV.

Cette courbe représente le produit de la tension des panneaux photovoltaïques et du courant des panneaux photovoltaïques en fonction du temps. Elle correspond ainsi au 6 panneaux PV mises en parallèle.

Analyse de la MPPT du système :

*Définition : Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens.*

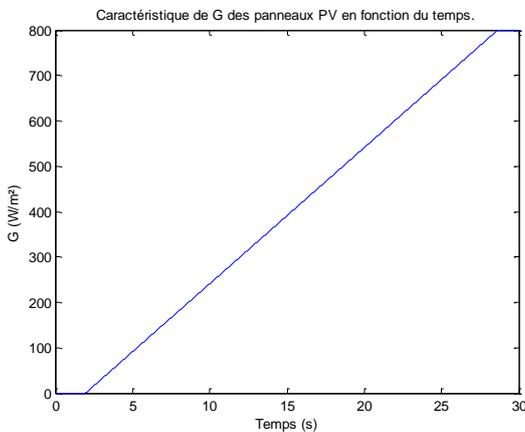


Figure 18. Représentation de G des panneaux PV.

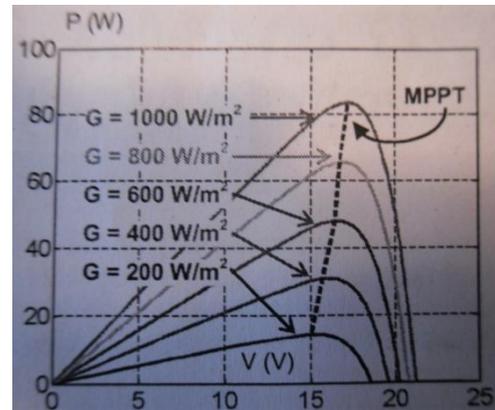


Figure 19. Caractéristique  $P=f(V)$  d'un panneau PV.

L'entrée  $G_{pv}$  d'un seul panneau est calculé par une stratégie appelée MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cette stratégie à pour but de trouver le maximum de la puissance fournit par les panneaux photovoltaïques.

Pour trouver la puissance maximale fournit par les panneaux solaires, la MPPT va incrémenter la tension, de  $\Delta V$  préalablement réglé, aux bornes du panneau solaire et observer la nouvelle puissance. Si celle-ci augmente, la stratégie va continuer jusqu'à trouver le point maximum. Cependant si la nouvelle puissance diminue, la stratégie va soustraire la tension de  $\Delta V$ .

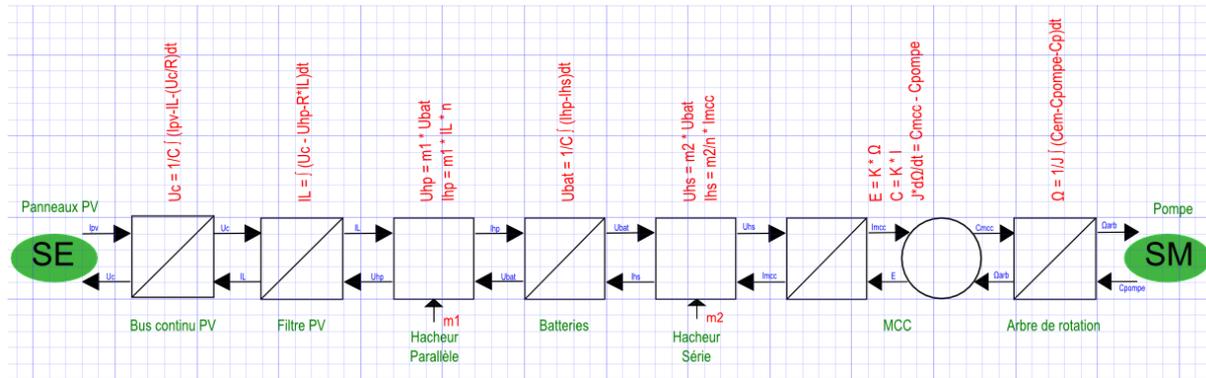
La stratégie va continuer de diminuer la tension jusqu'a retrouver la puissance maximale. Cette stratégie et aussi appelé P&O Perturbe et Observe.

V. Conclusion.

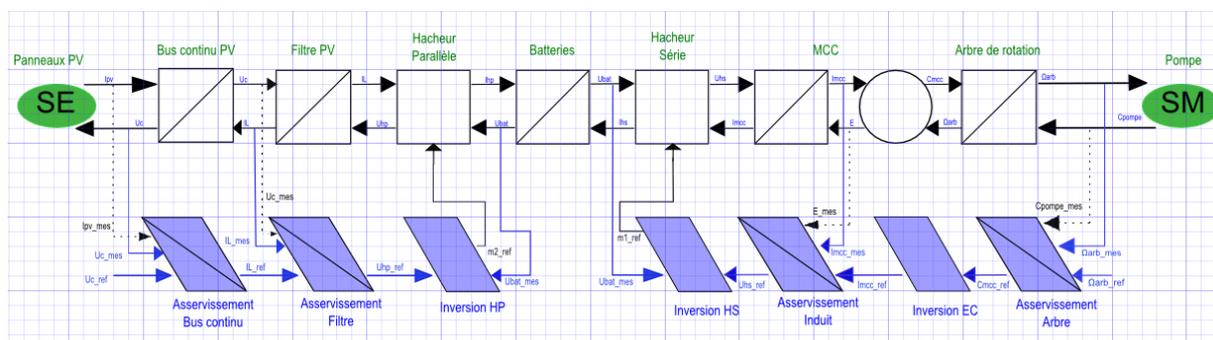
Ce projet a était très intéressant, tout d'abord, parce qu'il concernait une cause caritative à but humanitaire pour des pays ayant un besoin vital. Ensuite, il fut aussi intéressant du point de vue de la manière de travailler, comme des contraintes imposées auxquelles nous devons tenir compte. Nous avons quelques difficultés sur certaines synthèses de correcteurs, ou même certaines interprétations de courbes mais cela a été résolu avec succès. Néanmoins malgré ces difficultés, le projet fonctionne correctement sur toutes ses simulations. Pour la mise en place du projet, il faudrait faire une étude beaucoup plus approfondi, avec d'autres hypothèses, afin peut-être de ré-affiner le modèle, mais pour ce qu'il s'agit de notre projet, nous pouvons en conclure que cela fonctionne correctement.

## VI. Annexes.

### Annexe 1 : Modélisation de la REM du système de pompage photovoltaïque.



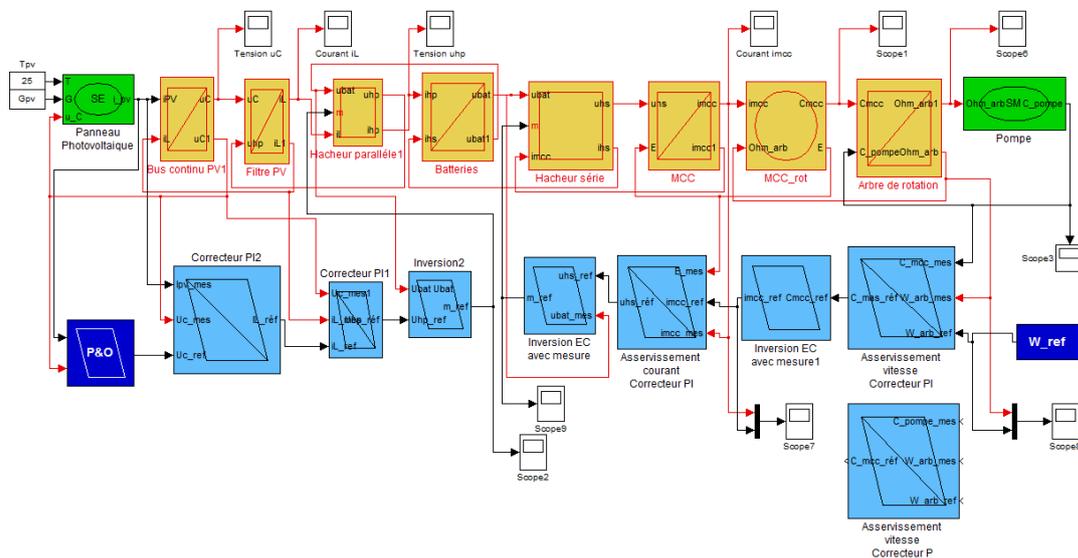
### Annexe 2 : Modélisation de la SMC du système de pompage photovoltaïque.



### Annexe 3 : Données constructeur des panneaux photovoltaïques.

Typical Electrical Characteristics <sup>(1)</sup>		
	MSX-93	MSX-77
Maximum power ( $P_{max}$ )	83W	77W
Voltage at $P_{max}$ ( $V_{mp}$ )	17.1V	16.9V
Current at $P_{max}$ ( $I_{mp}$ )	4.85A	4.56A
Guaranteed minimum $P_{max}$	80W	72W
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	5.27A	5.0A
Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )	21.2V	21.0V
Temperature coefficient of $I_{sc}$	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of $V_{oc}$	-(80±10)mV/°C	
Approximate effect of temperature on power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT <sup>2</sup>	47±2°C	

### Annexe 4 : Schéma complet sous Simulink (MATLAB).



## Annexe 5 : Programme complet sous MATLAB.

```
%% init_M1_ASE_be_SE_10_11_katschnig_sambourg.m
% Programme d'initialisation pour le Bureau d'Etude de Systèmes
Energétiques
% M1-ASE 2010-2011
% Simulation d'un système de pompage photovoltaïque
% Programme réalisé par Katschnig_Sambourg le 25/11/2010
% Dernière modification effectuée par Nom Binome le 25/11/2010

%% RAZ
clear all; clc;
%% Panneaux Photovoltaïques
load data_PV;

%% Bus continu PV
Cbus = 200e-6; % Capacité du bus continu (F).
Rbus = 50000; % Résistance de fuite du bus continu (Ohm).

%% Filtre PV
L_filtre = 10e-3; % Inductance du filtre (H).
R_filtre = 25e-3; % Résistance série du filtre (Ohm).

%% Hacheurs série et parallèle
n = 0.9; % Rendement des convertisseurs (sans unité).

%% Batteries aux plombs
Q = 61200; % Capacité de stockage (A/s).
U_bat_nom = 12; % Tension nominale (V).
U_bat_min = 9; % Tension minimale (V).
U_bat_max = 14.4; % Tension maximale (V).
dens_energ = 37; % Densité énergétique (Wh/kg).

% Calcul de C_batt:
%  $Q = C * U$ 
C = Q/(U_bat_max-U_bat_min)

% En série:
%  $1/C_{eq} = (1/C) + (1/C) + (1/C) = 3/C$ 
Ceq = C/3

% En parallèle:
C_batt = 16*Ceq % Capacité équivalente. (F)

%% MCC à Aimants Permanents
Pu = 200; % Puissance utile (W).
U_mcc_nom = 24; % Tension nominale (V).
I_mcc_nom = 10; % Courant nominal (V).
N_nom = 1000; % Vitesse nominal (tr/min).
Ohm_nom = 104.7198; % Vitesse nominal (rad/s).
R_bob_ind = 240e-3; % Résistance du bobinage de l'induit (Ohm).
L_bob_ind = 3e-3; % Inductance du bobinage de l'induit (H).
Cp = 0.153; % Couple de pertes mécaniques (N*m).

% Calcul de K_cem:
E = K_cem*Ohm_nom ;

K_cem = (U_mcc_nom-(R_bob_ind*I_mcc_nom))/Ohm_nom;

%% Pompe centrifuge
C_pompe = 1.5; % Couple de pompage (N*m).

J = 0.056; % Moment d'inertie de l'ensemble motopompe (g*m²).
Ohm_arb=104.7198; % Vitesse de l'arbre de rotation (rad/s).

% Calcul de K_pompe:
C_pompe = K_pompe*Ohm_arb² ;

K_pompe = C_pompe/(Ohm_arb*Ohm_arb);
%% Correcteur de la MCC

% Fct de transfert :  $1/((L_{bob\_ind}/Kc)p+1)$ 
To_i = L_bob_ind /R_bob_ind;
Kc=10*R_bob_ind;
tr=0.5;
wn=4.744/tr;
ups=1;
Ki_p=J*wn^2;
Kp_p=(2*ups*Ki_p)/wn;

%% Correcteurs Filtre PV
Kf=1000*R_filtre;
% constante de temps
to_rl=L_filtre/R_filtre;

%% Correcteurs du générateur solaire
% Correcteur PI de Uc
tauxRC_bus=Rbus*Cbus;
KpUc=10000/Rbus;
KiUc=KpUc/tauxRC_bus;
% Nouvelle constante de temps de Uc
tauxRCcorr=tauxRC_bus/(KpUc*Rbus);

%% Correcteurs de la pompe centrifuge
% Correcteur PI de Imcc
Kpimcc=10*Rmcc;
Kiimcc=Kpimcc*Rmcc/Lmcc;
% Constante de temps électrique
tauximcccorr=Lmcc/(Rmcc+Kpimcc)

% Correcteur P de Omega
CorrP=1;
% Constante de temps mécanique
tauxmeca=J/CorrP

%% Correcteurs du générateur solaire
% Correcteur PI de Uc
KpUc=10000/R
KiUc=KpUc/tauxRC
% Nouvelle constante de temps de Uc
tauxRCcorr=tauxRC/(KpUc*R)

% Correcteur PI de Il
KpiL=1000*r
KiiL=KpiL/tauxrl
% Nouvelle contante de temps
tauxrlcoor=(tauxrl*r)/KpiL

%% Affichage de fin d'initialisation
disp(' ');
disp('*****');
disp('*** Initialisation des paramètres terminée ***');
disp('*****');
disp(' ');
```