

Emissions BF des chargeurs commandés par régulateur à Hystérésis embarqués dans les véhicules électriques hybrides rechargeables (V.E.H.R)

L. BESSOLTANE[#], Z. AZZOUZ^{*}, D. TOUMI[#]

[#]Faculté de Sciences Appliquées, Université Ibn Khaldoun, Tiaret.
bess_oltan@yahoo.fr, toumi_dj@yahoo.fr

^{*}Laboratoire de développement des entraînements électriques -Université des Sciences et de la Technologie d'Oran «MB»
zinazzouz@yahoo.fr

Résumé— Nous abordons dans ce papier l'étude CEM (compatibilité électromagnétique) des chargeurs de batteries des véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR). Aussi, nous intéressons aux composantes basses fréquences (BF) des courants harmoniques absorbés par ces dispositifs. Nous abordons également dans cet article les structures des chargeurs (ainsi que leurs stratégies de commande) les plus adoptées dans les VEH. Une attention particulière (du point de vue CEM) est réservée aux chargeurs à MLI triphasés à deux niveaux et NPC à trois niveaux, utilisant la technique de contrôle par hystérésis des courants prélevés sur le réseau avec un réglage classique (PI). L'analyse CEM que nous proposons est basée sur la comparaison des amplitudes des courants harmoniques des structures étudiées par rapport aux valeurs autorisées par les normes CEM en vigueur. A l'issue de cette comparaison, nous préconisons des solutions en faveur d'une meilleure CEM.

Mots clés— CEM, VEHR, chargeur à deux niveaux, chargeur à trois niveaux, commande MLI, régulateurs à Hystérésis.

I. INTRODUCTION

Les technologies de VEH se divisent en trois catégories, dépendant du niveau d'assistance du moteur électrique. On parle alors de chaînes de traction Micro-hybride, Mild-hybride et Full-hybride.

Le véhicule électrique hybride rechargeable (VEHR) est une variante de la technologie Full-hybride [1]. La nouveauté de cette technologie est de permettre la recharge de la batterie sur une source électrique via des chargeurs. Ces derniers doivent répondre aux normes CEM qui limitent les interférences électromagnétiques (I.E.M), l'injection d'harmoniques et de courants continus dans les réseaux électriques [2] [3]. D'autre part, ils doivent s'assurer un courant absorbé avec le minimum d'impact sur la qualité d'énergie et un facteur de puissance élevé afin de maximiser la puissance réelle disponible [4].

II. CONTRAINTES NORMATIVES ET CEM

Au niveau international, des travaux de normalisation du VEH ont été entrepris depuis de nombreuses années au sein des comités de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) [1] qui englobent les constructeurs automobile et les

spécialistes dans le domaine du génie électrique notamment l'électrotechnique.

D'autre part, pour pallier aux problèmes de pollution électromagnétique (EM) liés à l'utilisation des équipements connectés au réseau de distribution, des organismes de normalisation internationaux ont été institués afin de préserver la qualité d'énergie électrique. Ainsi, la CEI et l'IEEE (« Institute of Electrical and Electronics Engineers ») sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine de l'électrotechnique. Ils s'occupent de l'activité de normalisation CEM au niveau mondial [6] [7].

Les chargeurs des batteries des VEHR, connectés directement au réseau électrique, absorbent un courant supérieur à $16 A_{rms}$ [1] [4], ce qui nous ramène dans ce cas à la norme CEI 61000-3-12. En effet, cette dernière est applicable aux appareils connectés aux réseaux publics BT et MT ayant un courant absorbé supérieur à $16 A_{rms}$ et inférieur ou égal à $75 A_{rms}$ par phase [6]. Cette norme décrit les limites d'émissions autorisées des courants harmoniques, par le taux de distorsion harmonique (THD) et le rapport de distorsion harmonique pondérée partielle (PWHD: « Partial Weighted Harmonic Distortion ») [8] [7] [2]:

$$PWHD = \sqrt{\sum_{h=23}^{100} h \left(\frac{i_h}{i_{sc}}\right)^2} \quad (1)$$

i_h : Amplitude de l'harmonique au rang h .

i_{sc} : Courant de court-circuit

Le PWHD est utilisé pour fournir une marge permettant à certaines harmoniques d'ordre élevé de dépasser les limites spécifiées, tout en garantissant que l'effet des harmoniques d'ordre élevé ne dépasse pas les limites acceptables:

Le tableau I représente les limites d'émissions de courants harmoniques des équipements BT triphasés équilibrés spécifiés par la norme CEI 61000-3-12 classe A [2].

Les valeurs relatives d'harmoniques paires d'ordre 12 ou moins doivent être inférieures à $16/n$ %. Les harmoniques paires de plus d'ordre 12 sont prises en compte dans les

valeurs de THD et PWHD comme pour les harmoniques impaires [2].

TABLEAU I
LIMITES D'EMISSIONS DE COURANTS HARMONIQUES
SPECIFIES PAR LA NORME CEI 61000-3-12

Minimum R_{scc} 'Short circuit ratio'	Courant acceptable individuel d'harmonique I_n/I_1 %				Taux de courant maximal d'harmonique %	
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	THD	PWHD
33	10.7	7.2	3.1	2	13	22
66	14	9	5	3	16	25
120	19	12	7	4	22	28
250	31	20	12	7	37	38
≥ 350	40	25	15	10	48	46

III. CHARGEURS EMBARQUES DANS LES VEHR

Les chargeurs de batterie peuvent être classés selon leurs emplacement par rapport au véhicule électrique (VE) : embarqués (installés à l'intérieur du VE) ou non embarqués (installés à l'extérieur du VE) [5] [9] [4].

Il faut savoir, que depuis les années 90 les chercheurs se sont orientés vers des chargeurs embarqués qui utilisent l'onduleur de traction et les enroulements du moteur, ce qui permet de s'acquitter des inductances de filtrage supplémentaires en entrée afin de réduire le nombre de composants du système. Cependant cette structure présente des contraintes supplémentaires en termes de CEM [1] [10].

Nous avons fait le choix dans ce travail, de présenter uniquement des architectures des chargeurs triphasés bidirectionnels embarqués. La Fig. 1 montre un schéma simple d'une architecture parallèle d'un VEHR en intégrant le moteur de traction dans le chargeur de batterie [9] [10].

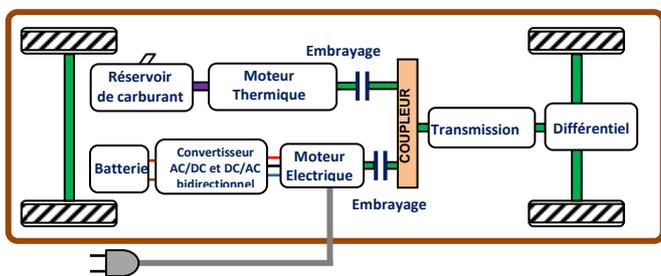


Fig. 1 Architecture d'un VEHR intégrant le moteur de traction dans le chargeur de batterie

On distingue deux types de mode de charge à savoir la charge lente pour le cas d'un réseau monophasé et la charge rapide pour un réseau triphasé. Dans le cas d'une alimentation par un réseau monophasé, l'idée est d'utiliser deux bras de l'onduleur de traction côté réseau en redresseur. Le troisième bras de l'onduleur fonctionne en hacheur série, l'enroulement du moteur est utilisé en tant qu'inductance de filtrage [1] [5].

IV. TOPOLOGIE ET COMMANDE D'UN CHARGEUR TRIPHASÉ A PRELEVEMENT SINUSOÏDAL

Plusieurs structures des convertisseurs AC/DC à prélèvement d'un courant sinusoïdal ont été développées et présentées dans la littérature [11] [12] [13] à savoir :

- la structure de redresseur suivi d'un hacheur Boost (Correction du facteur de puissance 'PFC').
- la structure de redresseurs à injection de courant.
- le redresseur de VIENNA.
- le redresseur à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI).

Les topologies des chargeurs les plus répandues dans les applications à prélèvement sinusoïdal sont les redresseurs de tension à MLI. Leur réversibilité en puissance les rend très populaires surtout dans les VEHR car ils peuvent être utilisés en redresseur dans le mode recharge de batterie et en onduleur dans le mode de traction [9] [11] [12].

Plusieurs logiques de commande sont envisageables pour cette topologie. Nous nous sommes intéressés dans ce travail à la commande par hystérésis d'un chargeur à MLI triphasé à deux niveaux et NPC à trois niveaux.

IV.1. CHARGEUR A DEUX NIVEAUX COMMANDE PAR UN REGULATEUR A HYSTERESIS

La structure globale d'un chargeur triphasé, à MLI deux niveaux à contrôle par hystérésis des courants prélevés sur le réseau par un pont redresseur de tension, est présentée sur la Fig. 3 [11] [13] [14].

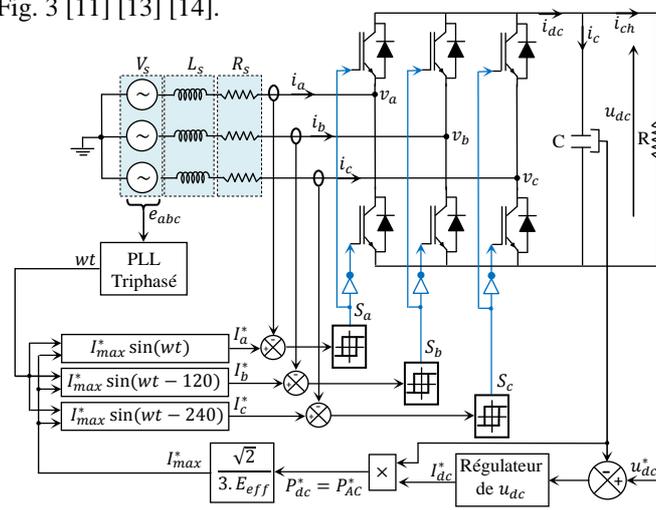


Fig. 2 Structure globale d'un chargeur triphasé à 2 niveaux commandé par régulateur à Hystérésis

Les trois courants $i_{abc}(t)$ sont contrôlés à l'aide de trois comparateurs à hystérésis à bande fixe. L'ensemble des trois sorties de ces comparateurs détermine les ordres de commande des interrupteurs constituant le pont.

Cette structure comprend deux boucles de régulation en cascade: la boucle externe qui contrôle la tension ' u_{dc} ' et la boucle interne qui contrôle les courants triphasés ' i_{abc} '.

Les tensions $e_{abc}(t)$ permettent d'écrire la relation entre les courants $i_{abc}(t)$ et les tensions de phase $v_{abc}(t)$ [11]:

$$v_a(t) = e_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} - R_s i_a(t) \quad (2)$$

$$i_a(t) = \frac{1}{L_s s + R_s} (e_a(t) - v_a(t)) \quad (3)$$

Le courant à la sortie du pont est exprimé par [5]:

$$i_{dc} = C \frac{du_{dc}}{dt} + i_{ch} \quad (4)$$

D'où :

$$u_{dc} = \frac{1}{C_s}(u_{dc} - i_{ch}) \quad (5)$$

Les figures 3-a et 3-b montrent le principe de contrôle du courant i_{abc} et de la tension u_{dc} respectivement en utilisant les équations (3) et (5) [15] [12].

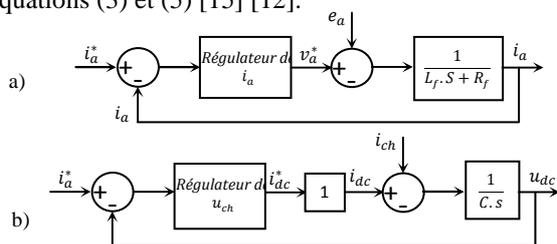


Fig. 3 Structure et principe de contrôle de contrôle a) du courant i_{abc} b) de la tension u_{dc}

La commande par hystérésis consiste à contrôler le courant prélevé par le redresseur pour le maintenir dans une bande, fixe à deux niveaux, de largeur ΔI enveloppant sa référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation aux interrupteurs. Son principe (Fig. 4) consiste à établir la différence (ε_{abc}) entre le courant de référence i_{abc}^* et le courant absorbé par le chargeur i_{abc_mes} . Cette erreur est ensuite comparée à une bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs [7] [14].

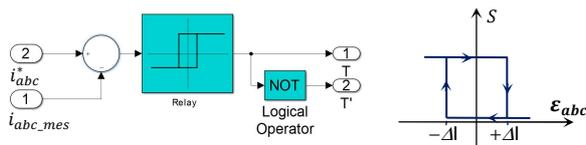


Fig. 4 Principe de contrôle du courant par hystérésis pour un chargeur à 2 niveaux

L'algorithme de cette stratégie est le suivant [14]:
 Si $i_k^* - i_{k_mes} > +\Delta I \Rightarrow S_k = 0$, (k les phases a, b ou c)
 Si $i_k^* - i_{k_mes} < -\Delta I \Rightarrow S_k = 1$
 Si $-\Delta I < i_k^* - i_{k_mes} < +\Delta I$ et $d(i_k^* - i_{k_mes})/dt < 0 \Rightarrow S_k = 1$
 Si $-\Delta I < i_k^* - i_{k_mes} < +\Delta I$ et $d(i_k^* - i_{k_mes})/dt > 0 \Rightarrow S_k = 0$

Le rôle de la boucle de régulation de la tension u_{dc} est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante.

Un régulateur de type PI est souvent utilisé pour la régulation de tension u_{dc} . Le principe de cette boucle de régulation est illustré à la Fig. 5 [11] [12] [13] [15].

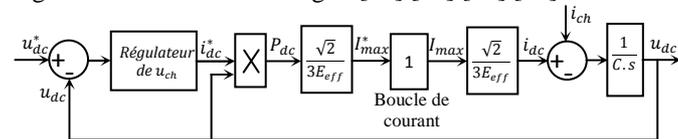


Fig. 5 Schéma bloc de la boucle de régulation de la tension du bus continu

A noter que pour mettre en évidence cette technique dans un contexte CEM, nous avons utilisé MATLAB/Simulink. Les paramètres de simulation sont consignés dans le tableau II.

TABLEAU II
PARAMETRES DE SIMULATION

Paramètres et Symboles	Valeurs
Résistance de la charge (R_{ch})	85 Ω
Capacité du bus continu (C)	2000 μF
Résistance du filtre de raccordement (R_f)	0.3 Ω
Inductance du filtre de raccordement (L_f)	14 mH
Fréquence de la tension alternative (f)	50 Hz
Valeur efficace de la tension alternative (E_{eff})	220 V
Paramètres du régulateurs IP (K_p), (K_I)	0.8672 169.375
Tension de référence (u_{dc}^*)	620 V
Limites de la bande hystérésis ($\pm \Delta I$)	0.03 A

Les figures 6, 7 et 8 illustrent respectivement la tension u_{dc} , le courant prélevé par le chargeur et son spectre fréquentiel.

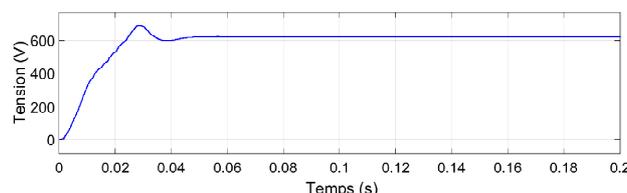


Fig. 6 Tension du bus continu (structure deux niveaux)

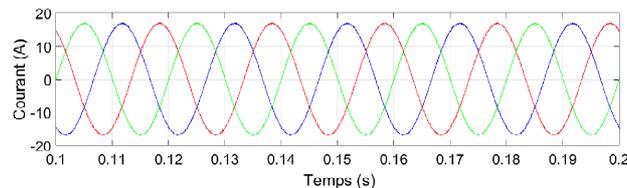


Fig. 7 Courant absorbé par le chargeur (structure deux niveaux)

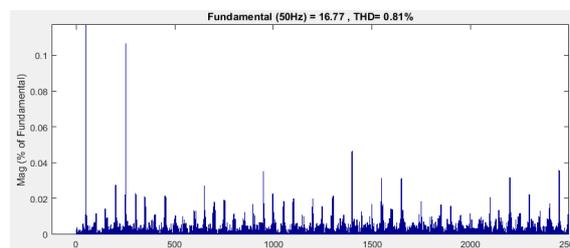


Fig. 8 Spectre d'harmoniques du courant absorbé par le chargeur (structure à deux niveaux)

IV.2. CHARGEUR MLI NPC A 3 NIVEAUX, COMMANDE PAR UN REGULATEUR A HYSTERESIS

Le chargeur à MLI NPC triphasé à trois niveaux est la structure de chargeur la plus répandue dans le marché des VEH. Le principe de ces structures est illustré à la Fig. 9 [1] [16].

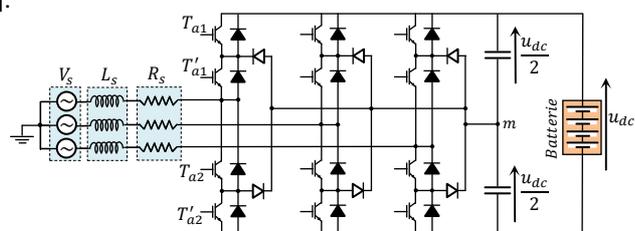


Fig. 9 Chargeur MLI NPC triphasé à 3 niveaux

Par ailleurs, dans la littérature plusieurs stratégies de commandes du redresseur MLI NPC à 3 niveaux sont développées. Aussi, dans ce travail nous avons adopté la technique de contrôle du courant prélevé par un régulateur à hystérésis. Cette commande consiste à contrôler le courant pour le maintenir dans une bande comporte trois niveaux de largeur ΔI (Fig. 10) [14].

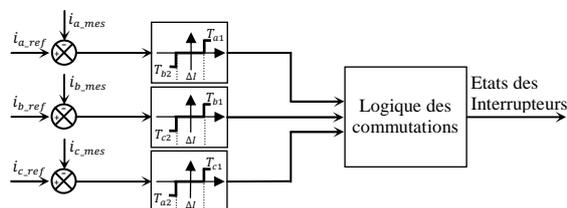


Fig. 10 Principe de contrôle du courant par hystérésis pour un chargeur NPC à 3 niveaux

Le principe de contrôle du courant illustré à la figure 10 nous permet de créer les séquences des vecteurs de commande suivantes [14]: [1100], [0110] et [0011].

Dans les figures 11, 12 et 13, nous présentons respectivement les variations temporelles de la tension u_{dc} , et du courant absorbé par le chargeur ainsi que son spectre d'harmoniques.

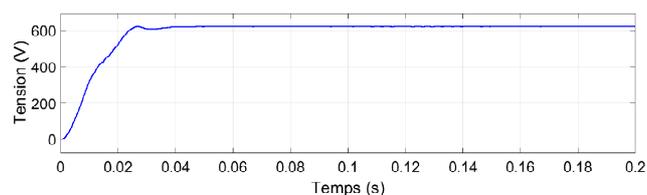


Fig. 11 Tension du bus continu (Structure NPC 3 niveaux)

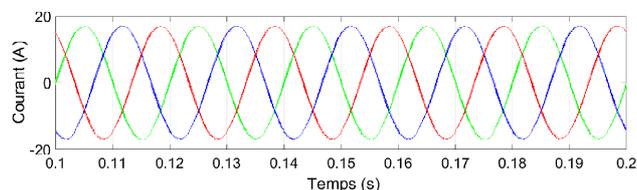


Fig. 12 Courant absorbé par le redresseur (Structure NPC 3 niveaux)

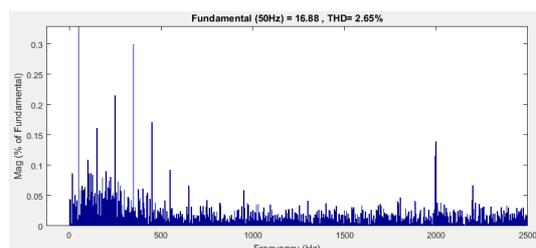


Fig. 13 Spectre d'harmoniques du courant absorbé par le chargeur (Structure NPC 3 niveaux)

D'après les résultats obtenus, nous constatons en premier lieu que la tension à la sortie du chargeur atteint la tension de référence désirée (tension nécessaire pour charger la batterie de VEH) pour les deux structures étudiées, ce qui montre la fiabilité de la boucle de régulation de la tension de bus continu u_{dc} . D'autre part, l'analyse des allures temporelles et

fréquentielles du courant absorbé par le chargeur de batterie montre que le courant absorbé est proche du sinus et que son THD est égal à 0.83% pour la structure de 2 niveaux et à 2.65% pour la structure NPC à 3 niveaux ce qui répond parfaitement aux exigences de la norme internationale CEI 61000-3-12.

V. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons présenté deux topologies des chargeurs embarqués dans les VEH utilisant la technique de contrôle par hystérésis du courant absorbé. Cette technique présente de nombreux avantages liés à la simplicité de son implémentation, au temps de réponse réduit en régime dynamique, et à une précision et une stabilité satisfaisantes.

D'après les résultats obtenus, nous préconisons l'utilisation des techniques de commande avancée, telle que la commande par hystérésis, pour les chargeurs des VEHR afin de respecter les normes CEM basse fréquence spécifiques à ces dispositifs.

REFERENCES

- [1] M. Marzouk "Développement de chargeurs intégrés pour véhicules hybrides plug-in", Thèse Doctorat, université Grenoble, Octobre 2015.
- [2] Journal officiel de l'Union Européenne, "Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des véhicules en ce qui concerne la compatibilité électromagnétique", 2012.
- [3] A. Hanna Nohra "Commande de Filtes Actifs Parallèles sur un Réseau Fortement Perturbé" Thèse Doctorat, Université Saint -Joseph, Toulouse, Janvier 2017.
- [4] Y. Murat, T. Philip "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles", IEEE Trans. on power electronics, vol. 28, n°5, 2012.
- [5] S. LACROIX "Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries", Thèse Doctorat, Université Paris-Sud, Mai 2013.
- [6] EMC limits for harmonic currents of equipment connected with input current >16A and <75A per phase, IEC61000-3-12, 2004.
- [7] N. MESBAHI "Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution", Thèse Doctorat, Université Badji Bokhtar, Annaba, 2014.
- [8] M. Messaoudi "Stratégie de modulation pour la réduction des perturbations conduites générées par un variateur de vitesse à redresseur MLI", Thèse Doctorat, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Université Lille 1, Décembre 2015.
- [9] S. Hagbhin "An Isolated Integrated Charger for Electric or Plug-in Hybrid Vehicles", University of Technology Goteborg, Sweden, 2011.
- [10] S. Hagbhin "Integrated Motor Drives and Battery Chargers for Electric or Plug-in Hybrid Electric Vehicles", Thesis for the degree of doctor of philosophy, University of Technology Gothenburg, Sweden, 2013.
- [11] A. Bouafia, "Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de Puissance: application aux redresseurs a MLI", Thèse Doctorat, université Ferhat Abbas – Sétif, Algérie, 2010.
- [12] N. Belhaouchet "Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application : Amélioration de la Qualité de l'Energie", Thèse Doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif, 2011.
- [13] Y. Touzani "Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant", Thèse Doctorat, Université Blaise Pascal, Marseille, Juillet 2006.
- [14] A. Dwivedi, A.N. Tiwari "Analysis of three-phase PWM rectifiers using hysteresis current control techniques: a survey", International Journal of Power Electronics, Vol. 8, N°. 4, January 2017.
- [15] A. Chaoui "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires", Thèse Doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif, Algérie, Octobre, 2010.
- [16] Y. Loubna "Contribution à l'étude, la modélisation et la commande des redresseurs triphasés non-polluants: application au convertisseur trois-niveaux à point neutre calé", Thèse Doctorat, école de technologie supérieure, université du Québec, 2004.