

# LOGICIEL DE SIMULATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES SANS A PRIORI

M. Chami, J.Saâdi

Laboratoire d'Automatique et de Productique (LAP)  
E.N.S.E.M. BP. 8118 Oasis, Casablanca  
e-mail : [chami72@hotmail.com](mailto:chami72@hotmail.com)  
e-mail : [janah@ensem-uh2c.ac.ma](mailto:janah@ensem-uh2c.ac.ma)

**Résumé :** Pour analyser ou concevoir des convertisseurs statiques. Il faut disposer d'un outil des simulations sans à priori permettant de mettre en évidence de nouvelles configurations initialement imprévues ou des anomalies de fonctionnement. Pour atteindre cet objectif le choix du modèle représentant les composants s'avère primordial. Dans cet article nous présentons un logiciel de simulation SimRDHC utilisant le modèle Réseau Dynamique Hybride à Composants (RDHC) [1][2]. Un bref rappel sur le modèle est proposé suivi d'une description des différents modules de ce logiciel ainsi que quelques exemples d'applications.

## 1- Introduction

La simulation des convertisseurs statiques sans à priori nécessite l'utilisation d'un modèle permettant de générer des séquences dont les équations ne sont pas préprogrammées et figées mais évolutives et capable de s'adapter à des configurations imprévues ou à un fonctionnement défectueux [13].

Les convertisseurs statiques sont constitués d'une partie à évolution continue dans le temps représenté habituellement pour des équations différentielles et d'une partie à évolution événementielle représentée en générale par des réseaux de PETRI [8 à 12].

Des outils permettant la modélisation des composants de manière individuelle existent comme les Bond Graph [3] malheureusement la traduction du circuit électrique en Bond Graph se fait souvent à la main et on demande à l'utilisateur d'introduire son circuit sous

forme de bond Graph à cause de la non unicité de représentation de celui-ci.

Le Réseau Dynamique Hybride à Composant (RDHC) [1][2] est un modèle graphique unifié qui permet la représentation individuelle de chaque composant du convertisseur qu'on désire simuler. L'avantage de ce modèle c'est qu'il intègre la topologie du circuit et sa dynamique sur le même support représenté par un graphe utilisant le même formalisme que le réseaux de PETRI. L'extraction des équations de Kirchoff se fait automatiquement à partir de ce modèle par simple bilan de chacune des places constituant le réseaux. Ce modèle possède également l'unicité de la représentation, ce qui permet d'introduire le modèle sous forme de circuit électrique.

Plusieurs logiciels de simulation sont disponible dans la littérature : Circuit [4], MUSC[5], Spice[6], SCRIPT[7]. Chacun d'entre eux utilise sa propre technique d'extraction des équations et différentes topologies pour les semi-conducteurs

L'outil de simulation SimRDHC proposé dans ce papier adopte les Réseaux Dynamique Hybride à Composants RDHC comme modèle de base pour la représentation des circuits électriques. Il est conçu à l'aide du logiciel DELPHI sous environnement Windows.

Dans ce papier nous présentons un bref rappel sur le modèle RDHC appliqué aux composants électriques en section 2, puis nous présentons la structure générale de SimRDHC en section 3. Deux exemples de simulation à l'aide de SimRDHC : Un multiplicateur de tension et un onduleur triphasé, Sont ensuite proposés en section 4. Avant de conclure en section 5.

**2- Rappel sur le modèle RDHC :**

**2-1 Structure du modèle :**

Un Réseau Dynamique Hybride à Composants est constitué d'une partie continue représentée par un réseau Dynamique continu adoptant le même formalisme que les Réseaux de PETRI Continus ( Places , Transitions et arcs valués ).

- Les places : On distingue deux types de places :
  - Places correspondant aux états du système, dont le marquage est représenté par une variable d'état pondéré par un composant dynamique du système.
  - Places à dynamique nulle dont le marquage est toujours nul.
- Les transitions : Elles sont validées en permanence, les variables associées peuvent être :
  - Proportionnelles à l'état.
  - Ou indépendantes de l'état.
- Les arcs valués : Ils relient les places aux transitions.

Exemple : Modèle RDC d'un condensateur :

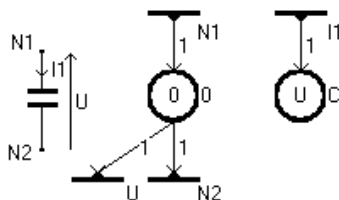


FIGURE 2 : modèle RDHC du condensateur

La figure 2 montre le modèle RDC d'un condensateur N1, N2 représentent les potentiels aux bornes du condensateur, U la tension à ses bornes et I1 le courant qui le traverse. En faisant le bilan des places on a bien :

$$U = N1 - N2$$

$$I1 = C \frac{dU}{dt}$$

Pour les composants commutés on doit adjoindre au RDC un Réseau de PETRI le réseau global ainsi obtenu est un RDHC.

Exemple 2 : Modèle RDHC d'un thyristor : Sur le réseau de la figure 3 [P] l'état du thyristor : P=1 passant sinon bloqué. Les conditions de conduction et de blocage sont représentées sur les transitions.

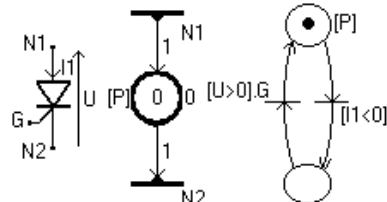


FIGURE 3 : modèle RDHC du thyristor

**3- Présentations de l'outil simulation SimRDHC**

**3-1** Structure générale : SimRDHC est constitué de trois modules de base :

- Module tracé de schéma Tschéma : Il permet le tracé du circuit composant par composant à partir d'une bibliothèque par simple click de souris. D'autre part grâce à un assistant intégré à ce module, l'utilisateur peut enrichir la bibliothèque en ajoutant de nouveaux composants ou bien des modèles plus complexes des composants existants. Le résultat de la saisie est mémorisé sous forme de RDHC.
- Module de simulation Srdhc : Ce module permet le traitement du réseau pour extraire dans un premier temps les différentes configurations à partir des réseaux de PETRI des différents composants commutés du circuit. Puis à partir de chaque configuration extraire les équations de Kirckoff qui lui correspondent. Ces équations sont ensuite résolues numériquement. A chaque pas de calcul on teste si un composant a changé d'état si c'est le cas on recherche la nouvelle configuration et on recommence les étapes précédentes comme le montre l'organigramme de la figure 1.

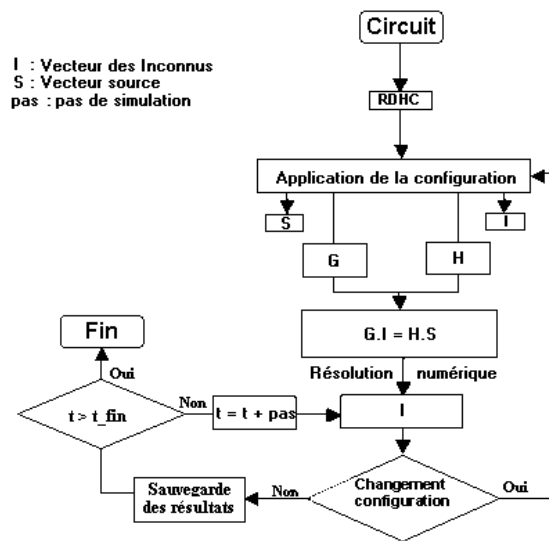


FIGURE 4 : Traitement du simulateur Srdhc

- Module tracé de courbes Tcourbe :  
 Permet la visualisation des variables les plus significatives à partir d'un menu déroulant présentant l'ensemble des variables. Pour obtenir les coordonnées d'un point il suffit d'y positionner la souris. Ce module permet également d'effectuer des zooms et de superposer plusieurs courbes.

**Choix du pas de calcul :**

Pour le choix du pas de calcul, deux approches sont habituellement adoptées :

- Pas de calcul fixe, généralement indexé sur la plus petite constante de temps du circuit. Mais cette approche induit généralement un temps de simulation très grand.
- Pas de calcul variable basé généralement sur l'estimation de l'erreur de la simulation [8][9].

C'est ce second choix que nous avons adopté pour notre logiciel, en proposant trois méthodes d'intégrations au choix qui sont : Euler implicite, Range-Kutta 2 et Range-Kutta. Si l'utilisateur privilégie la rapidité il optera pour Euler et s'il exige le maximum de précision il optera pour Range - Kutta.

**4- Exemples d'application :**

Pour illustrer les possibilités d'utilisation de SimRDHC nous présentons ci-dessous deux exemples :

**4-1- Multiplieur de tension :**

**4-1-1 présentation du circuit :**

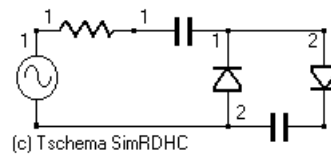


FIGURE 5 : Multiplieur de tension

Source de tension N°1	25 V, 1KHz, sinusoïde
Résistance N°1	10 Ω
Condensateur N°1	1μF
Condensateur N°2	1μF
Diode N°1	Ron = 0,1Ω
Diode N°2	Ron = 0,1Ω

TABLEAU 1 : Caractéristique du circuit

**4-1-2 Modèle RDHC du circuit :**

L'utilisateur construit le circuit composant par composant à partir de la base de donnée du logiciel, il effectue les liaisons topologiques adéquates. Il affecte ensuite à tous les interrupteurs leurs conditions de conduction. Dès la fin de cette opération le modèle RDHC du circuit est disponible, pour obtenir la configuration initiale on recherche toutes les places actives de la partie discrète. On traduit ensuite l'influence de ces places actives sur la partie continue et on en déduit après simplification des places à dynamiques nulles les lois des nœuds et les lois des mailles. On montre sur la figure 6, le RDHC du circuit de la figure 5.

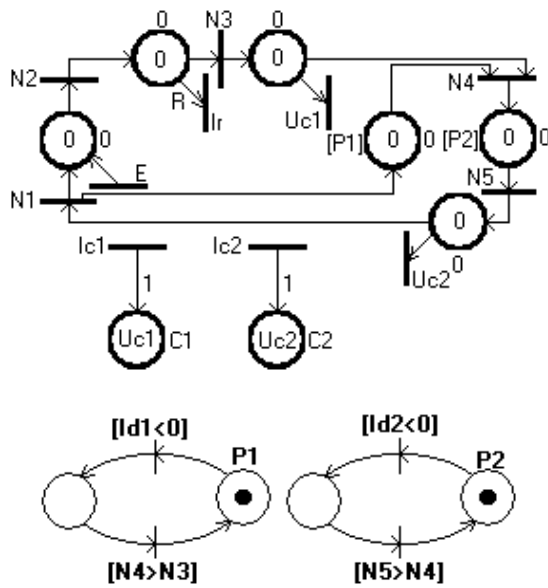


FIGURE 6 : Modèle RDHC

**4-1-3 Changement de configuration :**

La gestion des changements de configurations des interrupteurs se fait à partir des réseaux de PETRI qui les contrôlent. Pour notre exemple, dans le cas du blocage de la diode N°1, la variable P1 reçoit 0 et donc sa place dans le RDHC est inhibée,

**4-1-4 Résultat de la simulation**

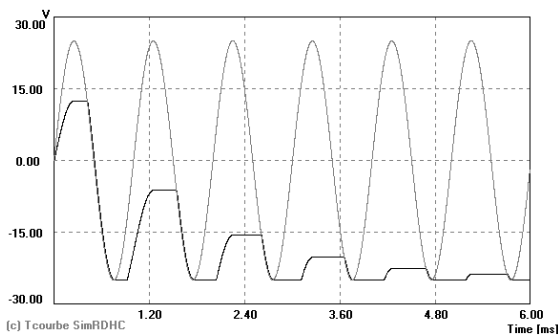


FIGURE 7 : Tension d'entrée et Tension de condensateur N°1

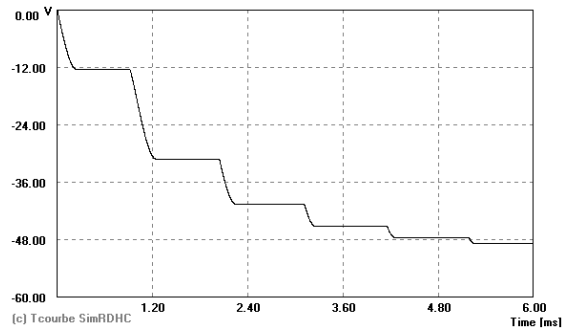


FIGURE 8 : Tension du condensateur N°2  
Les résultats de la figure illustrent bien le fonctionnement du circuit ils ont été validés par simulation à l'aide de Pspice.

**4-2 Etude d'un onduleur triphasé**

**4-2-1 Présentation du circuit :**

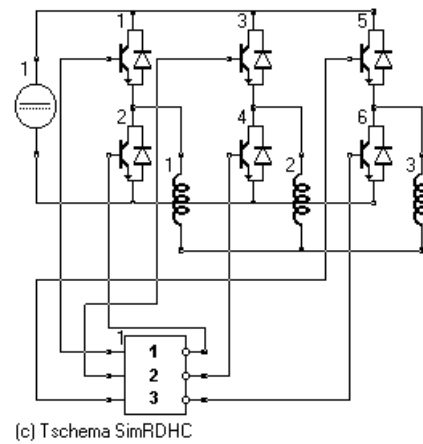


FIGURE 9 : Onduleur triphasé

Source de tension N°1	220 V, continu
Bobine N°1,2,3	0.01 H / 3.14Ω
Transistor-diode N°1,2,3	Ron = 0,1Ω
Commande (Modulation de largeur d'impulsion)	5KHz / 50Hz

TABLEAU 2 : Caractéristique du circuit

**4-2-2 Commande numérique :**

Le logiciel SimRDHC propose plusieurs commandes numériques utilisées pour attaquer les entrées de commande ou gâchettes des interrupteurs. Une étude bibliographique a

permis de mettre en évidence les commandes les plus utilisées pour les convertisseurs statiques. Parmi ces commandes la plus populaire est la modulation de largeur d'impulsions (MLI), dont le principe est représenté sur la figure 10.

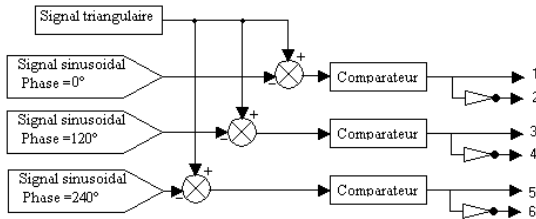


FIGURE 10 : Méthode de génération de la MLI

4-2-3 Résultat de la simulation :

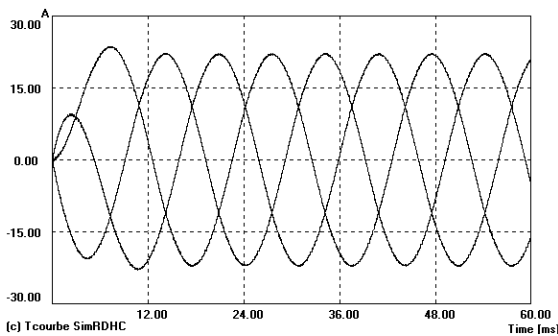


FIGURE 11 : Le courant dans les trois Bobines

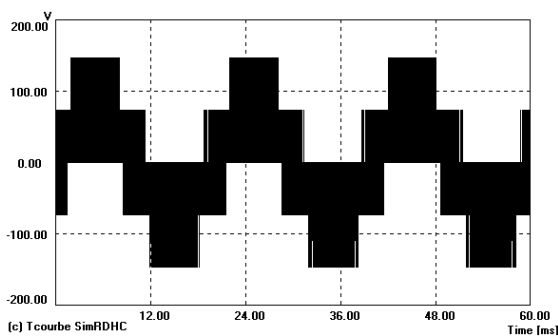


FIGURE 12 : Tension aux bornes de la bobine N°1

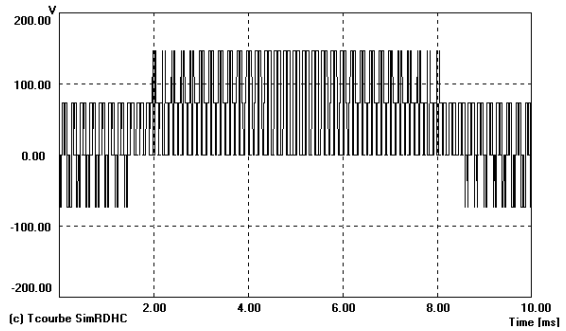


FIGURE 13 : ZOOM sur la figure 12

Les résultats présentés sur les figures 11 à 13 illustrent bien le fonctionnement du circuit étudié. La précision obtenue est satisfaisante après confrontation avec des logiciels du commerce.

5- Conclusion

Dans ce papier, nous avons étudié des simulations types à l'aide du logiciel SimRDHC. Ce dernier a permis une modélisation aisée de tous les composants des deux circuits à l'aide du modèle Réseau Dynamique Hybride à Composant. On a également pu intégrer toutes les commandes numériques utilisées. Tous les résultats ont été validés par d'autres logiciels comme Pspice et Matlab-Simulink. L'étape suivante du travail serait d'intégrer les machines synchrones et asynchrones afin de faire des simulations englobant toutes les parties de la chaîne de l'association convertisseur machine.

**Remarque :** Le logiciel en version d'évaluation est accessible sur simple demande par e-mail à ses auteurs.

## 6- Références

- [1] J. Saadi, T. Bennani, H. Alla  
 'Component Hybrid Dynamic Nets, MCPL'97'  
 Campinas, SP, Brazil, p.211-216
- [2] J. Saadi  
 'Diagnostic et modélisation de défauts au sein  
 d'une association convertisseur - machine '  
 thèse de doctorat Es - sciences appliquées,  
 Université Mohamed V, 27/09/1994.
- [3] D. Karnopp, R. Rosenberg,  
 'System dynamics: A unified approach'  
 A Willey-Interscience publication, 1975.
- [4] G. ENJALBERT, Développement d'un  
 outil de conception assistée par ordinateur :  
 logiciel CIRCUIT, thèse de doctorat de l'INP,  
 Grenoble (1989).
- [5] D. S. Glao, Contribution à la modélisation  
 et à la simulation à niveaux d'abstraction  
 multiples et mode mixte, des dispositifs  
 d'électronique de puissance, thèse de doctorat  
 de Paris 6 (1996)
- [6] NAGEL, Laurence W, SPICE2 : A  
 Computer Program to simulate  
 Semiconducteur Circuits, Memorandum No  
 UCB/URL M520 Electronic research  
 Laboratory, Ca May 9, 1975.
- [7] PIQUET H., OMS F., CHERON Y.,  
 Simulation numérique des convertisseurs  
 statiques : Les performances du logiciel  
 SCRIPT, RGE n°1, Janvier 1990. p 17-27
- [8] Y. Kang and J.D. Lavers, « Power  
 electronics simulation: current progress and  
 future development, » IEEE Pels Workshop on  
 computers in power electronics, Trois-  
 Rivières, Quebec, Aug 7-10, 1994, pp. 189-  
 196.
- [9] NAGEL, Laurence W, SPICE2: A  
 Computer Program to simulate Semiconductor  
 Circuits, Memorandum No UCB/URL M520  
 Electronic research Laboratory, Ca May 9,  
 1975.
- [10] G. Dézai Séraphin, "Contribution à la  
 modélisation et à la simulation à niveaux  
 d'abstraction multiples et mode mixte, des  
 dispositifs d'électronique de puissance" Ph.D.  
 thesis, Paris V University, 1996.
- [11] P.J. Mosterman and G. Biswas,  
 'A theory of discontinuities in dynamic  
 physical systems'  
 Journal of the Franklin Institute, 334B (6),  
 1997.
- [12] Z. Chen, E. Spooner, Voltage source  
 inverters for high-power variable-voltage DC  
 power sources, IEE Proc-Gener, Vol 148, N°  
 5, 5 September 2001
- [13] F. BORDRY  
 « Synthèse des méthode de simulation des  
 convertisseurs statiques »  
 Thèse de doctorat, INP Toulouse, décembre  
 1984.