



# Modélisations : Analyse d'un modèle de composant et exemples de modifications pour l'adapter aux besoins

publié le 27/04/2020 - mis à jour le 17/11/2020

L'unique modèle de hacheur ne permet pas de simuler la diversité des hacheurs réels

## Descriptif :

Plusieurs adaptations du modèle de hacheur sont nécessaires pour que le fonctionnement soit plus réaliste et qu'il soit possible de commander, au plus près des solutions réelles, un moteur à courant continu dans les deux sens de rotation.

## Sommaire :

- 1- Position du problème :
- 2- Première adaptation du modèle de simple hacheur :
- 3- Seconde adaptation du modèle de simple hacheur :
- 4- Réalisation de 2 modèles de hacheur pouvant commander un moteur dans les 2 sens :
- 5- Documents ressources liés à cet article :

Troisième volet d'une série de 7 articles amenant à maîtriser la modélisation de composants de la chaîne d'énergie et de la chaîne d'information dans le but d'effectuer la simulation d'un asservissement numérique de position la plus précise possible afin que le comportement réel soit totalement prévisible.

**Plusieurs adaptations du modèle du hacheur sont nécessaires pour que le fonctionnement soit plus réaliste et qu'il soit possible de commander, au plus près des solutions réelles, un moteur à courant continu dans les deux sens de rotation.**

**Note** : Contrairement aux deux modèles vus précédemment (*le réducteur et le moteur (la machine) à courant continu*) fonctionnant totalement en ACAUSAL, le hacheur n'est pas un pur élément de la chaîne d'énergie car il n'est pas uniquement constitué d'entrées **effort** et **flux**. Il faut donc le modéliser différemment. Si on l'oublie, Sinusphy se chargera de signaler quelles sont les équations qui posent problème avec le message d'alerte "**Les relations suivantes semblent ne pas être linéaires ...**" dans une boîte de dialogue.

**Rappel** : En mode ACAUSAL, toutes les entrées **effort** et **flux** sont modifiées pour obtenir, à chaque instant, un nouvel équilibre. Prenons l'exemple d'une chaîne d'énergie classique comportant une alimentation, un moteur électrique, un réducteur et une charge ; Si la charge évolue, les différents couples vont être recalculés, ce qui jouera sur l'intensité, qui interviendra sur la force électromotrice, donc sur les vitesses, modifiant en conséquence, les différents couples...

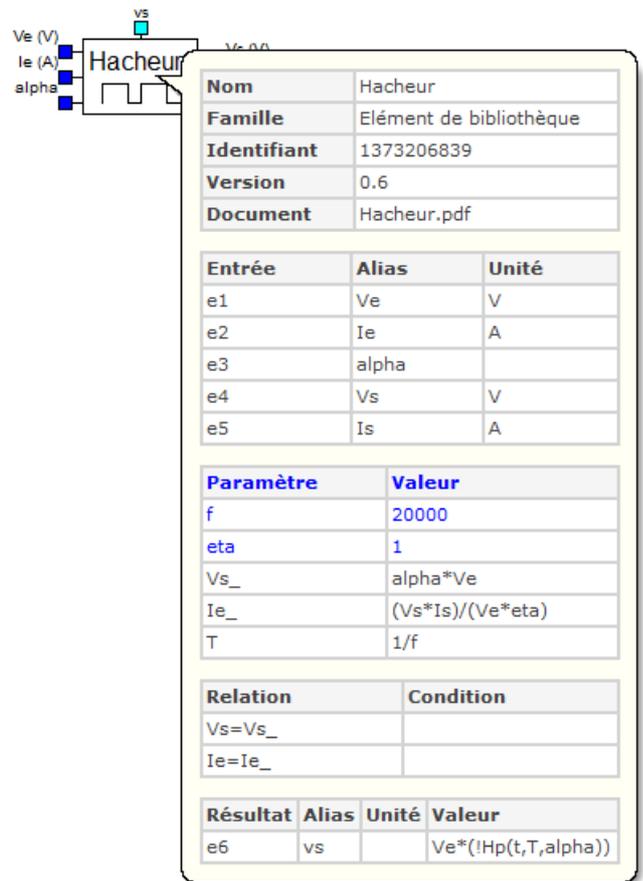
## ● 1- Position du problème :

► Comme on peut le voir ci-contre :

- L'unique modèle de hacheur, objet de cette étude, ne limite pas la valeur de l'entrée **alpha** à l'intervalle **[0, 1]** (comme c'est le cas dans la plupart des hacheurs réels où le rapport cyclique, support de l'information alpha,

varie de 0 à 100%)

- Il ne calcule pas la valeur du rendement à partir des valeurs des grandeurs électriques, ce qui demande du recul pour choisir une valeur proche de la réalité.
- Par ailleurs, il n'est pas possible de commander un moteur à courant continu dans les 2 sens de rotation, sauf en trouvant comme biais de "jouer avec le signe de alpha"...



► Avec l'expérience :

- Sur les systèmes réels, la tension de sortie du hacheur est toujours légèrement inférieure à la tension d'alimentation, du fait des chutes de tension dans les transistors, et baisse légèrement lorsque l'intensité augmente,
- Il est souvent nécessaire de commander un moteur à courant continu dans les deux sens de rotation, soit à l'aide d'une seconde commande indépendante (*appelée sens*), soit en se contentant de la seule entrée alpha, avec un changement de sens de rotation autour de la valeur centrale ( $alpha = 0,5$ ),
- Dans la simulation d'une "boucle d'asservissement", la valeur de alpha sort régulièrement de l'intervalle [0, 1] si on n'utilise pas, par exemple, de composant saturation. On peut alors obtenir, soit des tensions de sortie plus élevées que l'alimentation, soit des tensions négatives, ce qui n'est pas réaliste. Pour simplifier la prise en main par les élèves, il est préférable de limiter alpha directement dans le modèle du hacheur,

► Il n'est pas nécessaire de réaliser toutes les variantes de hacheurs. Deux modèles de hacheurs vont être créés afin de répondre aux principaux besoins.

● 2- Première adaptation du modèle de simple hacheur :

► Dans un premier temps, l'adaptation effectuée a pour but de clarifier la méthode permettant un fonctionnement mixte (*ACAUSAL pour les tensions et courants et CAUSAL pour l'entrée alpha*).

- L'adaptation ci-contre montre que :
  - Le paramètre **alpha\_ = alpha** permet d'interdire la modification de alpha lors des calculs.
  - Remarquer que alpha n'est pas limité, ici, à l'intervalle [0, 1]
  - **Vs = alpha\_ \* Valim** sera logiquement accepté car l'équation est bien linéaire car alpha\_ reste constante à chaque pas de calcul
  - **Ialim = alpha\_ \* Is** idem...
  - **vs = Valim\*(!Hp(t, T, alpha))** permet de visualiser la forme de la tension
  - Remarquer que le rendement est, ici, de 100%

### ● 3- Seconde adaptation du modèle de simple hacheur :

► Dans un deuxième temps, de nouvelles adaptations vont être effectuées afin d'approcher, au plus près, le fonctionnement des hacheurs réels.

- La gestion de l'écrêtage de alpha, l'occasion de découvrir quelques fonctions mathématiques de Sinusphy :
  1.  $\alpha\_ = \text{if}(\alpha > 1, 1, \text{if}(\alpha < 0, 0, \alpha))$
  2.  $\alpha\_ = \text{clamp}(\alpha, 0, 1)$  bien plus simple donc retenu ici !

- La prise en compte des chutes de tension dans les transistors d'un hacheur :
  - La tension de déchet (*notée Vd*), due aux chutes de tension dans les transistors est de l'ordre de 0,5 V (*valeur dépendant de la technologie*) en négligeant, ici, la légère augmentation de la tension de déchet en fonction de l'intensité,
  - $V_{smax} = \max(V_{alim} - V_d, 0)$  pour que  $V_{smax}$  soit à 0V si la tension d'alimentation tombe à 0V
  - $V_s = \alpha\_ * V_{smax}$
  - $I_{alim} = \alpha\_ * I_s$
  - Le rapport  $(V_{alim} - V_d) / V_{alim}$  correspond au rendement

Ci-dessous, le schéma de test de ce hacheur simple (*avec un seul sens de rotation possible*) :

<b>Nom</b>	Hacheur V2		
<b>Famille</b>	Elément de bibliothèque		
<b>Identifiant</b>	1587843582		
<b>Version</b>	0.2		
<b>Document</b>	Hacheur.pdf		

Entrée	Alias	Unité
e1	Valim	V
e2	Ialim	A
e3	alpha	
e4	Vs	V
e5	Is	A

Paramètre	Valeur
f	20000
T	1/f
alpha_	alpha

Relation	Condition
Vs=alpha_*Valim	
Ialim=alpha_*Is	

Résultat	Alias	Unité	Valeur
e6	vs	V	Valim*(!Hp(t, T, alpha))

**Informations**  
Modèle réalisé conformément à la méthode annoncée :  
1) alpha n'est ni un effort, ni un flux mais un coefficient qui ne doit pas être modifié. Pour éviter de le modifier, la solution consiste à le recopier dans un paramètre alpha\_  
2) Ialim est la valeur moyenne de ialim(t) qui n'est égale à l'intensité is(t) que lorsque les transistors conduisent. On considère que Is est continue car sa forme est lissée par le circuit R-L du moteur associé à la diode de roue libre. D'où Ialim = alpha \* Is.

<b>Nom</b>	Hacheur V3		
<b>Famille</b>	Elément de bibliothèque		
<b>Identifiant</b>	1587843259		
<b>Version</b>	0.1		
<b>Document</b>	Hacheur.pdf		

Entrée	Alias	Unité
e1	Valim	V
e2	Ialim	A
e3	alpha	
e4	Vs	V
e5	Is	A

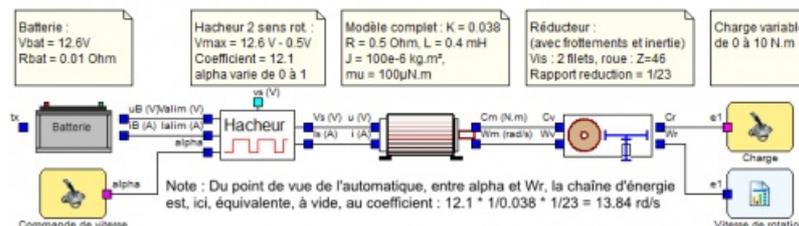
Paramètre	Valeur
f	20000
Vd	0.5
T	1/f
alpha_	clamp(alpha, 0, 1)
Vsmax	max(Valim-Vd, 0)

Relation	Condition
Vs=alpha_*Vsmax	
Ialim=alpha_*Is	

Résultat	Alias	Unité	Valeur
e6	vs	V	Vsmax*(!Hp(t, T, alpha))

**Informations**  
Modèle réalisé conformément à la méthode annoncée et au plus proche du réel :  
1) alpha n'est ni un effort, ni un flux mais un coefficient qui ne doit pas être modifié. Pour éviter de modifier alpha, la solution consiste à le recopier dans un paramètre nommé alpha\_ c'est l'occasion de limiter les valeurs de alpha à l'intervalle [0, 1]  
2) Ialim est la valeur moyenne de ialim(t) qui n'est égale à l'intensité is(t) que lorsque les transistors conduisent. On considère que Is est continue car sa forme est lissée par le circuit R-L du moteur associé à la diode de roue libre. D'où Ialim = alpha \* Is.  
3) Le rendement est déduit du rapport  $(V_{alim} - V_d) / V_{alim}$  où  $V_d$  = tension de déchets. Ce qui démontre l'intérêt d'avoir une tension d'alimentation la plus élevée possible.

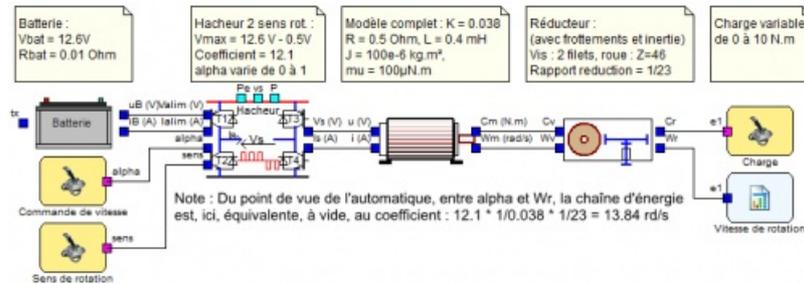
### Exemple de chaîne d'énergie commandée par un hacheur simple



### ● 4- Réalisation de 2 modèles de hacheur pouvant commander un moteur dans les 2 sens :

► Lorsque l'on désire **créer un composant nouveau**, il est conseillé de travailler directement dans Sinusphy afin de le **mettre au point dans un schéma de test**. Il faut commencer par définir les entrées/sorties, puis les paramètres et enfin les équations. Ensuite, lorsqu'il est au point, **il peut être converti en composant réutilisable** et ouvert par l'éditeur de composants de Sinusphy, pour le **styler, le documenter et le placer dans la bibliothèque**.

► Dans un premier temps, nous allons étudier le résultat de cette méthode utilisée pour la création d'un nouveau type de hacheur basé sur un pont en H et commandé, comme dans la majorité des cartes hacheurs réelles, par deux entrées, l'une pour le rapport cyclique, (*variant entre 0% et 100%*) et l'autre pour le sens (*valeur binaire 0 ou 1*)



- On voit que ce composant mixte a, de part et d'autres, les grandeurs effort (*tension*) et flux (*courant*) et deux entrées de commande (*alpha et sens*)
- Le schéma de test est volontairement le même que précédemment afin de pouvoir lui faire confiance.
- Ce qu'il faut vérifier, c'est la cohérence au niveau des efforts et flux et le bilan de puissances.

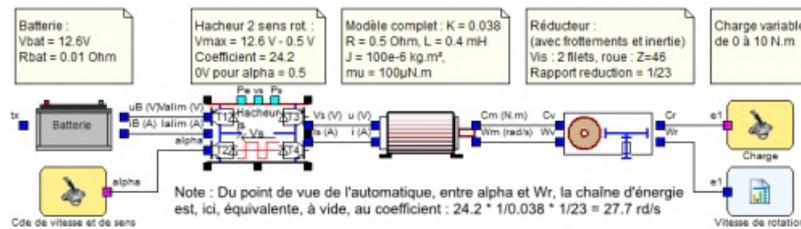
► Analyse de quelques points importants :

- **signe\_ = round(clamp(sens,0,1))\*2-1**  
avec cette équation, le paramètre signe\_ vaudra -1 si sens est inférieur à 0.5 sinon signe\_ vaudra 1
- **Vs=alpha\_\*signe\_\*Vsmax**  
Avec tous les traitements préparatoires, Vs ne dépend plus que des paramètres
- **Ialim=alpha\_\*abs(Is)**  
Ialim toujours positif du fait de la structure "pont en H" et il est proportionnel à alpha car Ialim n'existe que le temps que les transistors fonctionnent

Nom		Hacheur V4	
Familie		Élément de bibliothèque	
Identifiant		1587933319	
Version		0.1	
Entrée	Alias	Unité	
e1	Valim	V	
e2	Ialim	A	
e3	alpha		
e4	sens		
e5	Vs	V	
e6	Is	A	
Paramètre	Valeur		
f	20000		
Vd	0.5		
T	1/f		
alpha_	clamp(alpha, 0, 1)		
signe_	round(clamp(sens,0,1))*2-1		
Vsmax	max(Valim-Vd, 0)		
Relation	Condition		
Vs=alpha_*signe_*Vsmax			
Ialim=alpha_*abs(Is)			
Résultat	Alias	Unité	Valeur
e7	Pe		Valim*Ialim
e8	vs		Vsmax*signe_*!Hp(t,T,alpha_)
e9	P		Vs*Is
Informations			
Modèle réalisé conformément à la méthode annoncée et au plus proche du réel :			
1) alpha et sens ne sont ni des efforts, ni des flux mais de simples coefficients			
On utilise des paramètres alpha_ et signe_ déduits des entrées alpha et sens			
2) Ialim est la valeur moyenne de ialim(t) qui n'est égale à l'intensité is(t) que lorsque les transistors conduisent. On considère que Is est continue car sa forme est lissée par le circuit R-L du moteur associé aux diodes de roue libre. D'où Ialim = alpha * Is.			
3) Le rendement dépend du rapport (Valim-Vd)/Valim où Vd = tension de déchets.			
Ce qui démontre l'intérêt d'avoir une tension d'alimentation la plus élevée possible			
4) Pour visualiser facilement la forme de vs (sortie résultat), imposer f = 100 Hz...			

► Dans un deuxième temps, nous allons étudier un hacheur plus évolué, basé sur un pont en H mais commandé uniquement par le rapport cyclique alpha. Si alpha = 0.5, il y a alternance parfaite, le hacheur impose 50% du temps Vsmax et 50% du temps -Vsmax. La tension moyenne obtenue est alors nulle ainsi que le courant, lissé par le circuit R-L du moteur et le moteur sera maintenu à l'arrêt. Si alpha = 1, la tension Vsmax est imposée 100% du temps et si alpha = 0, la tension -Vsmax est imposée 100% du temps.

## Chaîne d'énergie commandée par un hacheur gérant 2 sens de rotation



- On voit que ce composant mixte n'a qu'une seule entrée de commande ( $\alpha$ )
- Ce hacheur, du fait de la liaison permanente de l'alimentation au moteur via les transistors est capable de fonctionner en récupération d'énergie si la charge entraîne le moteur.

► Analyse de quelques points importants :

### • $V_s = (2 * \alpha - 1) * V_{smax}$

$V_s$  ne dépend plus que des paramètres

On peut vérifier que l'équation donne :

$V_s = 0$  si  $\alpha = 0.5$

$V_s = V_{smax}$  si  $\alpha = 1$

$V_s = -V_{smax}$  si  $\alpha = 0$

### • $I_{alim} = (2 * \alpha - 1) * I_s$

C'est le même type d'équation pour  $I_{alim}$

### • $V_{smax} = \max(V_{alim} - V_d, 0)$

Il est à noter que cette équation posera problème lors de la récupération d'énergie

Entrée	Alias	Unité
e1	Valim	V
e2	Ialim	A
e3	alpha	
e4	Vs	V
e5	Is	A

Paramètre	Valeur
f	20000
Vd	0.5
T	1/f
alpha_	clamp(alpha, 0, 1)
Vsmax	max(Valim - Vd, 0)

Relation	Condition
$V_s = (2 * \alpha - 1) * V_{smax}$	
$I_{alim} = (2 * \alpha - 1) * I_s$	

Résultat	Alias	Unité	Valeur
e6	Pe		Valim * Ialim
e7	vs		Vsmax * (2 * !Hp(t, T, alpha_) - 1)
e8	Ps		Vs * Is

**Informations**

Modèle réalisé conformément à la méthode annoncée et au plus proche du réel :

- 1)  $\alpha$  n'est ni un effort, ni un flux mais un simple coefficient. Pour le différencier, on passe par le paramètre  $\alpha_$ , égal à l'entrée  $\alpha$  après écrêtage
- 2) Avec ce mode de commande, les transistors fonctionnant en permanence, le hacheur est théoriquement capable de fonctionner en récupération d'énergie si le moteur fonctionne en mode génératrice du fait de son entraînement par la charge.
- 3) A noter que ce modèle simplifié est loin d'être parfait et reste perfectible...
- 4) Pour visualiser facilement la forme de  $v_s$  (sortie résultat), imposer  $f = 100$  Hz...

► **CONCLUSION** : Lorsque l'on crée un nouveau modèle, on doit toujours le tester et le valider mais il faut être conscient de ses limites (*un modèle étant une imitation et une simplification*) et, si possible, en informer les utilisateurs. Le schéma de test montre bien la possibilité de récupérer de l'énergie. Mais, dans les hacheurs réels, l'intensité passe alors à travers les diodes de roue libre et la tension du moteur doit être supérieure à celle de l'alimentation ( $V_{mot} = V_{alim} + 2 * V_{diode}$ ) pour que le transfert se fasse.

► Dans le modèle étudié, la tension de déchet n'ayant plus de sens lors de la récupération d'énergie, il faudrait la remplacer par deux tensions de diode de valeur opposée. Ce modèle ne le gère pas actuellement et le rendement est incorrect pendant la phase de récupération d'énergie.

► Dans les simulateurs, les non-linéarités posent des problèmes de stabilité et/ou de convergence (*par exemple, on ne fait que rarement appel aux frottements secs dans les modèles de composants mécaniques car ils n'interviennent que sous certaines conditions*). Ici, le remplacement brusque de la tension de déchet par deux tensions de diode opposées générera des instabilités lors des calculs. Une solution classique consiste à remplacer ces tensions de seuil par une solution linéaire du type  $Req * I_s$  (avec  $Req =$  résistance équivalente des transistors ou des diodes de roue libre), la valeur du rendement en sera légèrement affecté (*variations négligeables car le rendement d'un hacheur est compris entre 96% et 100%*) et la logique sera respectée.

● 5- Documents ressources liés à cet article :

Le fichier zip associé contient les copies d'écran en qualité d'origine, les fichiers de simulation et les modèles de composants.

 [ressourcearticlesinusphyn4](#) (Zip de 369.6 ko)

---



**Avertissement : ce document est la reprise au format pdf d'un article proposé sur l'espace pédagogique de l'académie de Poitiers.  
Il ne peut en aucun cas être proposé au téléchargement ou à la consultation depuis un autre site.**