

## Une nouvelle stratégie de régulation intelligente d'un moteur à réluctance variable

### [ A new intelligent control strategy of a variable reluctance motor ]

*Walid Amri<sup>1</sup>, Mohamed Salah Salhi<sup>2</sup>, and Abdessattar Ben Amor<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Physiques and Instrumentation Department,  
Tunis-Carthage University, National Institute of Applied Sciences and Technology,  
Tunis, Tunisia

<sup>2</sup>Electrical Engineering Department,  
National engineering school of Tunis, University of Tunis el Manar,  
Tunis, Tunisia

---

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The use of systems with variable reluctance is nowadays very replied in the industrial fields. Despite this enormous expansion, they present limitations to fill at their controls. It is for this reason that the study of such a system is a of reflection and research that we have considered important to delve deeply into. Our study then summarizes the conception of an approach that aims to facilitate the control of variable reluctance system.

The proposed approach is based on an intelligent software sensor, reducing the overall cost of the control system and promoting the simultaneous processing of a large number of information received from the actuator. Apart from this, the integration of an evolutionary intelligent regulator will retrieve the optimal useful output.

**KEYWORDS:** Variable reluctance motor, neural Network, smart sensor, intelligent evolutionary regulator.

**RESUME:** L'utilisation des systèmes à réluctance variable est de nos jours, très réponde dans la vie des industries. Malgré cette énorme expansion, ces derniers présentent des limites à combler au niveau de leurs contrôles. C'est pour cette raison, que l'étude des tels systèmes constitue un sujet de réflexion et de recherche dont nous avons pris en considération. Notre étude se résume alors dans la conception d'une approche permettant de faciliter le contrôle de tels systèmes.

Une telle approche proposée se base sur un capteur logiciel intelligent, réduisant le coût global du système de contrôle et favorisant le traitement simultané d'un nombre important d'informations reçus depuis l'actionneur. D'autant plus l'intégration d'un régulateur intelligent permettra de récupérer la sortie utile optimale.

**MOTS-CLEFS:** Moteur à réluctance variable, Réseau de neurones, capteur intelligent, régulateur évolutionnaire intelligent.

## 1 INTRODUCTION

Les actionneurs électromagnétiques représentent un nombre important d'applications dans tous les domaines de la vie, particulièrement dans le domaine des machines de production où ils sont utilisés notamment pour la commande de position ou de vitesse. Parmi ces dispositifs, nous citons en premier lieu les moteurs pas à pas linéaires qui sont d'une grande importance et qui ont attiré fortement l'attention des chercheurs [1-2]. Ils offrent par exemple une alternative aux dispositifs pneumatiques ou hydrauliques dans plusieurs domaines impliquant des vitesses plus au moins importantes ou de grandes précisions de commande de mouvement. Ces dispositifs peuvent avoir des densités de forces magnétiques assez élevées, de

bonnes propriétés dynamiques ainsi que de faibles pertes. Ils sont utilisés dans les systèmes d'entraînement de hautes performances et dans des applications comme les servomoteurs. Parmi ces actionneurs, on trouve les machines à réluctance variable (MRV) qui sont des transducteurs électromécaniques qui assurent la conversion des impulsions électriques en mouvement de translation [3] [4]. Ils sont des actionneurs incrémentaux fonctionnant par des déplacements élémentaires successifs entre des positions d'arrêt qui sont des états d'équilibre. Leur précision de positionnement est liée à la précision d'arrêt sur un pas. Elle est devenue un candidat important pour différentes applications telles que les automobiles, la production de l'énergie électrique et le domaine de l'aérospatial [5], [6], [7]. Cet intérêt qui s'est éveillé pour la machine à réluctance variable est dû à la robustesse de son rotor, à la simplicité de sa conception et à sa capacité à fonctionner en mode dégradé avec un défaut dans une de ses phases [5].

Par contre, ses défauts majeurs sont les ondulations de force et le bruit acoustique qu'elles produisent. Plusieurs recherches se font actuellement pour réduire ces inconvénients. Des informations de position de rotor jouent un rôle critique dans le contrôle de la MRV. De façon classique, les capteurs de position distincts, sont utilisés pour obtenir ces informations. Les capteurs de position ajoutent à la complexité et le coût du système de contrôle et de réduire sa fiabilité et souplesse.

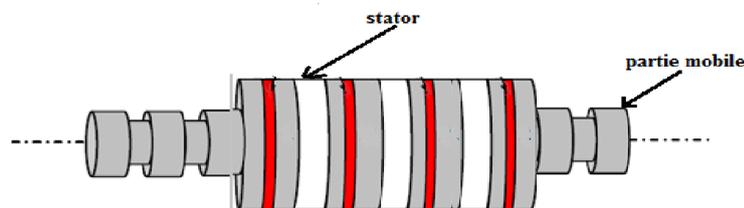
Afin de pallier les inconvénients des capteurs de position, cet article proposé étudie un système de commande sans capteur de position qui répond aux besoins d'une application de l'actionneur électrique. En effet, il traite la conception et l'optimisation de la régulation d'une machine à réluctance variable.

Dans un souci de mieux se servir avec ce système, on a pensé à intégrer des éléments intelligents s'articulant autour de réseaux neuroniques afin d'assurer une régulation optimale et précise du processus dont on veut industrialiser et dont la section suivante est consacré à sa modélisation.

## 2 MODÉLISATION DU SYSTÈME ADOPTÉ

### 2.1 STRUCTURE GLOBALE DU SYSTÈME

Le prototype de moteur linéaire à réluctance variable utilisé dans cette étude est présent sur la figure 1. Il s'agit d'une machine électrique composée d'une partie mobile appelée translateur capable de se déplacer de façon incrémental. Ce translateur possède 8 dents de rotor et 4 dents de stator et porte 4 phases, chaque phase est constituée par une bobine. Le stator de la LSRM comporte des pôles constitués de pièces polaires associées à des enroulements inducteurs. La partie mobile est un ensemble de feuilletage de matériau ferromagnétique, il n'y a ni aimant permanent ni enroulements [8].



*Fig. 1. Moteur linéaire à réluctance variable*

La figure 1 montre un prototype de moteur linéaire à réluctance variable mentionné ci-dessus.

Son principe de fonctionnement se base sur le phénomène de l'attraction du fer par les électroaimants. En effet, lorsque deux pôles opposés du stator sont excités, deux pôles du rotor s'alignent avec eux, mais un autre ensemble de pôles est hors alignement. L'alimentation d'une autre paire de pôles du stator amène encore une fois les pôles du rotor à l'alignement. De la même façon, et en commutant séquentiellement le courant dans les enroulements du stator, le rotor se déplace. La figure 2 montre un exemple de fonctionnement [9].

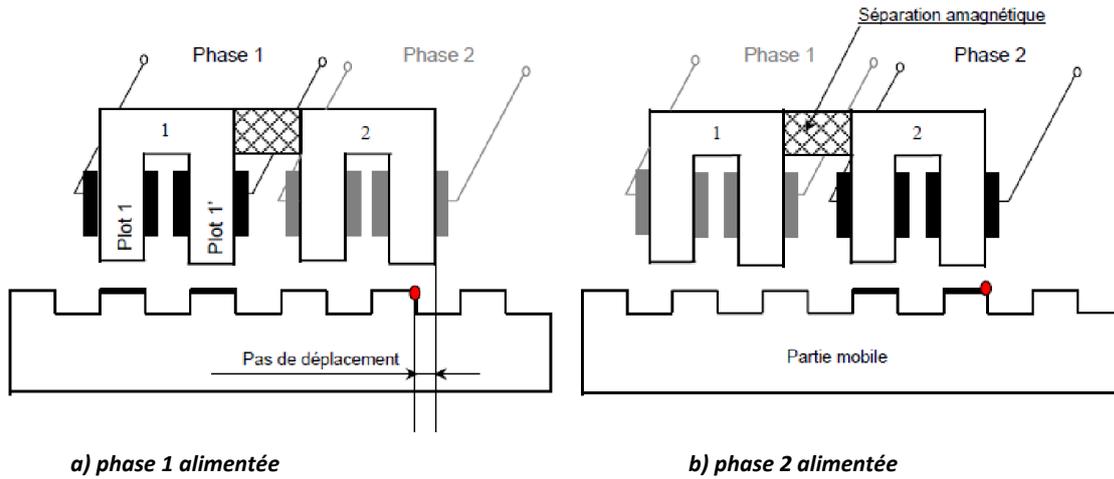


Fig. 2. Principe de fonctionnement d'un moteur à réluctance variable

Sur la figure 2.(a), la partie mobile est alignée avec les dents du module 1. Ensuite, sur la figure 2.(b) la partie mobile vient aligner ses dents avec celles du module 2.

2.2 PRODUCTION DE LA FORCE DANS LA MACHINE À RÉLUCTANCE VARIABLE

La production de la force dans une machine à réluctance variable s'explique par le principe élémentaire de la conversion électromécanique dans un solénoïde de N tours (figure 3). L'excitation de la bobine par un courant électrique (i) crée un flux magnétique (φ).

Dans la figure 3.(a) si le courant d'excitation (i) est assez élevé, l'armature mobile se déplacera vers la culasse. La caractéristique du flux en fonction de la force magnétomotrice (fmm) pour deux valeurs X1 et X2 (X1 > X2) de l'entrefer est montré dans la figure 3.(b).

Cette caractéristique est linéaire pour X1 parce que la réluctance de l'entrefer est dominante, cela engendre un plus petit flux dans le circuit magnétique [10].

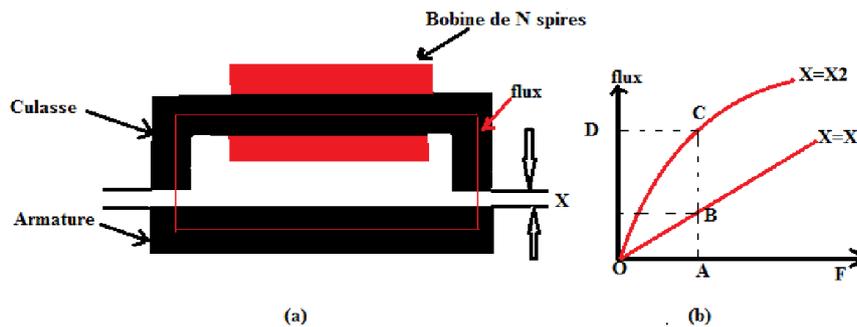


Fig. 3. Un solénoïde et sa caractéristique

L'expression de l'énergie électrique est donnée par l'expression suivante.

$$W_e = \int i \cdot e \cdot dt = \int i \cdot N \frac{d\phi}{dt} \cdot dt = \int N \cdot i \cdot dt = \int F \cdot d\phi \tag{1}$$

Où e est la force électromotrice induite.

Par définition l'énergie d'entrée  $W_e$  est égale à la somme de l'énergie magnétique emmagasinée dans la bobine  $W_f$  et l'énergie convertie en énergie mécanique  $W_m$  :

$$W_e = W_f + W_m \quad (2)$$

À l'instant où l'armature est encore à la position X1, l'énergie emmagasinée est égale à l'énergie d'entrée donnée dans l'équation (2). Cela correspond à la surface OBEO dans la figure 3 (b).

Le complément de cette énergie est la co-énergie, elle est donnée par la surface OBAO dans la même figure. Son expression mathématique est  $\int \varphi dF$ . De la même façon, pour la position X2 de l'armature, l'énergie du champ correspond à la surface OCDO et la co-énergie est donnée par la surface OCAO. D'une manière variationnelle, nous pouvons écrire l'équation (2) de la façon suivante :

$$\delta W_e = \delta W_f + \delta W_m \quad (3)$$

Pour une excitation constante  $F_i$  donnée par le point A dans la figure 1.4 (b), les expressions des différentes énergies deviennent :

$$\partial W_e = F_1 d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} F_1 (\varphi_2 - \varphi_1) = S(BCDEB) \quad (4)$$

$$\delta w_f|_{X=X_2} - \delta w_f|_{X=X_1} = S(OCDO) - S(OBEO) \quad (5)$$

L'utilisation des équations (3) à (5) donne l'expression de la variation de l'énergie mécanique :

$$\delta W_e = \delta W_f + \delta W_m = S(OBCO) \quad (6)$$

Cette surface représente la différence entre les deux courbes pour une force magnétomotrice donnée. Dans le cas des machines linéaires, l'évolution de l'énergie mécanique en termes de force électromagnétique et de la variation de la position de la partie mobile est donnée par la relation suivante.

$$\delta w_m = F_e \partial \theta \quad (7)$$

La force électromagnétique est donné par :

$$F_e = \frac{\delta w_m}{\partial \theta} \quad (8)$$

Dans le cas d'une excitation constante, l'augmentation de l'énergie mécanique est égale au taux de variation de la co-énergie  $w_f$ . Donc l'évolution de l'énergie mécanique s'écrit de la forme suivante :

$$\delta w_m = \delta w_f \quad (9)$$

$$w_f = \int N \cdot \varphi \cdot di = \int L(x, i) \cdot i \cdot di \quad (10)$$

Si l'inductance varie linéairement avec la position du rotor pour un courant donné, ce qui en général n'est pas le cas en pratique, le couple peut s'écrire sous la forme suivante :

$$F_e = \frac{\partial w_f}{\partial x} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(x, i)}{dx} \quad (11)$$

## 2.3 MODÈLE MATHÉMATIQUE DE LA MACHINE

### 2.3.1 ÉQUATIONS ÉLECTRIQUES

En négligeant l'inductance mutuelle entre les phases du stator, la tension induite aux bornes d'une phase A, B, C ou D, notée k, d'un moteur linéaire à réductance variable, est donnée par l'expression suivante [11]:

$$V_k = R_s i_k + \frac{d\varphi(x, i)}{dt} = R_s i_k + \frac{dL(x, i)}{dt} \quad (12)$$

Avec  $R_s$  est la résistance d'une seule phase. L'équation (12) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$V_k = R_s i_k + L_k(x, i) \frac{di_k}{dt} + \frac{dL_k(x, i)}{dt} v_m i_k \quad (13)$$

Où  $v_m = \frac{dx}{dt}$  qui représente la vitesse de déplacement

L'inductance  $L_k(x, i)$  est une fonction périodique de  $x$ , de période spatiale  $\lambda$ . Elle oscille autour d'une valeur moyenne, son développement en série d'harmoniques est donnée par :

$$L_k(x) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} L_k \cos(k \frac{2\pi x}{\lambda}) \tag{14}$$

Pour le cas des moteurs à quatre phases, les bobines statoriques sont électriquement déphasées de  $\frac{\pi}{2}$ .

Lors du déplacement de la partie mobile. L'inductance  $L_k(x)$  oscille autour d'une valeur moyenne. C'est une force périodique de  $x$  dont la période spatiale est égale à  $\lambda$ . fig 4 [12].

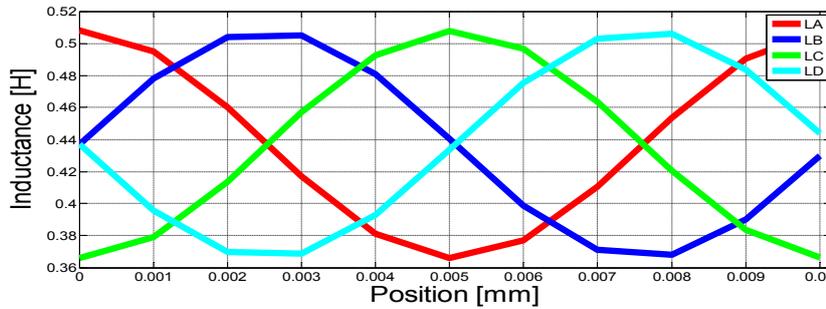


Fig. 4. Evolution de l'inductance en fonction de la position du mobile

### 2.3.2 ÉQUATION MÉCANIQUE DU MOUVEMENT

Le mouvement, sur un pas, d'un moteur à réductance variable est régi par une équation différentielle du second ordre :

$$m \frac{dx^2}{dt} = F_A(x) + F_B(x) + F_C(x) + F_D(x) - \xi \frac{dx}{dt} - F_0 \text{signe} \left( \frac{dx}{dt} \right) - F_c \tag{15}$$

avec :

- $F_k(x)$  ( $k= a, b, c, d$ ): la force de poussée (N),
- $\xi$  : Le coefficient de frottement visqueux (Nsm-1),
- $F_0$  : Le frottement visqueux (N)
- $m$  : La masse de mobile (kg),
- $F_c$  : La force de charge (N).

Avec les expressions des forces dans chaque phase est comme suit :

$$F_A(x) = \left(-\frac{\pi L_1}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) i_A^2 \tag{16}$$

$$F_B(x) = \left(-\frac{\pi L_1}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{\pi}{2}\right) i_B^2 \tag{17}$$

$$F_C(x) = \left(-\frac{\pi L_1}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \pi\right) i_C^2 \tag{18}$$

$$F_D(x) = \left(-\frac{\pi L_1}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{3\pi}{2}\right) i_D^2 \tag{19}$$

Avec comme vecteurs d'état  $\bar{X} = [i_k, x, v_x]$ , avec  $k= a, b, c, d$ . Le modèle dynamique peut être mis sous la forme suivante [13] :

$$\begin{cases} \frac{di_k}{dt} = \frac{1}{L_k(x)} (V_k - Ri_k - \frac{dL_k(x)}{dx} i_k v_x) \\ \frac{dx}{dt} = v_x \\ \frac{dv_x}{dt} = \frac{1}{M} (F_x - Dv_x - F_{sec} \text{sign}(v_x)) \end{cases} \tag{20}$$

### 3 COMMANDE ADOPTE D'UNE MACHINE LINEAIRE A RELUCTANCE VARIABLE

Le model dynamique ci-dessus était pilote par une machine linéaire à réluctance variable, dotée d'une vitesse et d'une force non linéaires pouvant induire une certaine imprécision sur la fonctionnalité attendue. Pour palier à cette problématique on a pensé à remplacer les deux éléments actifs de la boucle de commande du système par des dispositifs intelligents multivariables de ce fait, l'ancien capteur analogique unidimensionnel pouvant convertir un seul paramètres de retour du système par un réseau neuronique multivariable ( multi-paramètres) qui tient en considération plusieurs paramètres a la fois et qui réside dans l'intégration d'une carte de KHONEN dont l'abréviation est 'SOM' pour Self Organizing Map. A recevoir les déférents paramètres de sorties de ce système au même temps et offrant a chaque itération (cycle d'apprentissage non supervisé). Ce meilleure sortie dite BMU (Best Matching Unit) vers un comparateur passif traduisant l'écart a un régulateur non conventionnel mais de nature intelligent et évolutionnaire aussi sous l'effet d'un algorithme génétique assurant l'élaboration de gène (chromosome) la plus adaptée a la commande de notre système ce ci étant décrit par « survie au meilleur individu ». Ce dernier étant sélectionné par une fonction coût dite « Fitness » appropriée à notre système ce chromosome qui génère le nouveau régulateur évolutionnaire est constitué d'un vecteur de données caractérisant les paramètres venant d'être comparés, ce vecteur sera véhiculé vers l'actionneur du système afin d'affecter le déplacement de l'armature mobile située à l'intérieur du moteur à réluctance variable, cette idée étant modélisée par le synoptique suivant.

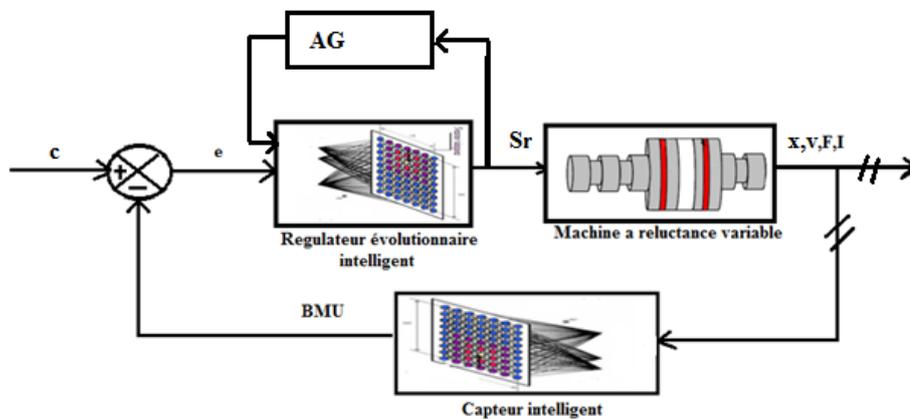


Fig. 5. Principe de commande intelligente d'une machine à réluctance variable

#### 3.1 ALGORITHME DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR INTELLIGENT ADOPTE

Le capteur intelligent est constitué d'un réseau de neurones auto-organisateur à une seule couche dont le vecteur de données d'entrée, qui présente les paramètres de sortie actionneur, s'applique à chaque neurone comme le montre la figure 6 [14]. Il s'agit de la carte de Kohonen désignée en anglais par SOM pour « Self Organizing Map ». Après l'admission d'un vecteur d'entrée  $\bar{X}$ , chaque neurone va recevoir tous les composants du vecteur  $\bar{X}$  suite à leur convolution, (multiplication) autrement dit après leurs filtrage par les poids synoptiques de chaque canal d'interconnexion. Au cours de la phase d'apprentissage, on aura dans chaque itération (cycle d'apprentissage) un seul neurone qui représente mieux le signal d'entrée (vecteur d'entrée); c'est le neurone ayant les aspects géométriques les plus proches en terme de distance euclidienne aux motifs du vecteur d'entrée. Ce neurone sera appelé : Neurone vainqueur désigné par le terme BMU.

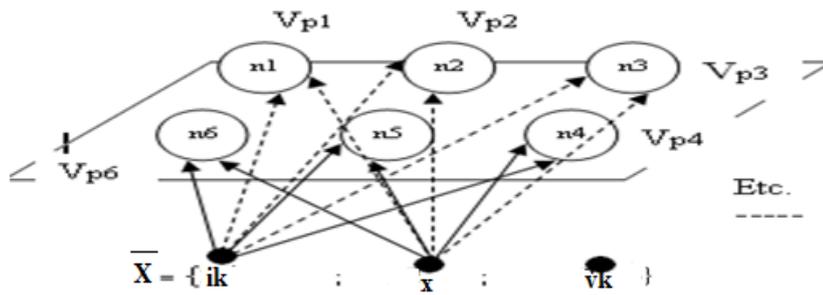


Fig. 6. Représentation de SOM

La figure 7 représente un résumé sur le principe de l'algorithme de capteur intelligent adopté au moyen d'un diagramme qui met en oeuvre la logique de son fonctionnement.

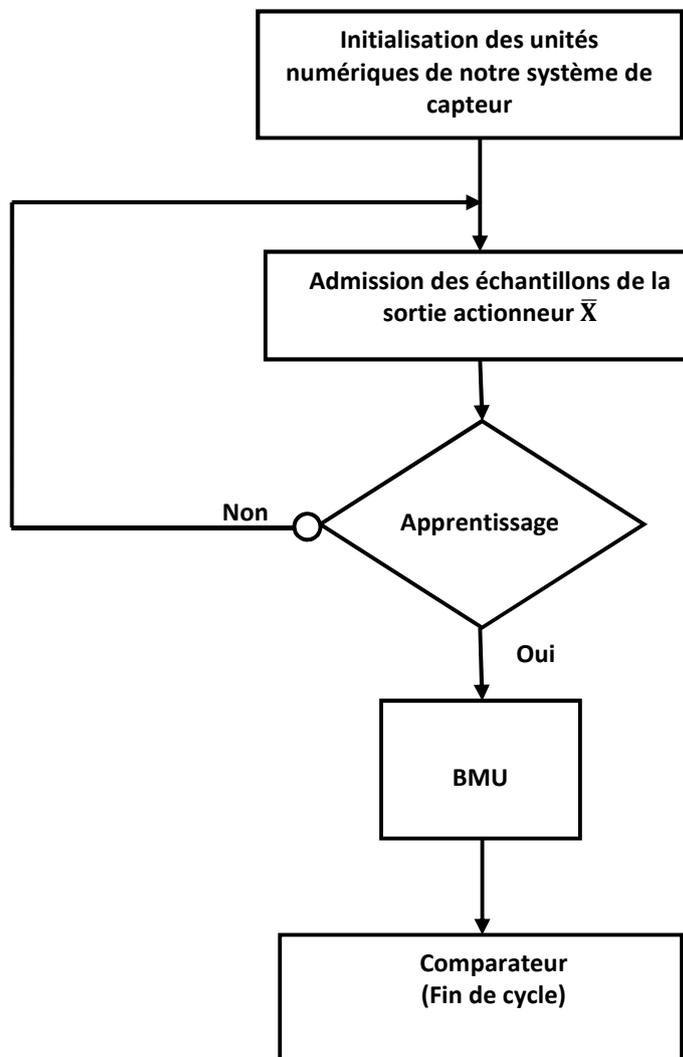


Fig. 7. Diagramme de fonctionnement du capteur intelligent adopté

### 3.2 ALGORITHME DE FONCTIONNEMENT DU REGULATEUR EVOLUTIONNAIRE INTELLIGENT ADOPTE

Notre régulateur évolutionnaire intelligent prend appui aussi sur l'application du même réseau neuronique (la carte SOM) qui constitue maintenant un très bon outil de diversification des populations de part l'élaboration à chaque itération d'un individu constitué par le BMU. Cette diversification des individus d'une population offre l'avantage pour l'algorithme Génétique (AG) évolutionnaire d'appliquer à une étendue beaucoup plus importante que notre espace de recherche pour se converger finalement vers une solution optimale qui se rapproche vraisemblablement à la solution attendue ; un signal constant assure la stabilité et la linéarité de l'actionneur. Cet algorithme évolutionnaire adopté est guidé par une fonction coût appropriée dite « Fitness » ; C'est la fonction de régulation. La figure 8 représente un résumé sur le principe de l'algorithme de régulateur évolutionnaire intelligent adopté au moyen d'un diagramme qui met en ouvre la logique de son fonctionnement.

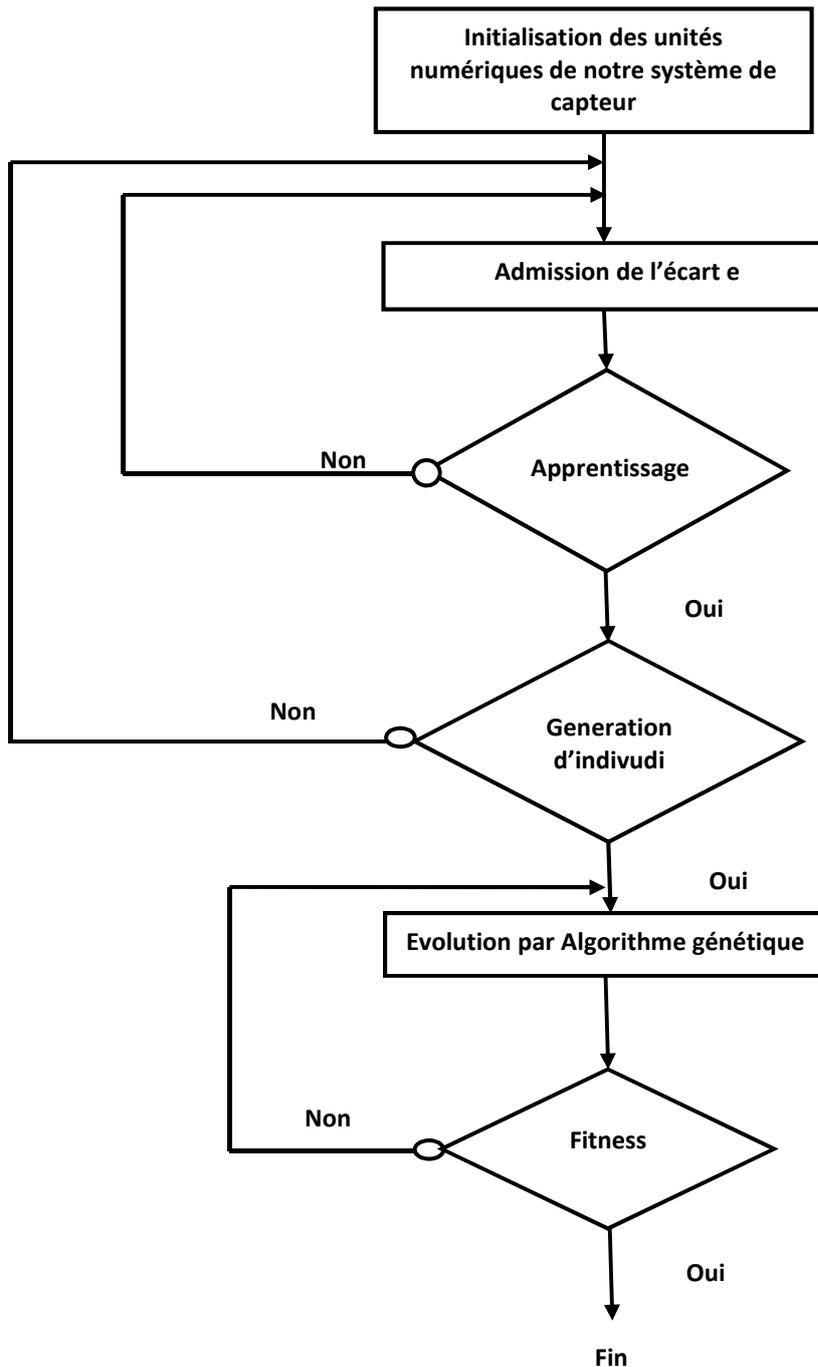


Fig. 8. Diagramme de fonctionnement régulateur évolutionnaire intelligent

#### 4 CONCLUSION

Notre étude de la nouvelle approche de la conception d'un régulateur et d'un capteur intelligents pourra palier à des limites de performance caractérisant les plus parts des systèmes à réluctance variable. Notre étude actuelle couvre la partie conception et étude et nous envisageons à une étape ultérieure passer à l'implémentation et la simulation en vue d'intégrer la solution en toute simplicité.

#### REFERENCES

- [1] Wadhah Missaoui, Lilia EL Amraoui, Frederic Gillon, Mohamed Benrejeb and Pascal Brochet, "Performance Comparison of Three and Four-Phase Linear Tubular Stepping Motors", in Proc. ICEM06, Greece, paper No.467, 2006.
- [2] T. Wildi, Gilbert Sybille, "Electrotechnique", 4ème Edition, Edition De Boeck et Larcier, 2005.
- [3] G.Grellet, G.Clerc, "Actionneurs électriques, principes/modèles/commande", Collection Electrotechnique, Edition EYROLLES, Paris, 2000.
- [4] M.Jufer, "Electromécanique", Editions Georgi Dunod, Traité d'Electricité, d'Electronique et d'Electrotechnique, 1979.
- [5] R. Krishnan, "Switched Réluctance Motor Drives", CRC Press, 2001.
- [6] T.Wildi, "Électrotechnique", Les presses de l'université Laval, 2008.
- [7] J. M. Kokernak, D. A. Torrey, and M. Kaplan, "A switched réluctance starter/alternator for hybrid electric vehicles," Proc. PCIM'99, 1999, pp. 74-80.
- [8] Z. Mustapha. "Modélisation Numérique du Couplage Electromagnétique", Mécanique dans les Structures Linéaires Tubulaires, Thèse de doctorat en électrotechnique, 2013.
- [9] L.Elamraoui, "Conception électromécanique d'une gamme d'actionneurs linéaires tubulaires à réluctance variable", Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Ecole Générale de Lille, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2002.
- [10] M. CHAKIR, CONCEPTION ET OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE D'UNE GÉNÉRATRICE À RÉLUCTANCE VARIABLE
- [11] KHIDIR.J, "Alimentation et commande d'un actionneur linéaire triphasé à flux transversal", Thèse de doctorat, Université scientifique et de technologie de Lille, 1992.
- [12] W.Amri, A. B.Amor, "Nonlinear dynamic simulation model of Réluctance Linear Motor", International Conference in Control, Engineering & Information Technology, 2013.
- [13] M.R.DE CASTRO, "Analyse des modes chaotiques dans un moteur linéaire à réluctance variable en vue de control", Thèse de doctorat, Université de Reims, Champagne-Ardenne, 2010.
- [14] M.S. SALHI, "Hybridation des modèles auto-organiseurs récurrents RSOM et AG". Thèse de doctorat, ENIT, UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR, 2012.