

Février 2017



Compte Rendu BE

Gestion de l'Energie Electrique Embarquée

Etude d'un réseau de secours électrique
pour l'aéronautique

Nicolas RECHATIN

5^{ème} Année

Avionique et Commande de vol

CREATEUR DE NOUVELLES MOBILITES



I. Table des matières

A.	ETUDE D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION	2
I.	ANALYSE DU CAHIER DES CHARGES	2
1.	PROFIL DE MISSION PUISSANCE/COURANT AVEC $V_{bus} = 270\text{ V}$	2
2.	CARACTERISTIQUE DU PROFIL	3
3.	ANALYSE DES RESULTATS	3
II.	ETUDE D'UN GENERATEUR HYBRIDE PAC-SC	6
1.	DIMENSIONNEMENT DES CONSTITUANT DU GENERATEUR HYBRIDE	7
2.	ANALYSE DES RESULTATS	9
III.	MODELISATION ET SIMULATION	10
B.	STRATEGIE DE CONTROLE ET GESTION D'ENERGIE.....	12

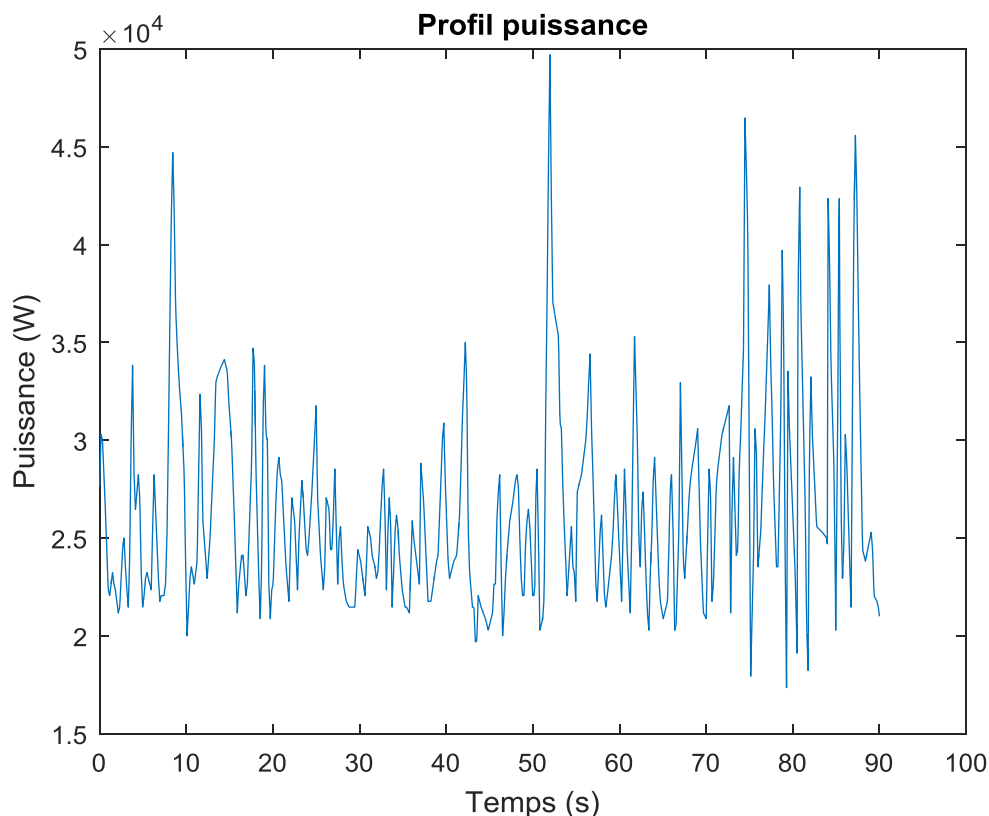
A. Etude d'une chaine de conversion

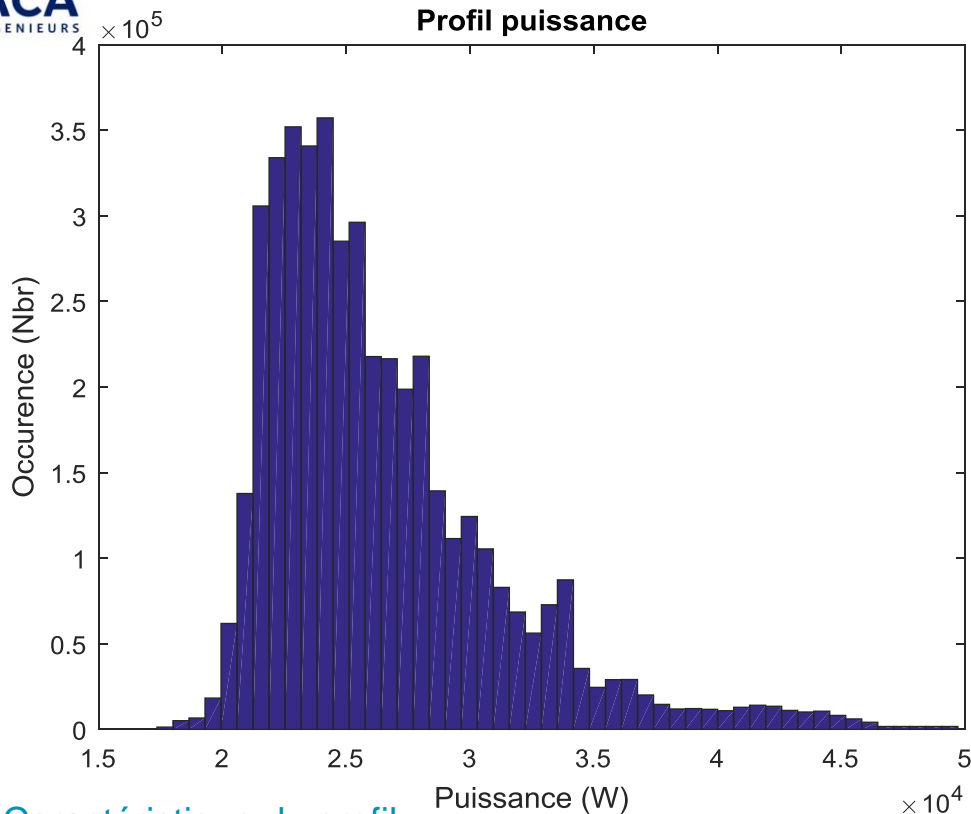
I. Analyse du Cahier des Charges

Notre étude vise dans un premier temps à étudier la charge électrique due à l'utilisation de la RAT d'un aéronef lors d'une mission de secours. La RAT a pour fonction de fournir aux commandes de vol l'énergie nécessaire en cas de perte ou dysfonctionnement sévère du réseau d'alimentation électrique nominal de l'aéronef. Dans cette première partie nous allons étudier le profil de la charge électrique qui doit être soutenue par la RAT lors d'une mission de secours. Après étude du profil et de ces caractéristiques nous tirerons des conclusions quant au type de technologies qui pourront être mise en place pour fournir un système capable de tenir la charge dans les meilleures performances possibles.

1. Profil de mission Puissance/Courant avec $V_{bus} = 270\text{ V}$

Dans un premier temps nous nous intéressons au profil de la charge. On prendra pour V_{bus} la valeur de 270V. On trace alors le profil ainsi qu'un histogramme de la répartition des puissances le long de ce dernier. On obtient naturellement le profil en puissance en multipliant le profil en intensité par la valeur de V_{bus} .





2. Caractéristique du profil

D'après les deux tracés précédents on peut en déduire plusieurs choses qui vont impacter directement le choix de notre solution techniques ainsi que son dimensionnement :

- $P_{moy} = 2,64 \cdot 10^4 \text{ W}$
- $P_{max} = 4,97 \cdot 10^4 \text{ W}$
- $P_{min} = 1,74 \cdot 10^4 \text{ W}$

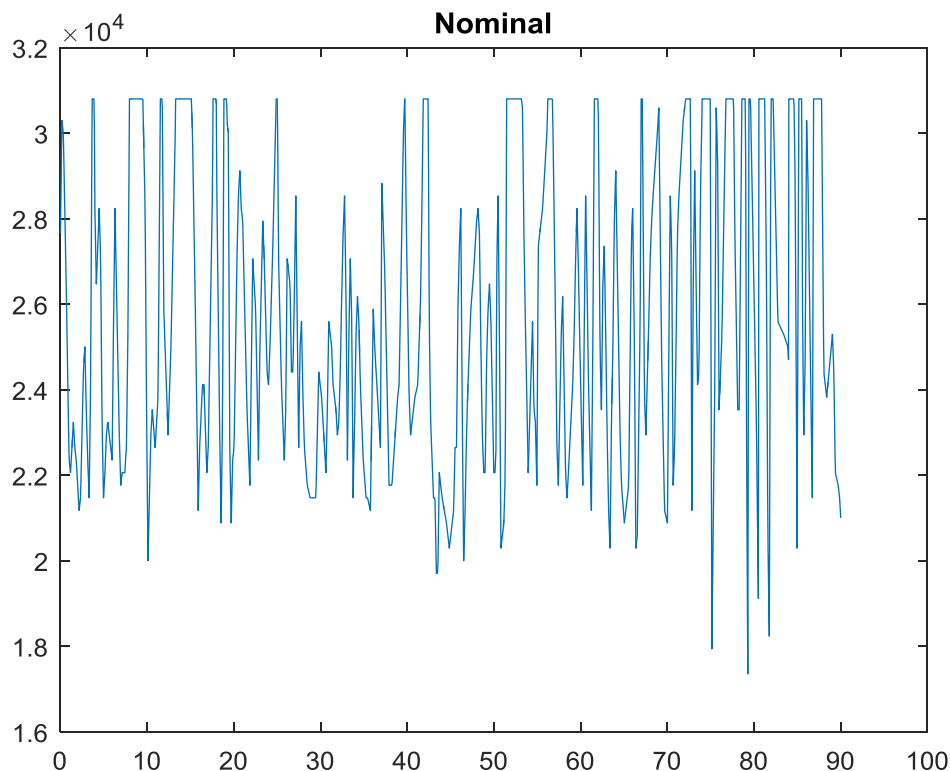
On observe sur ces trois premières caractéristiques du signal que les valeurs min/max sont relativement éloignées de la moyenne. Si on s'intéresse plus en détail à la dynamique du signal on voit sur l'histogramme qu'une grande partie du signal se concentre dans des puissances autour de la moyenne mais qu'à certains moments on observe des pics allant jusqu'au double de la puissance moyenne et plus rarement des instants où la puissance nécessaire baisse considérablement. On observe également que le profil oscille beaucoup. Cette contrainte devra être donc prise en compte

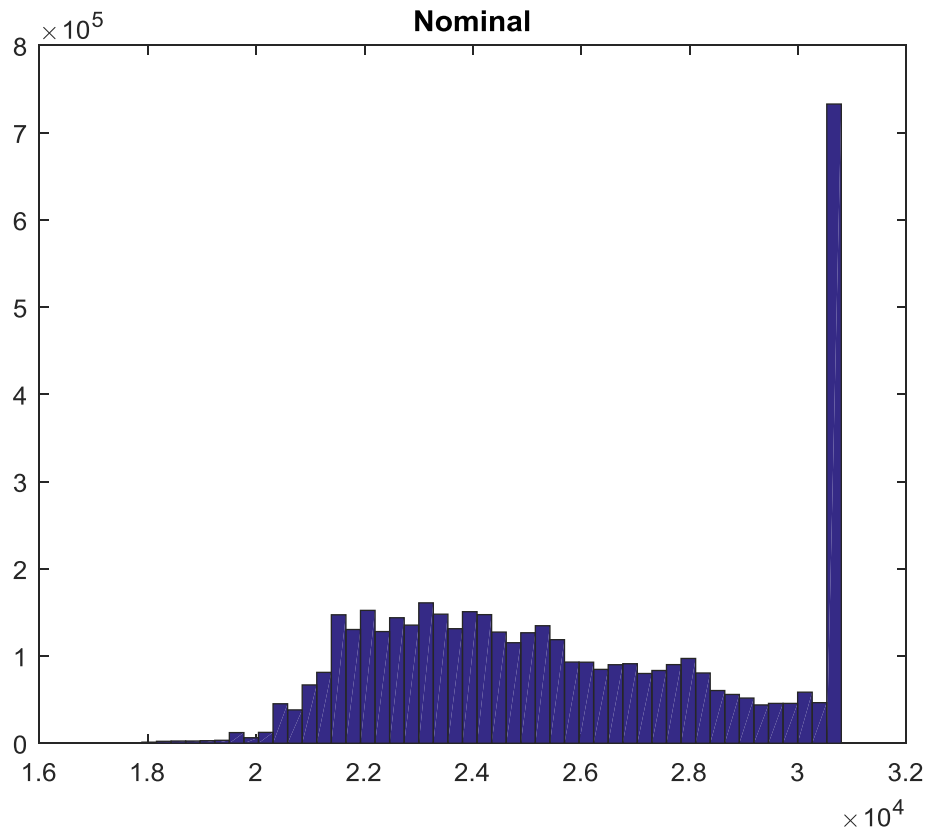
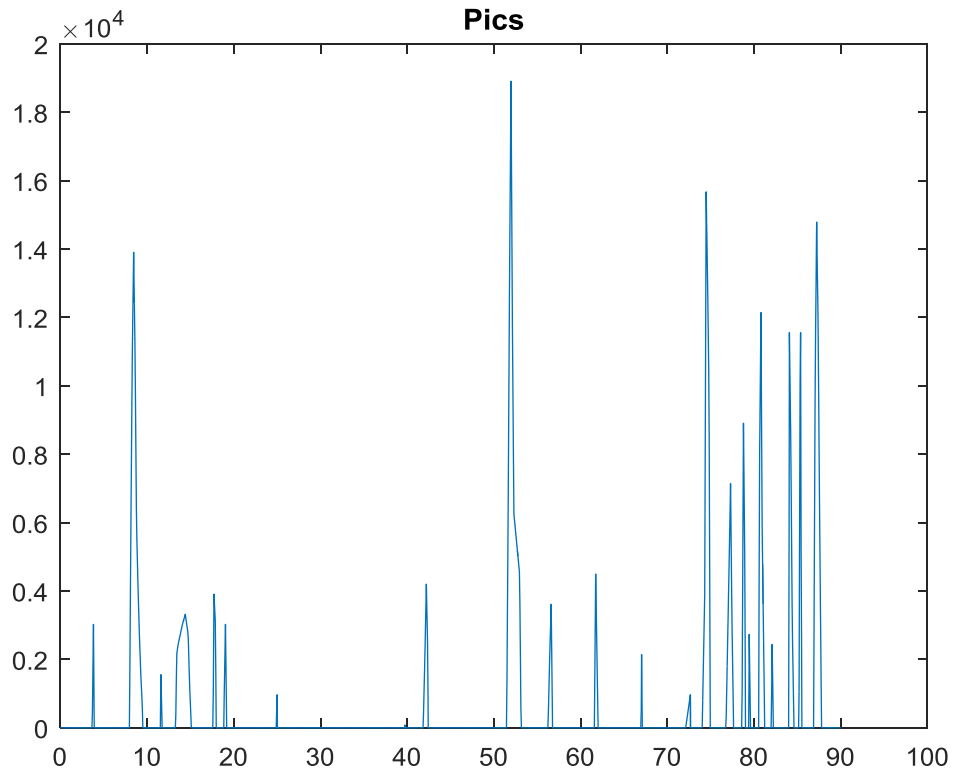
3. Analyse des résultats

De l'observation de ce profil on peut tirer plusieurs conclusions quant au choix de technologie nécessaire et au futur dimensionnement de celle-ci. Au vu de la fonction de la RAT brièvement décrit en début de partie, la puissance nécessaire lors d'une mission de secours se concentre majoritairement autour d'une moyenne. On pourra assimiler cela au besoin nominal de l'avion pour assurer ces fonctions de commande et de navigation. Cependant comme on peut l'imaginer, dans certain cas (trou d'air, manœuvre complexe, atterrissage, etc.) la charge nécessaire des commandes de vol présentera des pics conséquents en besoin de puissance. Ce type de charge est alors illustré par l'histogramme ci-dessus.

On s'intéresse donc de synthétiser et dimensionner un système de GEEE unique ou couplé permettant de délivrer une puissance nominale avec les meilleures performances et robustesse possible tout en permettant d'encaisser les pics sans trop endommager le système. On rappellera que l'utilisation du système dimensionner se fera dans le cas d'une mission de secours d'urgence. On cherche donc à faire le bon choix de système/dimensionnement afin de ne pas sur-dimensionner le système pour tenir tout type de pics sans impacts mais à permettre de garder une certaine intégrité et ne pas changer le système complet après chaque utilisation. Dans une certaine mesure, on s'assurera également que le caractère à forte oscillation du système n'endommagera pas le système. Ou du moins que la constante de temps et donc la réponse du système délivrant l'énergie au commande de vol est acceptable au u des performances attendu pour le système de commande de vols dans la configuration « Mission de secours ».

Comme premier traitement, on va chercher à écrêter le signal afin de séparer le signal « moyen » et les « pics » autour de valeurs de saturation arbitraire afin de démontrer la faisabilité d'un système traitant les 2 type de charges séparément (système couplé).





Suite à ce premier traitement sur le profil du signal on observe que cela concorde avec les conclusions faites de ce dernier. En effet si on regarde le signal « nominal » on observe que les valeurs sont beaucoup plus recentrées autour de la moyenne et que l'écart type est faible. Bien que pour l'instant on est fixé arbitrairement les valeurs de saturation on observe, notamment sur l'histogramme de la partie nominale qu'une grande majorité du signal initial est présent. Ainsi si on compare le signal initial avec les 2 signaux « nominal » et « pics » on a bien séparé un signal recentré autour d'une moyenne, à faible écart type représentant une grande majorité de la charge totale. Et un second signal représentant des valeurs très éloigné de la valeur moyenne, représentant une faible partie de la charge. On voit donc se profiler le dimensionnement d'un système GEEE couplé entre 2 systèmes, chacun capable d'encaisser un des deux signaux pour un système global mieux dimensionner et performant. Ce système Hybride Pile à Combustible / Super Capacitor sera l'objet de la suite de cette étude.

II. Etude d'un générateur Hybride PàC-SC

Au vu de l'analyse du profil de la charge on optera donc pour un choix de technologie reposant sur une hybridation entre deux technologies, chacune jugé plus optimal pour les 2 typer d'utilisation extraite dans la partie précédente du profil de la charge.

On choisira l'hybridation entre Pile à Combustible et Super Capacitor. La pile à combustible semblant un bon choix pour répondre à la majeure partie de la charge nécessitant une bonne durée de vie pour une grande utilisation, un bon rapport puissance/volume/coût/poids. La limite de la PàC se faisant sentir sur des pics de la charge de par sa faible constante de temps (Réaction Chimique). De plus on dimensionne une pile en fonction de la puissance maximale nécessaire. L'utilisation de cette dernière pour les pics de charge amènerais donc naturellement à un surdimensionnement de la PàC et des excès de cout/volume et poids.

A l'inverse les Super Capacitor semble une technologie adéquate pour les pics du profil de la charge. En effet bien qu'il soit compliqué de les utilisé pour la majeure partie de la charge (durée de vie, taux d'utilisation, etc.) le rapport volume/cout/poids pour des pics important de la charge est bien plus intéressant que pour la pile à combustible le dimensionnement de ces derniers se faisant plus en terme de taux d'utilisation. Ainsi on peut garantir de fournir des grande capacité d'énergie avec une constante de temps très faible quand le système en a besoin tout en garantissant les performances et la durée de vie du système global en régulant le taux d'utilisation des Super Capacitor

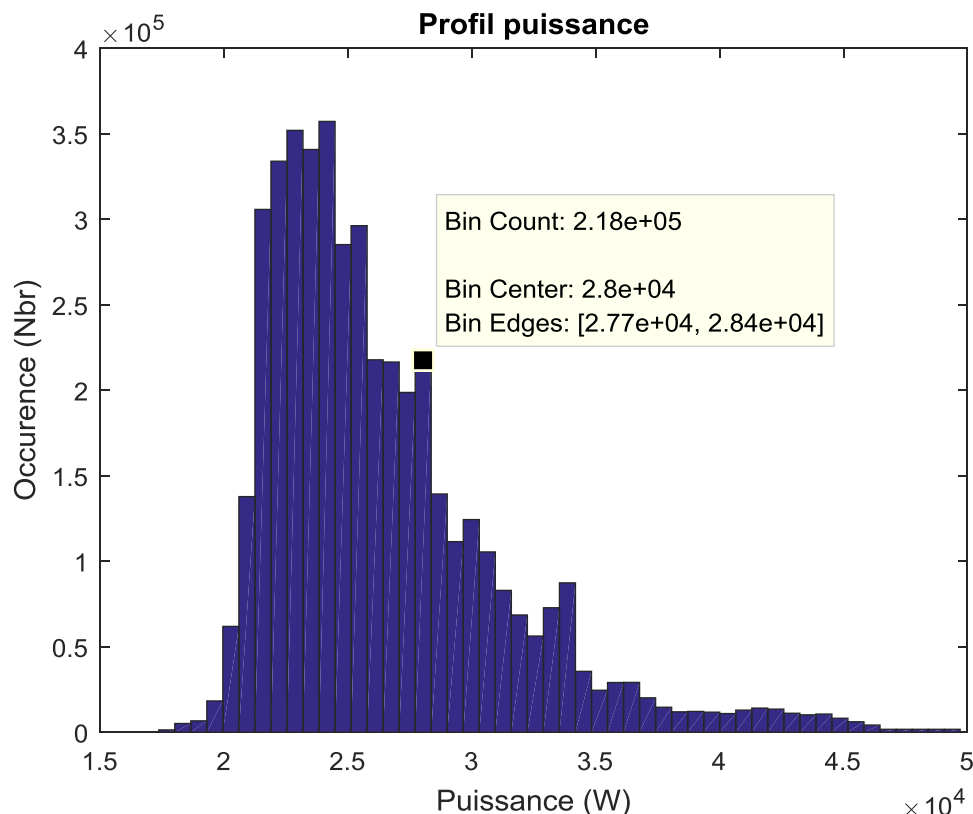
NB : Dans la suite de ce rapport, « SC » fera référence au Super Capacitor et « PAC » à la Pile à Combustible.

1. Dimensionnement des constituant du générateur hybride

Maintenant que nous avons choisi la technologie que nous mettrons en place pour répondre au cahier des charges de la RAT nous allons nous intéresser au dimensionnement de deux technologies de notre système hybride. Comme exposé plus haut, on a séparé la charge en 2 signaux à partir d'une valeur jusqu'alors « arbitraire ». On considèrera maintenant cette valeur comme notre « Coefficient de Dimensionnement », noté **CD**. En accord avec l'analyse faite auparavant, ce CD représente le seuil auquel on va dédier la PAC ou les SC à une valeur de charge donné. Ainsi ce CD permet d'ajuster les taux d'utilisation de chacune des deux technologies, paramètre important comme cité plus haut. Plutôt que de tester des valeurs arbitrairement fixés, une sur-dimensionnante et une sous-dimensionnante On cherchera dans un premier temps à optimiser la valeur de ce CD en fonction des histogrammes de la charge et des taux d'utilisation que l'on veut fixer. Le but est de trouver un équilibre entre les charges dédiées au SC et à la PAC pour minimiser le Cout/Volume & Poids du système global. Tout en gardant les meilleures performances. Il est à noter que ce CD dépendra du profil de la charge et que dans le cas d'une utilisation ultérieure on s'intéressera à nouveau à une étude d'optimisation du CD pour le profil donné.

a) Choix du Coefficient de Dimensionnement

On se réfère alors à l'histogramme de la décomposition de la puissance de la charge sur l'ensemble du profil. On cherche donc à choisir le seuil à partir duquel la puissance sera rebasculé de la PAC vers les SC.



On choisit donc comme seuil la valeur pointer sur l'histogramme ci-dessus. En effet ce point représente une première fracture dans le rapport Puissance/Occurrence. Ainsi toute la partie avec une puissance inférieure à ce point correspond à une majorité centrée sur la moyenne et ce qui excède cette puissance correspond à une mineur partie de la charge pour des puissances élevées.

Ainsi, comme on fixe $P_{PAX_{MAX}} = CD \cdot P_{CH_{MOY}}$ alors $CD = \frac{P_{PAX_{MAX}}}{P_{CH_{MOY}}}$

Alors on prendra

$$CD = 1.0598$$

A partir de ce choix on déroule alors les différents calculs menant au dimensionnement de la PAC et des SC en fonction de la charge

a) Coefficient Pile à Combustible (PAC)

Coefficient	Valeur	Formule	Commentaire
$P_{PAX_{MAX}}$	$3,08 \cdot 10^4$ W	$(1 + 0.1) \cdot CD \cdot P_{CH_{MOY}}$	On prend en compte le rendement
$V_{PAC_{MAX}}$	180 V	$V_{PAC_{MIN}} \cdot 2$	$V_{BUS_{ref}} = 270$ V
$V_{PAC_{MIN}}$	90 V	$\frac{V_{BUS_{ref}}}{3}$	$V_{BUS_{ref}} = 270$ V
$I_{PAC_{MAX}}$	342.21 A	$\frac{P_{PAX_{MAX}}}{V_{PAC_{MIN}}}$	////////////////////////////////////
Coût	3079.9 €	100 € / kW	On utilise les données du CdC
Volume	12.32 L	2.5 kW/L	On utilise les données du CdC
Poids	30.79 Kg	1 kW / Kg	On utilise les données du CdC

b) Coefficient Super Capacitor (SC)

Coefficient	Valeur	Formule	Commentaire
$P_{SC_{MAX}}$	$2.08 \cdot 10^4$ W	$(1 + 0.1)P_{CH_{MAX}} - P_{PAC_{MAX}}$	On prend en compte le rendement
$E_{SC_{MAX}}$	$1.29 \cdot 10^5$	$P_{SC_{MAX}} \cdot 3.1 \cdot 2$	////////////////////////////////////
$V_{SC_{MIN}}$	90 V	$\frac{V_{BUS_{ref}}}{3}$	$V_{SC_{MAX}} = V_{SC_{MIN}} \cdot 2 = 180$ V
$I_{SC_{MAX}}$	231.09 A	$\frac{P_{SC_{MAX}}}{V_{SC_{MIN}}}$	////////////////////////////////////
$C_{SC_{MIN}}$	5.31	$\frac{4}{3} \cdot \frac{E_{SC_{MAX}}}{V_{SC_{MAX}}^2}$	////////////////////////////////////
Coût	831.91 €	40 € / kW	On utilise les données du CdC
Volume	1.04 L	20 kW/L	On utilise les données du CdC
Poids	1.04 Kg	20 kW / Kg	On utilise les données du CdC

2. Analyse des résultats

Du calcul de ces coefficients on peut tirer différentes conclusions à notre première étape de dimensionnement de notre système hybride. Dans un premier temps on observe que la PAC et les SC sont dimensionner sur la même plage de tension min/max (90v - 180V) et qu'en sortie, la puissance maximale pouvant être fournis par les 2 technologies ont le même ordre de grandeurs. La différence principale entre l'utilisation de chacune des technologies est donc principalement basé sur la constante de temps et le taux d'utilisation requis.

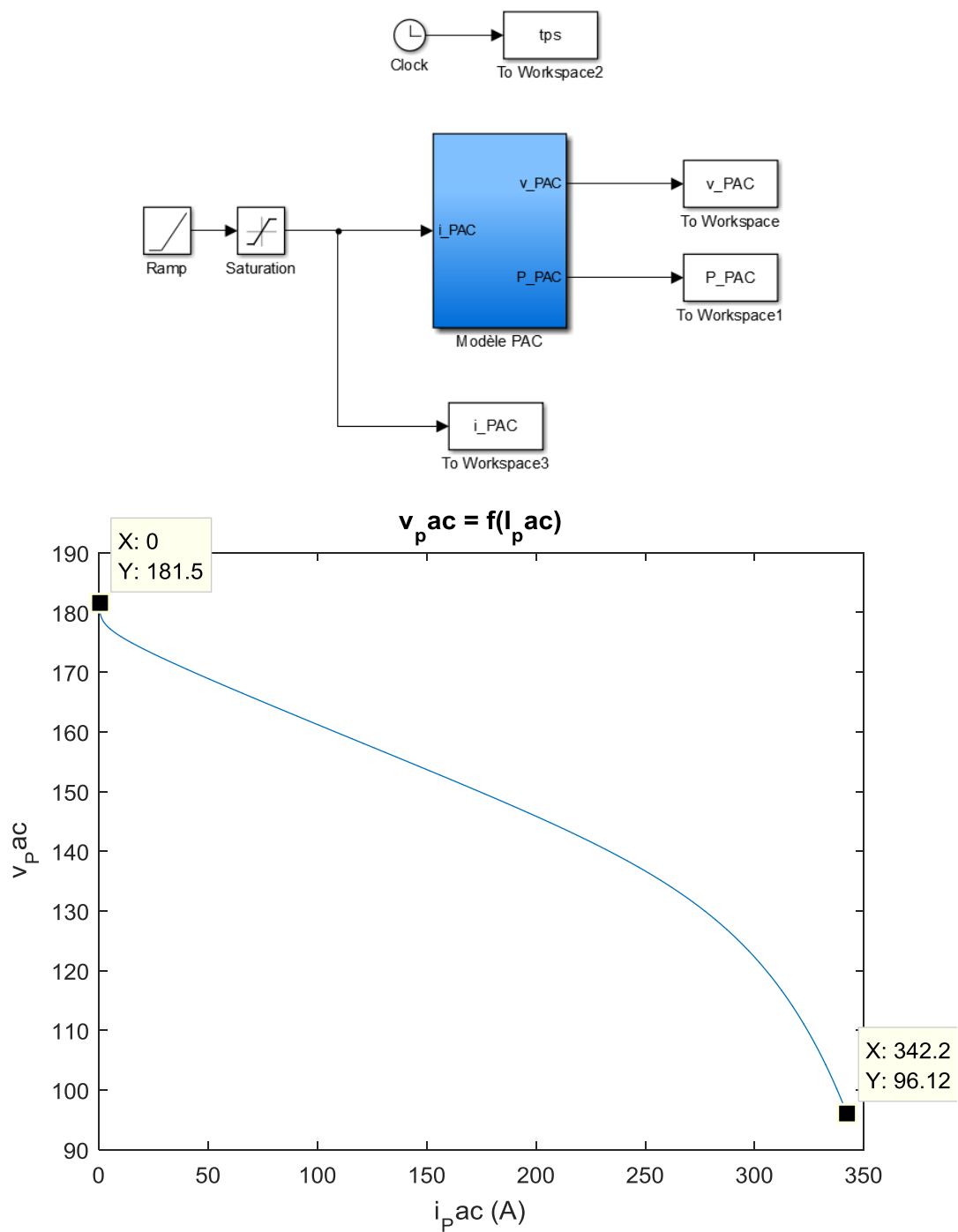
Une autre observation peut être faite sur les résultat du Coût/Volume/Poids pour les SC. En effet ces derniers sont capables de fournir une puissance maximale avoisinant celle de la PAC pour un encombrement et un poids minime. Dans le cas d'une technologie hybride il est normal de se demander si l'hybridation à une vraie raison d'être en dépit de la complexité qu'elle engendre. Ici on observe que l'ajout de SC complète parfaitement le système en terme de « boost » sur la puissance délivrer tout en affectant que très peu le poids et le volume du système global (environ 10% du volume et 3% du poids). On fait d'autre part le constat qu'augmenté très légèrement les performances de la PAC aurais couté (en prix, mais en volume et masse également) bien plus que d'avoir recours au SC du fait de ces contraintes de dimensionnement.

Après plusieurs itérations sur le coefficient de dimensionnement on s'aperçoit réellement que toute augmentation ou diminution du taux d'utilisation de la PAC et des performances inhérentes impact beaucoup les résultats sur le Coût, le Volume et le Poids de cette dernière. Cela souligne une fois de plus l'importance de l'optimisation du CD lors du pré-dimensionnement qui permet de bien définir la répartition de la charge sur les deux technologies présente dans le système.

III. Modélisation et Simulation

On s'intéresse maintenant à vérifier le dimensionnement et l'implémentation de la PAC et des SC. Pour cela on utilise le modèle de la PAC et des SC fournie et on implémenter les différents coefficients présents dans le cours et ceux calculer précédemment.

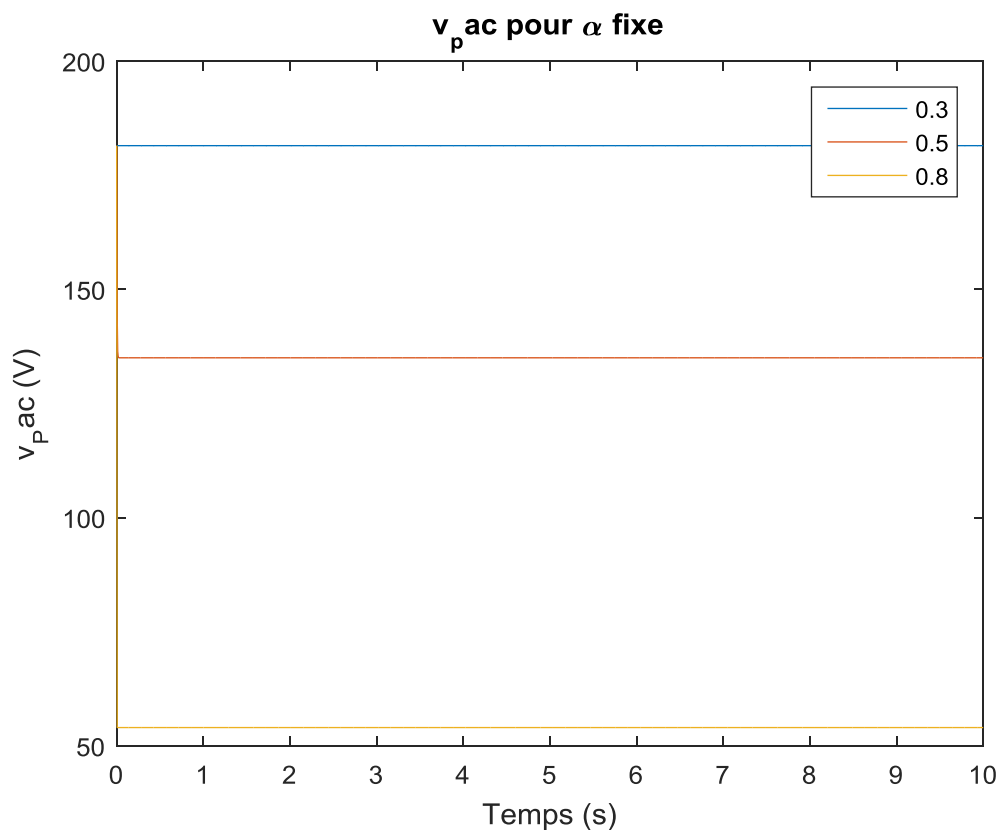
On trace alors la courbe caractéristique $V=f(I)$ afin de la comparer au résultat attendu



Ici pour la PAC on s'aperçoit alors que le résultat observé en simulation correspond avec celui attendu. En effet le calcul nous à amener à calculer plage de tension allant de 90 à 180 V et un courant max dans la PAC de 342 A. On observe alors bien ces résultats sur la courbe caractéristique avec de très légères variations.

- $V_{PAC_{MAX}} = 181.5 \text{ V}$ (Proche des 180V attendu)
- $V_{PAC_{MIN}} = 96.12 \text{ V}$ (Proche des 90V attendu)
- $I_{PAC_{MAX}} = 342 \text{ A}$

Après avoir vérifié nos modélisation de la PAC et des SC on s'intéresse au rôle du rapport cyclique α sur les tension en sortis des convertisseurs.



On observe donc que le rapport cyclique α à un impact sur la tension en sortie de la PAC (et des SC de manière analogue). En effet ce rapport cyclique pourra donc être modifié afin de commander la tension en sortie des modèles de la PAC et des SC. Plus le rapport cyclique est élevé, plus on abaisse la tension moyenne en sortie.

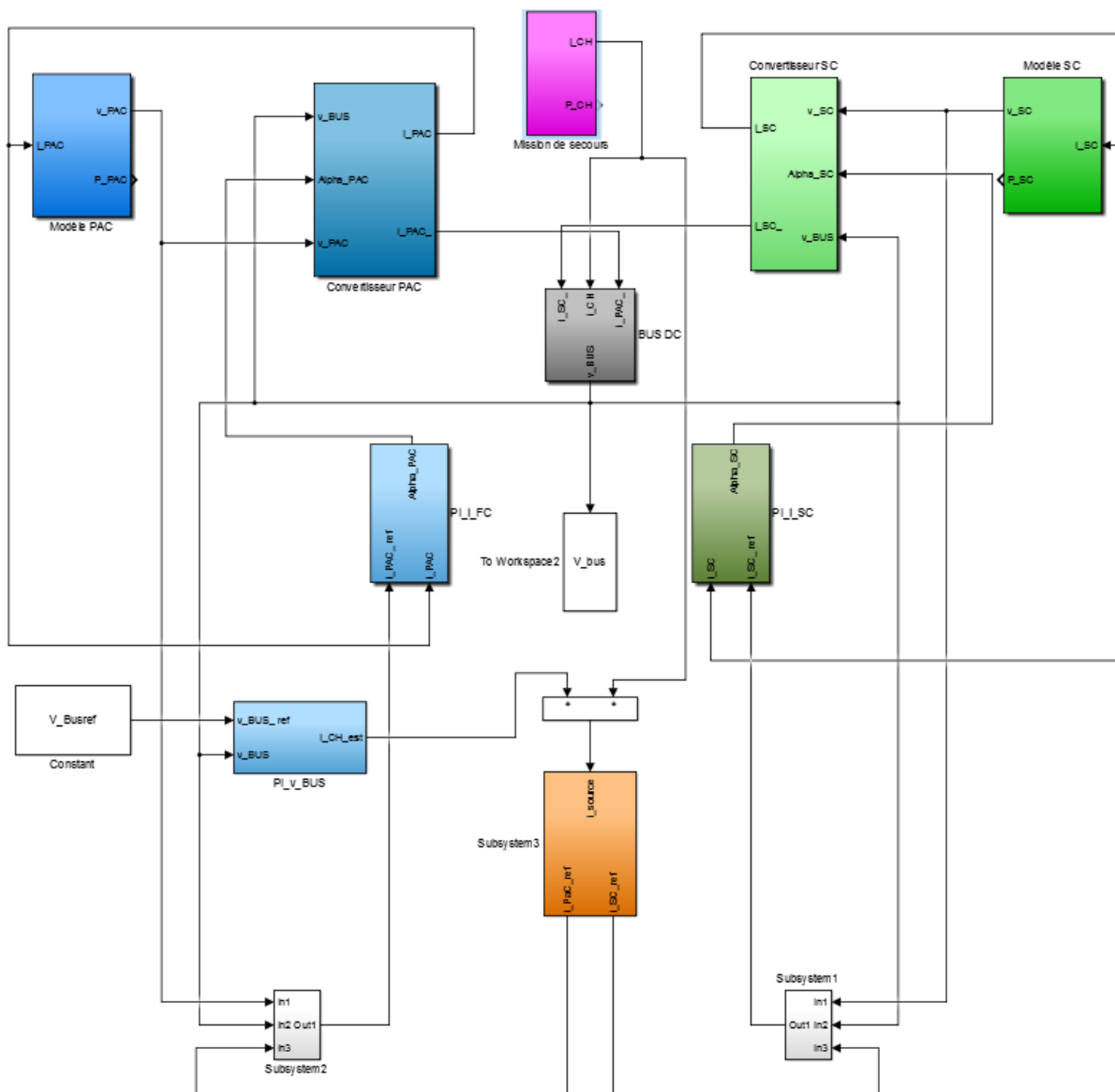
Après avoir réalisé cette étude, on s'intéresse maintenant au système hybride complet et plus particulièrement à la stratégie de contrôle et de gestion de la charge entre les deux technologies dimensionnées précédemment.

B. Stratégie de contrôle et gestion d'énergie

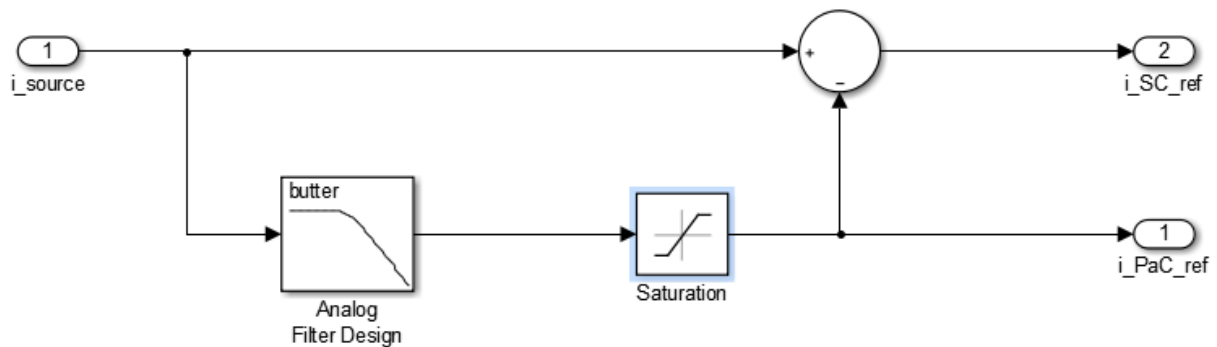
Le but de la synthèse d'une stratégie de contrôle et de gestion de la répartition de la charge au sein du système comme soulevé plus haut est un des axes principaux d'amélioration des performances et du dimensionnement d'un tel système GEE hybride.

Pour tester nos stratégies de contrôle et de gestion on réalise dans un premier temps les schémas de simulation complet du système hybride. On implémente comme stratégie l'utilisation d'un filtre passe bas suivi d'une saturation qui vas diviser la consigne en signaux assigné à la PAC ou au SC en fonction de l'intensité et de la dynamique du signal initial

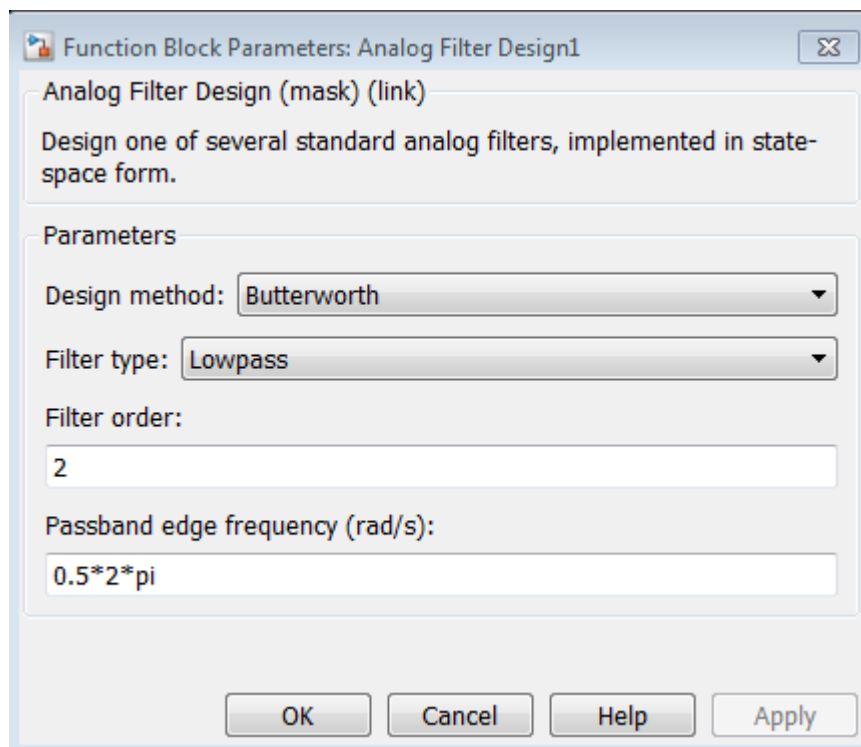
Modèle complet



Subsystem 3

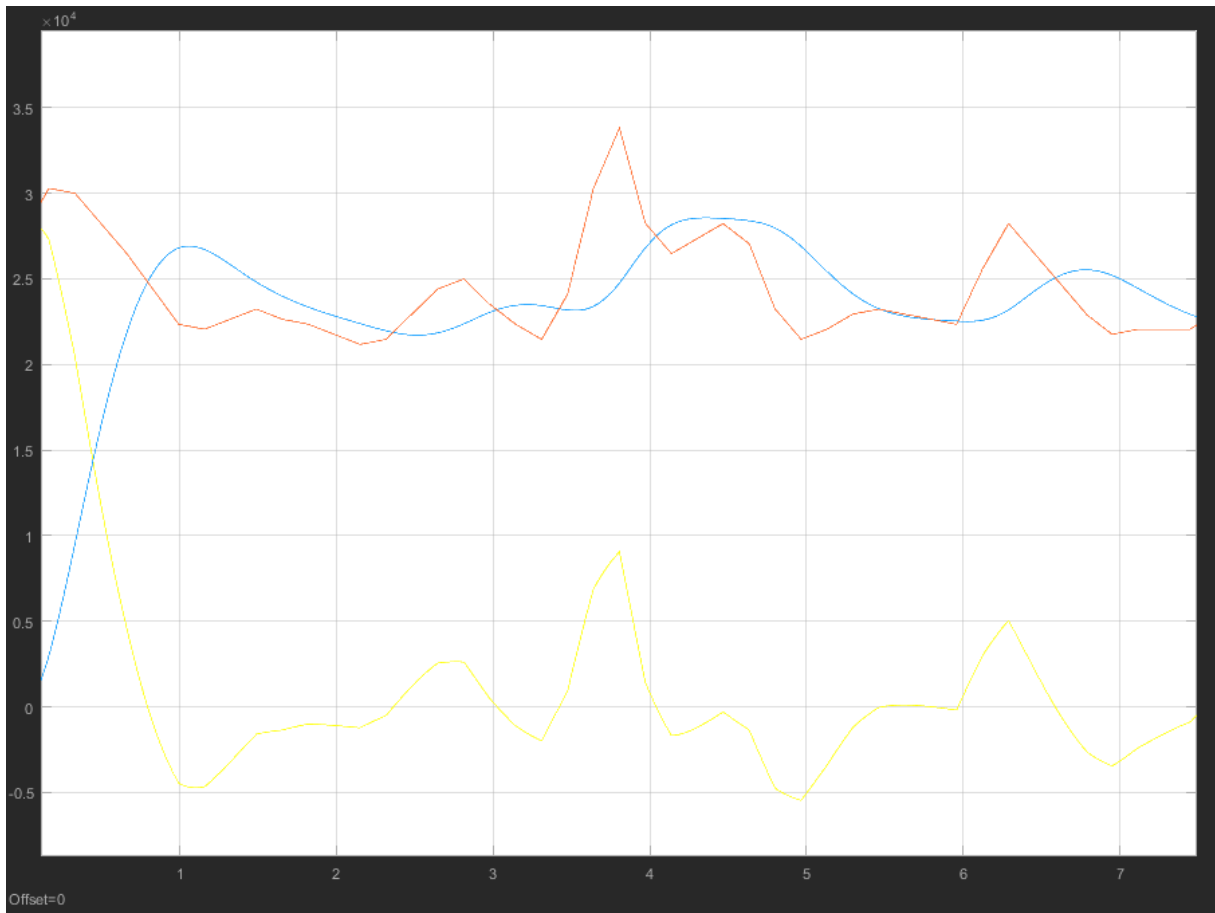
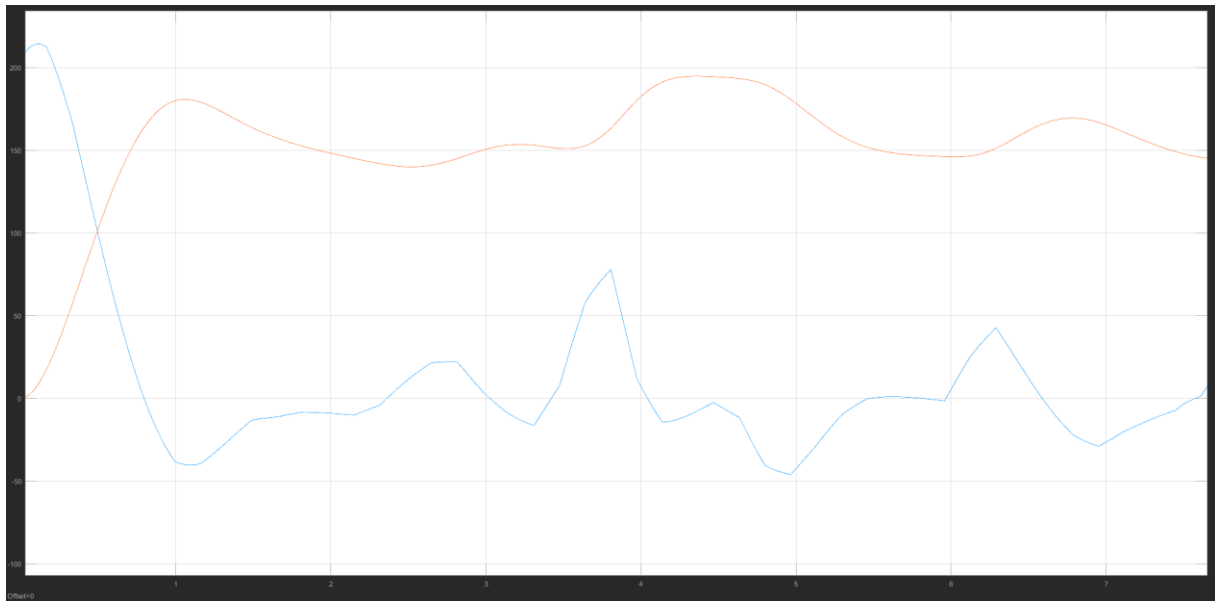


On a donc réalisé le schémas complet en implémentant chaque bloc ainsi qu'en réalisant les différentes boucles de commandes de courant et de tension au sein du modèle global. C'est ensuite le Subsystem3 (en orange au centre) qui récupère les données de la partie PAC et de la partie SC et ensuite réalisé la stratégie de gestion et le contrôle de la séparation de la charge entre SC et PAC.



On implémente donc dans un premier temps le filtre passe bas en amont d'une saturation à $I_{PAC_{MAX}}$

Ainsi on définit dynamiquement un seuil au-delà duquel les SC se déclenche pour fournir le supplément de puissance nécessaire à la tenue de la charge du système.



Sur les courbes ci-dessus on peut observer la réponse du système global SC/PAC. On peut voir sur les courbes de la PAC et des SC (Bleu et Rouge) que la dynamique de la paque reste lent et ne subit pas de trop grosse charge lors des pics. On peut également voir que simultanément la charge délivrée au SC augmente rapidement lors des pics pour permettre au système de suivre le besoin en puissance.

Notre stratégie de contrôle et de gestion de l'énergie bien que non optimal rempli sa fonction de séparation de la charge entre les 2 technologies qui la compose et les résultats obtenus sont satisfaisant au regard de ceux escompté.

On pourra pour optimiser le système revoir l'utilisation du filtre passe bas. En effet ce dernier permet de fixer un seuil mais ne prend pas en compte la dynamique du système. La PAC n'étant pas dimensionné pour de très forte oscillation on pourrait proposer une stratégie utilisant des « Rate Limiter » permettant de couplé à la saturation une contrainte sur la dynamique du signal d'entrée et de basculé sur les SC quand de trop fortes oscillation se présentent.

Une autre stratégie qui pourra être proposer serais de développer un algorithme dédié au moyen de « MatLAB Function » qui permet un contrôle très précis de la charge sur les SC et sur la PAC. Un des inconvénients serais alors le temps de développement nécessaire ainsi que la gestion de signaux très complexe (plus de complexité dans l'algorithme). On pourrait alors combiner les technologies de filtres et de rate limiter ainsi que gérer des cas très particulier au seins de cet algorithme. On pourrait également envisager l'utilisation des deux premières stratégies comme moyen de pré-dimensionnement menant à l'utilisation postérieur d'un algorithme pour affiner en accord avec le système pré-dimensionné

On peut donc conclure à la suite de cette étude que la gestion de l'énergie dans un système pour répondre à une charge est un problème complexe qui recours parfois à des système hybride pour satisfaire au mieux le besoin et éviter le surdimensionnement. En effet avoir recours uniquement à des SC ou à une PAC pour la charge traitée dans cette étude aurais mené soit à un système avec des performances bien moins satisfaisante soit à un surdimensionnement et donc des pertes en Coût/Volume/Poids.

Cependant dans le cas d'un recours à une technologie hybride comme celle traiter dans notre étude, amène une grande complexité de synthèse et le temps et les coûts due à son développement sont à prendre en compte. En tant que futur ingénieurs, il faut savoir ou faire des choix et apprendre à les faire dans les meilleures conditions. Que cela soit dans les choix de développement (valeur, fonction, méthode) et également dans les stratégies et les process adopté pour répondre à un cahier des charges. Cette étude a pleinement illustré cet aspect à tous les niveaux