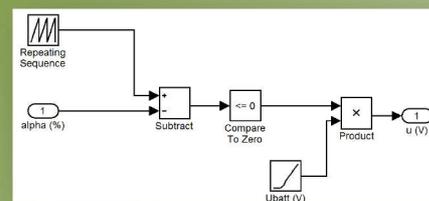
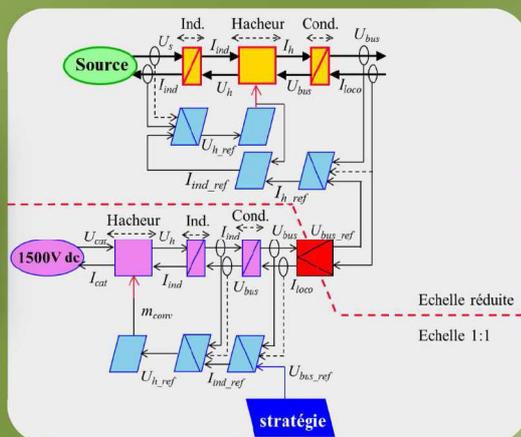
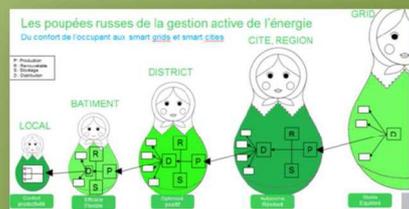
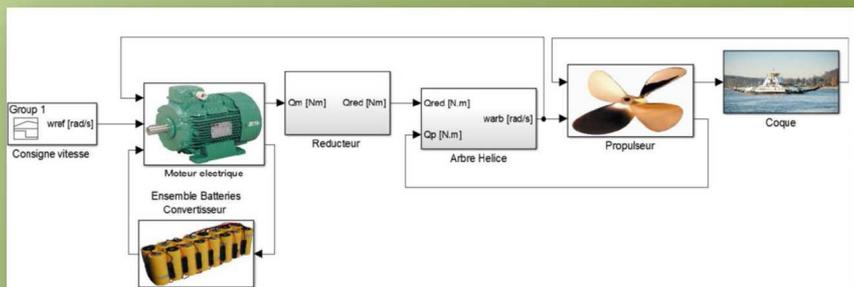


# La Revue SEE



Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



*Innovation du  
GE dans les  
transports*

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

**ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE**



Société de l'Électricité, de l'Électronique  
et des Technologies de l'Information  
et de la Communication

# Abonnez-vous à **La Revue 3E.I**

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



*La Revue 3E.I,  
une publication pédagogique  
de la SEE*

- Outil didactique pour les filières préparant à l'enseignement technique
- Trame indispensable à la formation continue des hommes de terrain
- 4 N° par an : Janvier, Avril, Juillet, Octobre



*La revue 3E.I :  
3 dossiers par an, très complets,  
sur des sujets d'actualité  
+ 1 N° Pratique pédagogique*

### Dossiers thématiques prévisionnels

- Le Génie Electrique dans les procédés
- Cybersécurité (partie 2)
- Stockage de l'Energie Electrique
- Numéro pédagogique / jeunes chercheurs

La Revue 3E.I est une publication trimestrielle de la SEE. Les sommaires des derniers numéros sont disponibles sur le site [www.see.asso.fr/3ei](http://www.see.asso.fr/3ei)



## BULLETIN D'ABONNEMENT 2019

A retourner à la SEE - Service Abonnements, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris cedex 16 - France +33 1 56 90 37 17 - [abo@see.asso.fr](mailto:abo@see.asso.fr)

ABONNEMENT 3E.I 2019 - PLEIN TARIF	INDIVIDUEL		INSTITUTIONNEL (BIBLIOTHÈQUE/LABORATOIRE)	
	France & UE	Hors UE	France & UE	Hors UE
<b>FORMULE DUO</b> (papier + numérique)	42 € TTC	51,12 € HT	60 € TTC	68,74 € HT
Accès numérique 3E.I	France & UE : 30 € TTC		Hors UE : 29,37 € HT	

**FORMULE PREMIUM** : Adhésion SEE + Tarif préférentiel à la revue 3E.I format papier + Accès numérique aux revues 3E.I et REE + Tarifs préférentiels conférences et journées d'études

	Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi
Adhésion SEE	125 € TTC	65 € TTC	15 € TTC
+ Abonnement 3E.I version papier	France & UE : 39 € TTC		Hors UE : 48,18 € HT

TVA de la revue 3E.I : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : [sg@see.asso.fr](mailto:sg@see.asso.fr)

**MES COORDONNÉES**

Prénom :

Nom :

**ADRESSE DE LIVRAISON**

**ADRESSE DE FACTURE** (Si différente)

Adresse :

Code postal :  Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail\* :

\* Obligatoire

Je joins le bon de commande administratif N° :   
et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service :  Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal :  Ville :

Pays :  N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE Hors de France

e-mail\* :

\* Obligatoire

**MON RÉGLEMENT**

Je règle la somme de  €

par  Chèque à l'ordre de la SEE  
 Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte

Date de validité  N° cryptogramme  (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Date  Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements et informations concernant la SEE et ses activités. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris Cedex 16 ou par le formulaire de contact du site web : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)



**ABONNEMENT + RAPIDE : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)**



# SOCIÉTÉ de l'ÉLECTRICITÉ, de l'ÉLECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16  
Tél : 01 56 90 37 09  
site web : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)

**La Revue 3EI**  
publication trimestrielle  
de la SEE

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886  
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

## 3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

<p><b>La Revue 3EI, Édition SEE,</b> 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 PARIS Cedex 16</p> <p><b>Directeur de la publication</b> François GERIN Président de la SEE</p> <p><b>Rédacteur en Chef</b> Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : <a href="mailto:revue3ei@gmail.com">revue3ei@gmail.com</a> ou sur le site <a href="https://www.see.asso.fr/3ei_rubrique">https://www.see.asso.fr/3ei_rubrique</a> "soumettre un article"</p> <p><b>Communication</b> M. Jacques HORVILLEUR <a href="mailto:communication@see.asso.fr">communication@see.asso.fr</a> 01 56 90 37 09</p> <p><b>Promotion et Abonnements</b> (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2018. Tél : 01 56 90 37 09 <a href="mailto:abo@see.asso.fr">abo@see.asso.fr</a></p> <p>tarifs TTC : (revue papier + num) <b>Individuel :</b> France et UE..... 42 € Pays hors UE ..... 53 € <b>Institutionnel :</b> France et UE..... 60 € Pays hors UE ..... 75 € <b>Au numéro :</b> France et UE..... 12 €</p> <p><b>Impression :</b> JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol - 75027 Paris Cédex 1 - Tel : 01 44 76 54 40 Couv.:O.P. : All. – TFR :0 – C. : PEFC Corp.:O.P. :Esp.– TFR :0 – C. : PEFC</p> <p><b>Dépôt Légal : Avril 2018</b> <b>Commission Paritaire 1222 G 78028</b> <b>ISSN 1252-770X</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Sommaire du n° 95</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Numéro spécial : Innovation du Génie Electrique dans les transports</b></p> <p>p. 2 <i>Éditorial,</i></p> <p>p.3 <i>L'expérimentation semi-virtuelle pour booster l'innovation</i> <i>Une méthodologie pour la R&amp;D en environnement contraint</i> Jose DOMINGO SALVANY<sup>1</sup>, Tony LETROUVE<sup>2</sup>, Guillaume GAZAIGNES<sup>2</sup> <sup>1</sup>Responsable R&amp;T - NEXTER Electronics <sup>2</sup>SNCF Innovation &amp; Research, 40 Avenue des Terroirs de France, 75012 Paris</p> <p>p.9 <i>Utilisation d'une plateforme HIL pour l'estimation des gains de récupération</i> <i>d'énergie de freinage d'un TER électrique</i> J. PASCAL<sup>1,2</sup>, T. LETROUVE<sup>1</sup> <sup>1</sup> SNCF Innovation &amp; Research, 40 Avenue des Terroirs de France, 75012 Paris, France <sup>2</sup> ITG, 18 rue de la Ville-l'Évêque, 75008 Paris, France</p> <p>p.16 <i>Évaluation des capacités de freinage récupératif sur un navire électrique</i> N. BENNABI<sup>1, 2</sup>, H. MENANA<sup>3</sup>, J-F. CHARPENTIER<sup>1</sup>, J. Y BILLARD<sup>1</sup>, B. NOTTELET<sup>2</sup> <sup>1</sup> Institut de Recherche de l'École Navale (IRENav), 29240 Brest, France. <sup>2</sup> SEGULA Technologies, 76600, Le Havre, France. <sup>3</sup> Groupe de Recherche en Électrotechnique et Électronique de Nancy (GREEN), 54000 Nancy, France.</p> <p style="text-align: right;"><b>Hors Thème :</b></p> <p>p.23 <i>Aperçu du fonctionnement des fours à arc</i> Jacques COURAULT</p> <p>p.38 <i>Comment organiser une formation Matlab™/Simulink</i> Julien SERRES Aix Marseille Univ, CNRS, ISM, Marseille, France Institut des Sciences du Mouvement – Etienne-Jules Marey, Equipe Biorobotique CP910 - 163, av. de Luminy 13288 MARSEILLE cedex 09</p> <p>p.46 <i>Quel paradigme pour les réseaux électriques intelligents ?</i> Vincent MAZAURIC, Véronique BOUTIN et Alfredo SAMPERIO, Claude Le PAPE- GARDEUX Schneider Digital, 38TEC, 38050 – Grenoble France</p> <p>p.49 <i>Emulateur d'une hydrolienne</i> Yassine AMIRAT<sup>1</sup>, Gilles FELD<sup>1</sup>, Elhoussin ELBOUCHKHI<sup>1</sup>, Mohamed BENBOUZID<sup>2</sup>, Nicolas RUIZ<sup>3</sup>. <sup>1</sup> ISEN Yncréa Ouest Brest, UMR CNRS 6027 IRDL, 29200 Brest, France <sup>2</sup> Université de Brest, UMR CNRS 6027 IRDL, 29238 Brest, France. <sup>3</sup> Guinard-Energies Brest, France</p>
--	---

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées. Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425)

*Le Génie Electrique est un domaine mature qui ne cesse de se renouveler. La recherche d'économie d'énergie et d'optimisation est permanente dans tous les domaines d'application du Génie Electrique.*

*C'est avec le thème du « Innovations du Génie Electrique dans les transports » que nous avons donc choisi de débiter cette année 2019. Les articles que nous avons sélectionnés pour ce numéro ne couvrent bien évidemment pas toutes les applications du domaine mais nous permettent d'y jeter un coup d'œil du côté des transports ferroviaires et maritimes.*

**« Thème : Innovations du Génie Electrique dans les transports »**

*M. Letrouvé et M. Gazaïgues de «SNCF Innovation & Recherche» nous proposent un article sur « l'expérimentation semi-virtuelle pour booster l'innovation » appliquée au domaine ferroviaire. Ils exposent comment, à la SNCF, les équipes de R&D intègrent les nouveaux outils numériques pour valider un ensemble de fonctionnalités, lorsque l'expérimentation de terrain est difficile ou coûteuse.*

*M. Pascal et son collègue M. Letrouvé nous présentent dans un second article, l'application de la méthode du « Hardware In the Loop » pour l'estimation des gains de récupération d'énergie de freinage d'un TER. Les gains énergétiques des améliorations envisagées peuvent ainsi être évalués dans des conditions plus proches de la réalité.*

*Le dernier article du thème nous est proposé par M. Bennabi et ses coauteurs. Ici, l'innovation consiste à étudier la possibilité de récupérer de l'énergie lors du freinage d'un navire de faible tonnage équipé d'une chaîne de propulsion entièrement électrique ou hybride. Ces travaux mettent en évidence la possibilité d'une augmentation considérable de l'énergie récupérée.*

**« Hors thème » :**

*Dans son article M. Courault nous fait bénéficier de sa grande expérience du monde industriel et particulièrement de la conception des fours à arc à courant continu ou alternatif. L'analyse présentée permet d'expliquer pourquoi les fours à courant alternatif sont majoritairement installés dans le monde.*

*Nous sommes nombreux à utiliser les logiciels Matlab et/ou Scilab dans nos enseignements. M. Julien Serres présente ici un mini-projet de simulation Matlab™/Simulink conçu pour 18 heures de formation destinée à des étudiants en première année d'école d'ingénieurs (niveau bac+3). Il y développe la pédagogie active mise en place, l'organisation de la formation, et les modalités d'évaluation.*

*L'article de M. Mazauric et de son équipe de « Schneider Digital » fait le point sur l'intelligence dans les systèmes électriques, les fameux « Smart Grids » qui nous procurent un chemin technologique pour transformer les systèmes électriques depuis une structure fortement centralisée vers une organisation multi-échelles permettant d'assurer au mieux l'équilibre offre-demande.*

*Le dernier article de ce numéro présente l'étude et le développement d'un prototype d'hydrolienne de petite puissance. Cet article de l'équipe de M. Amirat de l'ISEN nous expose un exemple très concret de réalisation mettant en œuvre de nombreuses compétences du Génie Electrique de la conception à la réalisation en passant par la simulation et les manipulations intermédiaires.*

Bonne lecture

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

**La Revue 3EI**

**Comité de publication**

Morgan ALMANZA

Hamid BEN AHMED

Arnaud BRUGIER

Jacques COURAULT

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean Michel GAY

Jean-Philippe ILARY

Anthony JUTON

Chérif LAROUCI

Marie-Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Denis LABROUSSE

Pascal LOOS

Marc PETIT

Sylvain PIETRANICO

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

---

**Faites connaître notre revue  
Vous en assurez la pérennité**

---

# L'expérimentation semi-virtuelle pour booster l'innovation

## Une méthodologie pour la R&D en environnement contraint

**Tony LETROUVE, Guillaume GAZAIGNES,**

SNCF Innovation & Research, 40 Avenue des Terroirs de France, 75012 Paris, France

**Résumé :** Les nouvelles technologies et nouveaux concepts sont contraints par des cycles d'innovation, de recherche et de développement de plus en plus courts. Or différentes phases sont nécessaires pour établir des hypothèses, maîtriser les produits et leur intégration, et valider les performances promises. La compétence des ingénieurs et techniciens est alors déployée tout en consommant des ressources, financières et temporelles, ce qui génère souvent un décalage entre le produit et son marché. L'expérimentation semi-virtuelle vient résoudre ce paradoxe.

### 1. Intérêt des méthodes traditionnelles

#### 1.1. Le prototypage

Les approches utilisées aujourd'hui pour industrialiser les innovations dans le domaine de l'énergie sont souvent basées sur le prototypage. Du besoin client à la réponse de faisabilité, seule une étude de dimensionnement basée sur une modélisation en flux de puissance est effectuée. Puis un prototype représentatif du produit final est réalisé et testé en conditions d'utilisation réelle. L'avantage de cette approche est qu'elle permet de valider l'intégration des développements directement dans l'environnement réel : comportement électrique, compatibilité électromagnétique, température de fonctionnement, etc. Cependant cette phase de prototypage est effectuée à un coût très élevé et présente des risques accrus vis-à-vis de la sûreté de fonctionnement lors des tests de conformité et essais des modes défauts notamment (défaillances ou aléas dus à l'environnement, pouvant impacter le fonctionnement du dispositif développé). Faire face à l'ensemble des contraintes d'intégration et de gestion logicielle peut impacter de manière très négative le temps passé pour le développement. Enfin, des moyens de production doivent parfois être immobilisés pour pouvoir effectuer les tests et développements. Un TGV immobilisé représente une perte de chiffre d'affaires de plusieurs dizaines de milliers d'euros par jour.

#### La simulation

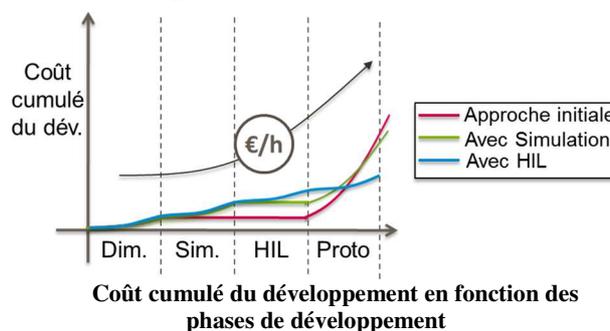
Pour pouvoir baisser le coût global de l'innovation, l'ajout d'une étape intermédiaire prend sens. Cette étape intermédiaire permet, par simulation, de faire un premier débogage de certains sous-systèmes ou sous-fonctions (contrôle, gestionnaire énergétique, etc.) dans un environnement contrôlé et répétable. Cependant, la simulation est une étape qui peut être mise à défaut par la plage de validité des modèles utilisés. Par exemple les prévisions de consommation d'électricité d'un pays sont souvent meilleures que les prévisions de consommation de chaque foyer pris individuellement, alors qu'ils répondent aux mêmes variables météorologiques, modes de construction, types d'usages, etc. De plus, la portabilité temps réel de modèles développés dans un

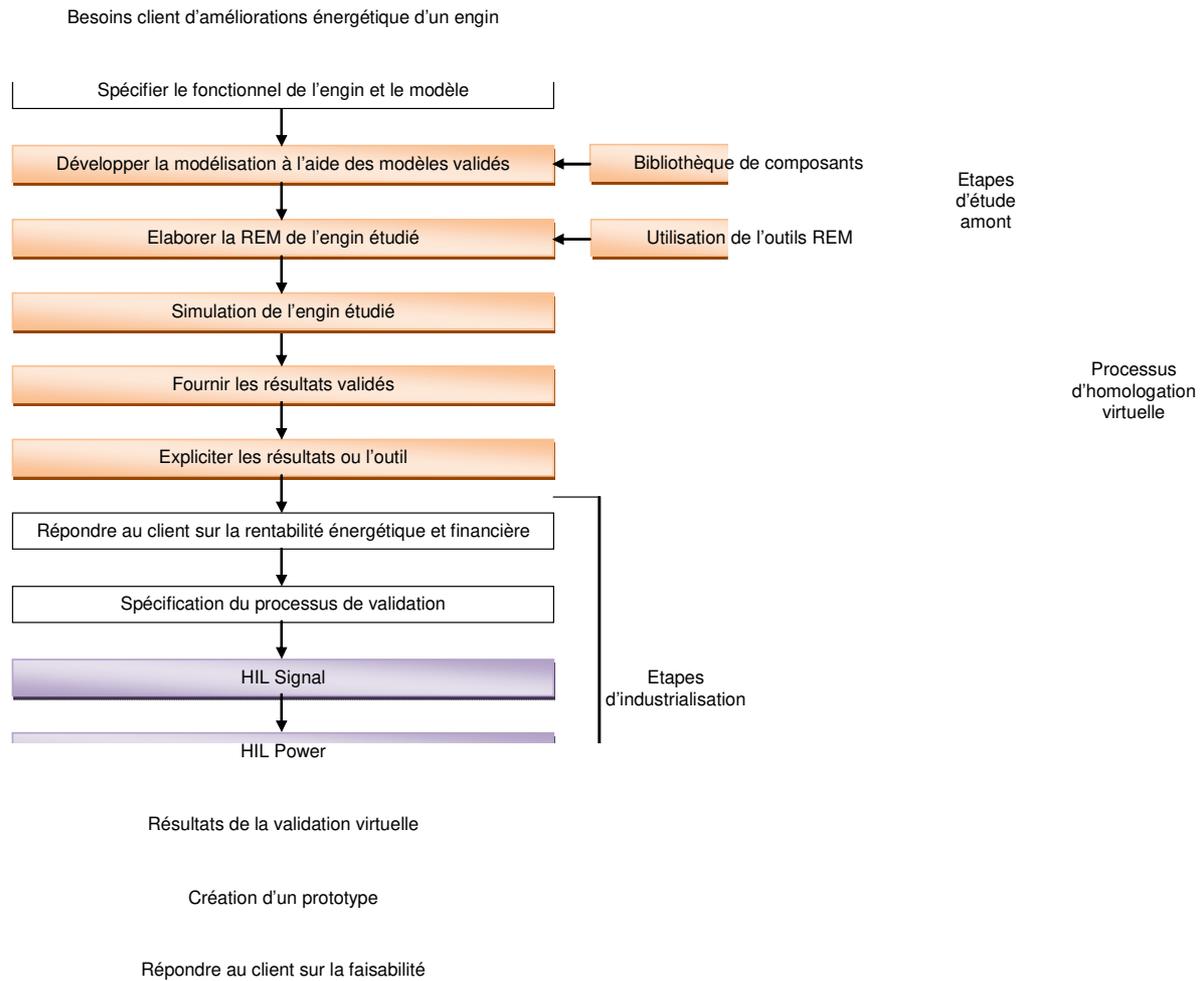
logiciel de simulation non-séquentiel n'est pas prouvée. Plus simplement, la méthode de modélisation est intimement liée à l'exploitation escomptée des résultats. Enfin, il est très compliqué d'homologuer virtuellement certains composants et logiciels uniquement par la simulation.

Ces problèmes pourraient être résolus en développant des modèles très fins du système étudié, et prenant en compte toutes les interactions du système étudié avec son environnement. Cependant le développement de tels modèles est complexe, et requiert des puissances et temps de calcul importants.

#### La simulation augmentée en renfort

Le principe de la simulation HIL (Hardware-In-the-Loop) est d'ajouter des briques physiques dans la boucle de simulation, c'est-à-dire d'y associer de véritables composants. La plupart des utilisations dans le ferroviaire consistent à tester des technologies dans un environnement émulé, par exemple une batterie au Lithium. Cette étape permet de diminuer drastiquement le temps passé sur le prototype (jusqu'à 70% pour l'étude des interactions pantographe-caténaire, cf. projet Triotrain), de valider la portabilité temps réel des gestions développées et d'homologuer virtuellement certains sous-systèmes.





### Cheminement de la réponse client en intégrant le processus de développement semi-virtuel

Il existe deux types de simulation HIL : une de type puissance et une de type signal.

#### 1.2. La simulation HIL de type signal

Une « simulation HIL » de type signal permet de tester l'ECU (Electronic Control Unit) avant son implantation dans le système. Le terme ECU correspond non seulement au microcontrôleur permettant d'effectuer les calculs de la commande en temps réel en fonction des mesures et des références, mais aussi à la commande implantée dans ce dernier. Dans cette simulation, toute la partie puissance (ex. la chaîne de traction pour un véhicule) est remplacée par des modèles dans un environnement de simulation temps réel. Un autre ordinateur temps réel doit donc être utilisé. Le système d'interface ne gère que des signaux, d'où le nom de ce type de « simulation HIL ». Lors d'une « simulation HIL » de type signal, les différents modèles du système étudié doivent être d'une précision adaptée à l'étude visée. Plus les modèles seront fins, plus les temps de calcul nécessaires seront grands. Aujourd'hui, avec l'augmentation de la rapidité de calcul des

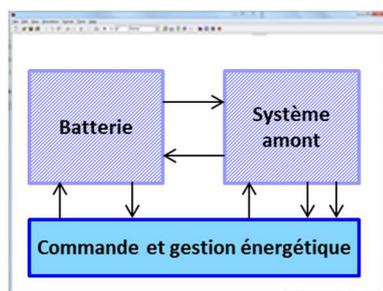
ordinateurs, il est possible de faire compiler en temps réel des modèles très fins. Cependant, avec un ordinateur moins puissant, il est impossible de simuler en temps réel un modèle fin.

#### 1.3. La simulation HIL de type puissance

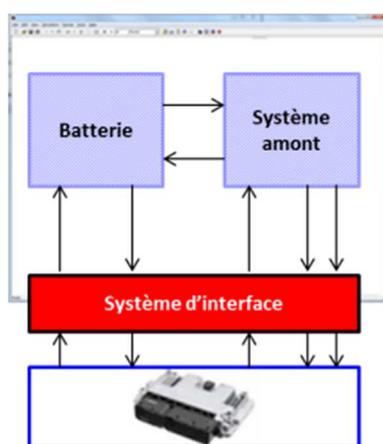
Une « simulation HIL » de type puissance permet de tester l'ECU mais aussi un ou plusieurs sous-systèmes de puissance (ex. batterie, machines électriques, convertisseurs, etc.) avant leur implantation dans le système réel complet. Dans une « simulation HIL » de type puissance, le système de puissance est séparé en deux : le sous-système réel testé et le sous-système émulé, c'est-à-dire simulé. L'interface échangera donc des variables de puissance avec le sous-système testé et des signaux avec le sous-système émulé. L'objectif de cette simulation est de tester le sous-système dans différents cas de figure, notamment le fonctionnement en cas de défauts, avant son implantation dans un système global. Par rapport à un test sur prototype, où les tests sont effectués par un conducteur, dans une « simulation HIL » la répétabilité des essais permet de

mieux tester les performances et les modes dégradés des sous-systèmes.

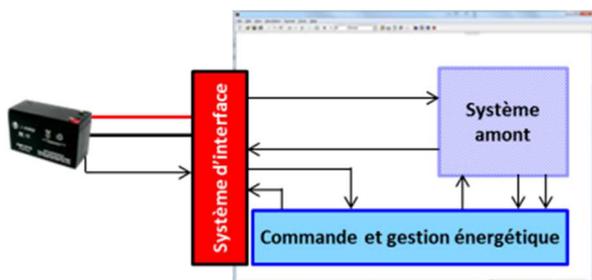
#### Schéma des différentes étapes virtuelles :



a. Simulation



b. Signal HIL simulation



c. Puissance HIL simulation d'un système de stockage

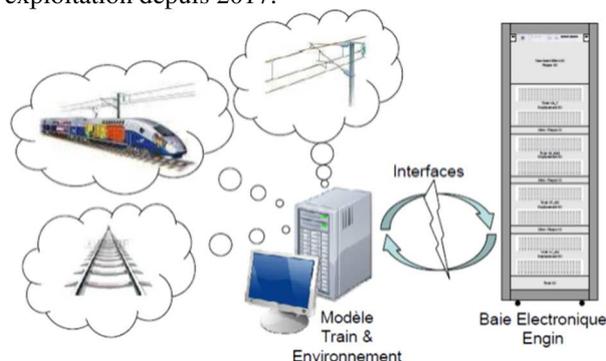
## 2. Illustration par 3 projets

La méthodologie HIL a été déployée dans le domaine ferroviaire français au travers de nombreux projets d'innovation : validation du contrôle-commande d'une locomotive hybride (diesel, batteries, super-capacités et hydrogène), développement des algorithmes de gestion énergétique d'une gare, ou encore essai de nouveaux équipements de signalisation ferroviaire...

Ces projets s'appuient d'abord sur des moyens expérimentaux à échelle réduite en laboratoire. Cela permet d'explorer et d'expérimenter des innovations parfois disruptives, tout en validant la valeur ainsi créée. Les innovations les plus prometteuses sont ensuite testées sur des moyens à taille réelle pour améliorer la représentativité tout au long des développements.

### SIMHIL – Simulateur d'un TGV

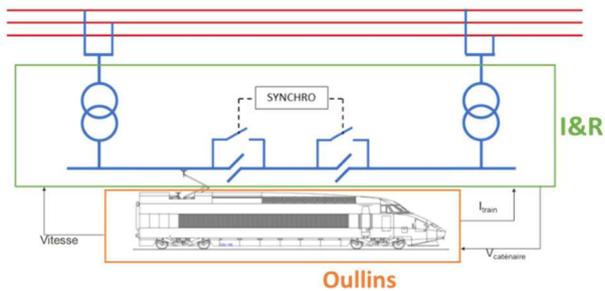
Les mises à jour de software des baies de commande des trains entraînent des immobilisations, environ 10 jours, pour en vérifier le bon fonctionnement. Cela entraîne des coûts importants (humains et matériels) et du temps. Pour résoudre cette problématique un banc de test des modifications software apportées aux baies de commande des TGV a été développé pour diminuer drastiquement le temps passé « en ligne ». Les gains apportés par le HIL sont la validation des tests dans un laboratoire sans immobilisation du matériel roulant, les tests sont répétables et les bugs traités plus efficacement, les tests de défauts connus peuvent être réalisés dans un environnement maîtrisé et sécurisé. Ce banc est en exploitation depuis 2017.



### 2.1. SEC – Section Élémentaire de Commutation

Le projet SEC consiste à préparer une innovation sur l'infrastructure d'alimentation par caténaire, pour améliorer la performance des lignes ferroviaires à grande vitesse notamment. Sur le réseau alternatif monophasé de 25 kV des sections de séparation neutres sont présentes pour isoler électriquement entre elles les sous-stations. Ces sections non-alimentées provoquent des pertes de vitesse et donc une perte de rentabilité pour la ligne. Ce projet consiste à développer un disjoncteur et sa commande associée permettant l'alimentation des sections de séparation des réseaux alternatifs par les sous-stations avoisinantes en passant de l'une à l'autre très rapidement. La simulation HIL est utilisée pour tester les disjoncteurs, leurs commandes et les stratégies de passage d'une phase à l'autre dans un environnement ferroviaire émulé. Ainsi est étudié l'impact de ce changement de phase sur le matériel roulant émulé. Le

projet HIL commencé en 2017 prévoit des tests en laboratoire, puis sur banc industriel et sur voies d'essais, avant de l'implanter sur une ligne en construction.



## 2.2. Sous-station hybride sur la plateforme Concept Grid

Le transport guidé souffre de deux problématiques liées à la capacité de son alimentation. La première est liée à la puissance maximale que peut fournir le réseau électrique. Il arrive que la puissance demandée à la caténaire soit supérieure à la puissance souscrite auprès de l'opérateur réseau. Pour encourager la maîtrise de ce phénomène des pénalités sont attribuées au gestionnaire de réseau. Le surcoût souvent important est facturé aux acteurs du ferroviaire. La deuxième problématique relève de la chute de tension pouvant subvenir entre deux sous-stations. Cette chute de tension amène à un fonctionnement non-nominal (dégradé) qui entraîne une chute de vitesse des trains et un déplacement de la marche des trains qui empêche les lignes de fonctionner à leur capacité maximale.

Plusieurs solutions sont disponibles pour répondre à ces problématiques : installation d'un feeder (ligne parallèle), augmentation de la puissance de raccordement de stations incriminées, ajout d'une sous-station, etc. Cependant ces solutions sont chères et ne sont pas toujours réalisables. C'est le cas par exemple de géographies particulières (vallées, parcs naturels...). Pour répondre à ces problématiques une solution est étudiée : l'hybridation des sous-stations (IFTE hybride) avec des énergies décentralisées et des systèmes de stockage.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une démarche progressive de développement et de validation des gains potentiels de l'hybridation d'une IFTE. Pour mettre au point le premier prototype d'un système complexe, deux échelles d'émulation ont été réalisées pour permettre la mise au point progressive du système dans un environnement maîtrisé. La première, à échelle réduite, est effectuée sur une plateforme OPAL-rt dans le laboratoire de SNCF I&R. Cette première étape a pour intérêt de mettre en place l'expérimentation finale et de s'assurer de la portabilité en temps réel de la commande et de la gestion énergétique développée à coût réduit. Dans un second temps, l'échelle pleine dans un environnement industriel comme celui de la plateforme EDF - Concept Grid, permet de valider le dimensionnement du système étudié, de valider la gestion énergétique avec les incertitudes et retards de télécommunication inhérents à l'utilisation de capteurs et d'actionneurs réels.

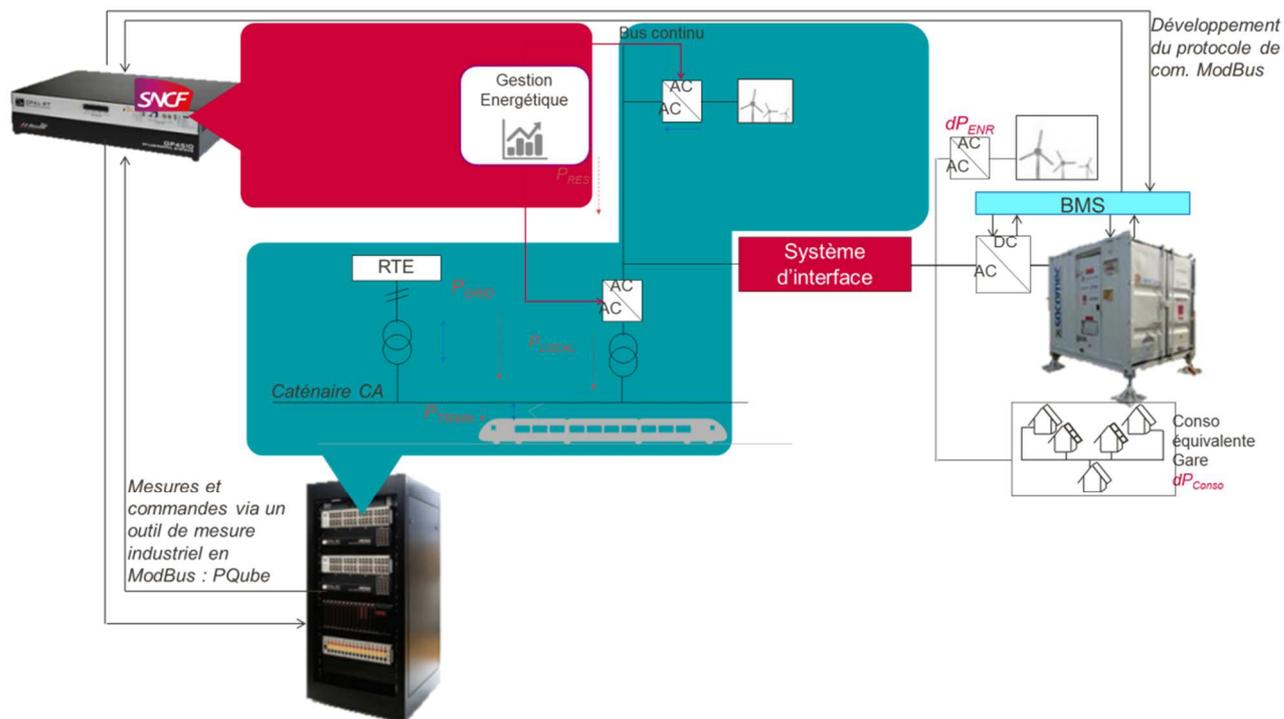
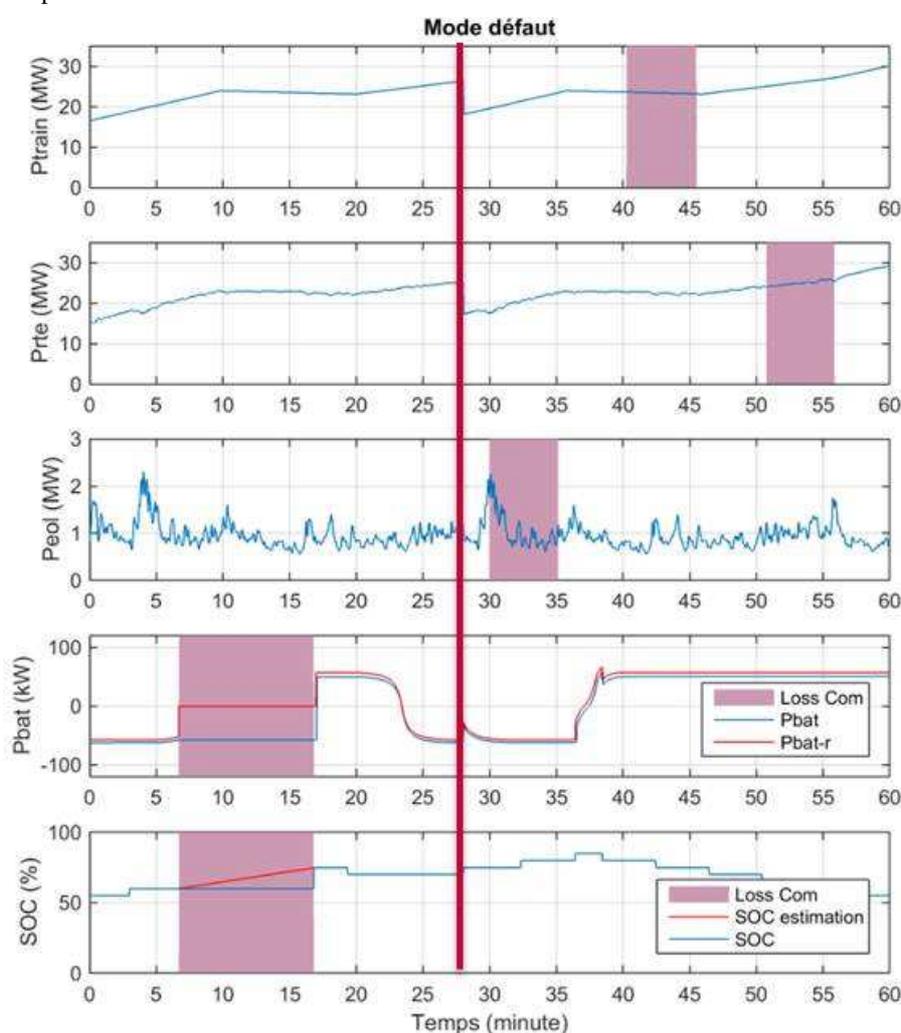


Schéma de l'expérimentation réalisée sur la plateforme expérimentale.

Une campagne de tests a été menée pendant une semaine. Lors de cette semaine deux dimensionnements ont été étudiés. Le premier est le dimensionnement optimal identifié à partir de l'outil CONIFER. Pour ce premier dimensionnement plusieurs mode de fonctionnement ont été réalisés : le mode nominal, les modes défauts, des essais de robustesse (modification des profils éoliens et ferroviaire par rapport aux prévisions) et l'ajout d'un mode effacement. Le deuxième a pour objectif de vérifier que les possibilités offertes par un stockeur de plus forte capacité. Pour ce deuxième dimensionnement seul le mode nominal a été réalisé. Les résultats des modes défauts testés sont disponibles sur l'illustration 4. Les trois premières courbes montrent la perte d'un capteur au niveau du train, de point de livraison RTE (Réseau de Transport d'Electricité) et de la puissance éolienne.

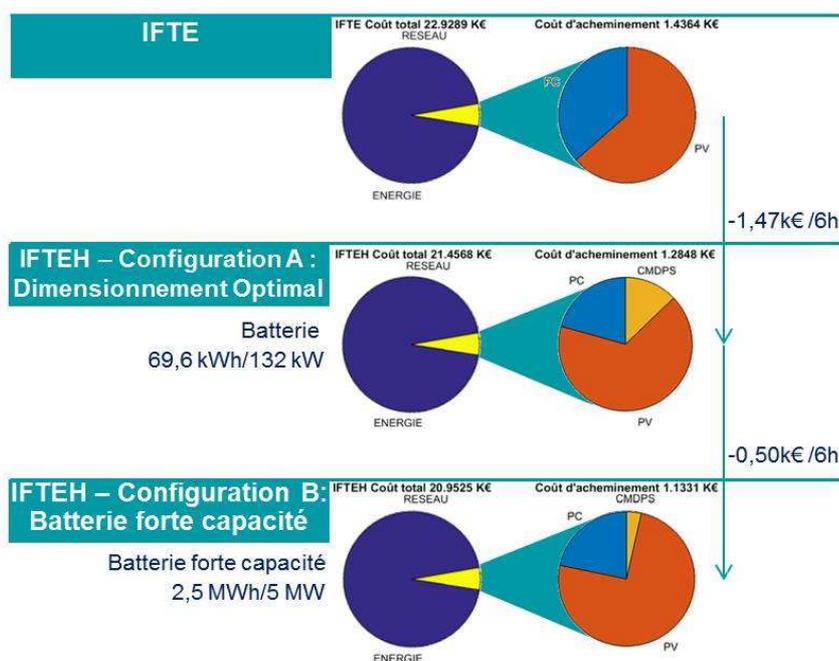
Lors de la perte d'un capteur, le gestionnaire énergétique, grâce à la redondance des informations, recalcule automatiquement l'information manquante pour continuer de fonctionner. Si deux capteurs sont perdus le gestionnaire énergétique émet un message d'alerte et ouvre les éléments de sécurité. Lors de la perte de communication effectuée en ModBus entre le BMS (Battery Management System) et le gestionnaire énergétique, une commande nulle au système de stockage est appliquée. Cependant, ce dernier ne peut plus recevoir cette information et donc reste sur la dernière valeur demandée (~60kW dans notre cas). Ce test a mis en avant la nécessité de supervision multiple par différents leviers (protocole de communication) du système de stockage pour éviter ce phénomène.



Résultats des essais pour différents défauts (pertes de communication et de capteurs de mesure)

Une analyse financière a ensuite été menée pour étudier la rentabilité de l'hybridation des IFTE (Illustration 5). Cette analyse montre que la facture d'électricité peut diminuer environ 6% (1,47k€/6h) avec hybridation, notamment jusqu'à 25% sur le coût d'acheminement de l'électricité du réseau de transport jusqu'à la sous-station. Le retour sur investissement de

l'hybridation de cette sous-station a été estimé à 8 ans. Avec une batterie plus forte puissance (5 MW), la facture peut encore être diminuée d'environ 1% mais l'investissement nécessaire est bien plus élevé. Cependant, l'accès aux services supplémentaires rémunérés, comme les services réseaux (régulation de fréquence, effacement) pourraient être plus accessibles avec ce type de batterie.



### Résultats économiques de l'hybridation d'une sous-station d'alimentation selon les différents dimensionnements.

Le projet Concept Grid ferroviaire en images :  
<https://youtu.be/uvdrk8oLjHM?t=158>

### 3. Un saut dans l'innovation au XXIème siècle

Nous avons exposé ici un nouveau processus de R&D. L'expérimentation semi-virtuelle vient se substituer aux méthodes traditionnelles pour valider un ensemble de fonctionnalités, lorsque l'expérimentation de terrain est difficile ou coûteuse. La technologie et l'environnement étant de plus en plus complexes, dans quasiment tous les secteurs d'activité, cette méthode sera déployée par de nombreux acteurs. La puissance de cette approche sera ensuite multipliée lorsqu'elle sera couplée dans les faits avec un grand nombre d'objets connectés, l'enrichissement de données de masse, ou encore les jumeaux numériques.

# Utilisation d'une plateforme HIL pour l'estimation des gains de la récupération d'énergie de freinage d'un TER

J. PASCAL<sup>1,2</sup>, T. LETROUVE<sup>1</sup>

1. SNCF Innovation & Research, 40 Avenue des Terroirs de France, 75012 Paris, France

2. ITG, 18 rue de la Ville-l'Évêque, 75008 Paris, France

**Résumé :** Le HIL (Hardware-In-The-Loop) consiste en l'intégration de composants réels dans une boucle de simulation. L'application de cette méthode dans un projet d'estimation des gains de la récupération d'énergie de freinage d'un TER est avantageuse. Elle permet de valider la commande et la stratégie de gestion du système en temps réel, et de considérer les phénomènes liés à l'utilisation d'éléments physiques.

## 1. Introduction

Dans le domaine de l'énergie, le prototypage est souvent la base de l'industrialisation d'une innovation. Dans ce cas, la seule étape intermédiaire entre le besoin client et la réponse de faisabilité est le dimensionnement basé sur une modélisation en flux de puissance. S'en suit la réalisation d'un prototype et les essais dans des conditions réelles. Cette approche a pour avantage de valider la mise au point des commandes et gestions énergétiques du système, d'homologuer la partie puissance, et de prendre en compte la plupart des phénomènes physiques. Cependant, le développement et les tests d'un prototype ont de multiples inconvénients. Coûteux, complexe, mais également long à développer, un prototype est contraignant à tester en raison de la réservation de matériel nécessaire et des risques de sécurité qu'il représente.

Le développement de modèles très fins du système étudié permettrait de résoudre ces problèmes. Ces modèles sont cependant complexes à développer, et nécessitent des puissances et temps de calcul importants.

Le principe du HIL (Hardware-In-The-Loop) [1] est d'intégrer des éléments physiques dans la boucle de simulation. Cette étape permet de diminuer drastiquement le temps passé sur le prototype, de valider la portabilité temps réel des gestions développées et d'homologuer virtuellement certains sous-systèmes. Dans le ferroviaire, cette méthode est souvent utilisée pour tester des technologies dans un environnement simulé [2] [3] [4].

Pour estimer les gains de l'amélioration de la gestion des auxiliaires et de l'ajout d'un Système de Stockage d'Énergie (SSE) sur la récupération de l'énergie de freinage d'un train, une modélisation en flux de puissance peut être une première étape. Néanmoins, des hypothèses de travail plus ou moins importantes doivent être faites sur des éléments tels que les machines électriques ou les SSE. Dans le cas contraire, le temps de développement et la complexité des modèles peuvent croître rapidement.

Dans ce cas, l'utilisation du HIL ne permet pas seulement de valider la commande et la stratégie de gestion du système en temps réel. Intégrer un système

de stockage, une alimentation du train, et une machine de traction en réel dans la boucle de simulation dispense du développement de modèles fins, tout en rendant le bilan énergétique plus réaliste.

Cet article vise dans un premier temps à présenter le modèle de train développé en amont du passage au HIL, puis à expliquer comment le passage de la simulation sur ordinateur à la simulation en temps réel a été effectué. La partie suivante de l'article sera donc sur la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) et la commande du train [5] [6]. Elle sera suivie de la partie sur le passage au HIL, puis des résultats obtenus.

## 2. Représentation énergétique du train

Cette partie explique comment une première représentation physique d'un train a été développée grâce à la REM. La Représentation Énergétique Macroscopique est un formalisme de représentation fonctionnelle d'un système énergétique se basant sur les principes de causalité intégrale et d'action-réaction. Elle est formée de modèles correspondant aux différentes parties composant le système représenté. Ces modèles échangent des flux d'énergie émis par des sources (ovales verts) qu'ils vont convertir (carrés et ronds jaunes), distribuer (groupes de carrés jaunes), ou accumuler (rectangles jaunes barrés). En découle ensuite une structure de commande systématique et une stratégie de gestion des flux énergétiques.

Le schéma structurel Figure 1 sert de base au développement de la REM du train.

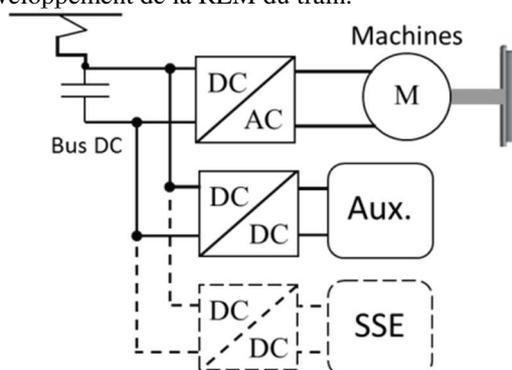


Figure 1: Représentation structurelle du TER considéré

### 2.1. Représentation alimentation 1500V CC

L'alimentation du train est faite par un hacheur abaissant la tension caténaire. La tension du hacheur est ensuite lissée par un filtre LC, fournissant ainsi une tension continue  $U_{bus}$  susceptible de varier lors des dynamiques de puissance du train [5]. Cette tension de bus est régulée par une boucle de tension suivie d'une boucle de courant composés de deux correcteurs Proportionnel Intégral (PI) (1)(2).

$$I_{ind\_ref} = I_{loco} + C_C(t)(U_{bus\_ref} - U_{bus}) \quad (1)$$

$$U_{h\_ref} = U_{bus} + C_L(t)(I_{ind\_ref} - I_{ind}) \quad (2)$$

La REM et la commande de ce système sont illustrés Figure 2 avec en vert et jaune la partie physique, et en bleu la partie commande [5].

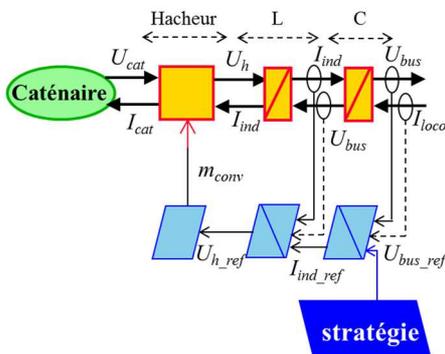


Figure 2: REM et commande de l'alimentation du TER.

La stratégie quant-à-elle fournit une tension de bus référence à la commande. Pour cette étude, la tension référence du bus restera constante. Elle pourrait dans de futurs travaux être à l'image d'une tension variant en raison de différents appels de puissance.

### 2.2. Représentation de la chaîne de traction

La chaîne de traction est directement reliée à l'alimentation précédemment décrite. Elle est composée d'une machine électrique commandée en couple, d'un différentiel, des roues et freins, et du châssis du train [7] [8]. La partie commande a pour organe principal le correcteur PI prenant comme entrée  $V_{loco}$  la vitesse de la locomotive, et  $V_{loco\_ref}$  la vitesse référence fournie par le cycle de vitesse du train. Cette commande est également déduite de la représentation physique. L'ensemble est illustré par la Figure 3.

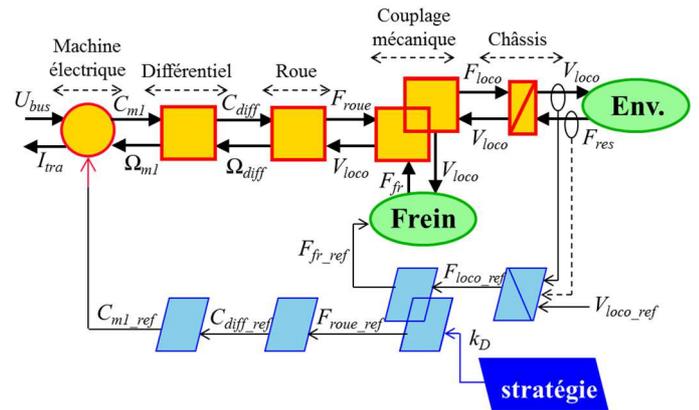


Figure 3: REM et commande de la chaîne de traction.

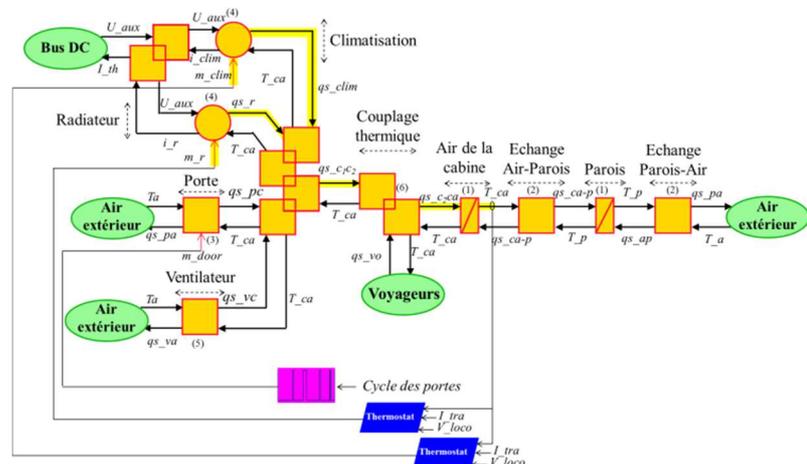
La stratégie fournit un coefficient de distribution  $k_D$  servant à répartir la force de freinage entre le frein mécanique et la machine électrique. Ce coefficient dépend de la vitesse du train et de la puissance de freinage que la machine électrique est capable de fournir.

### 2.3. Auxiliaires et amélioration de leur gestion

#### 2.3.1. Chauffage et climatisation

Le premier auxiliaire représenté et aussi celui consommant le plus d'énergie est le chauffage. Pour connaître sa consommation, une représentation énergétique macroscopique de la thermique de l'habitacle d'une voiture du TER est développée. L'élément principal de celle-ci est l'air de l'habitacle. Cet élément d'accumulation échange des flux de chaleur avec d'une part l'air extérieur via la parois, le ventilateur, et les portes, et d'autre part avec le système de chauffage et climatisation [9]. Le flux de chaleur apporté par le chauffage est calculé en fonction de la puissance électrique consommée par le radiateur et la température de la cabine [9]. La climatisation quant à elle a été intégrée par anticipation de futurs travaux qui ne seront pas développés ici. La chaleur dégagée par les voyageurs est également prise en compte dans l'étude [9]. La REM de cet ensemble est illustrée Figure 4.

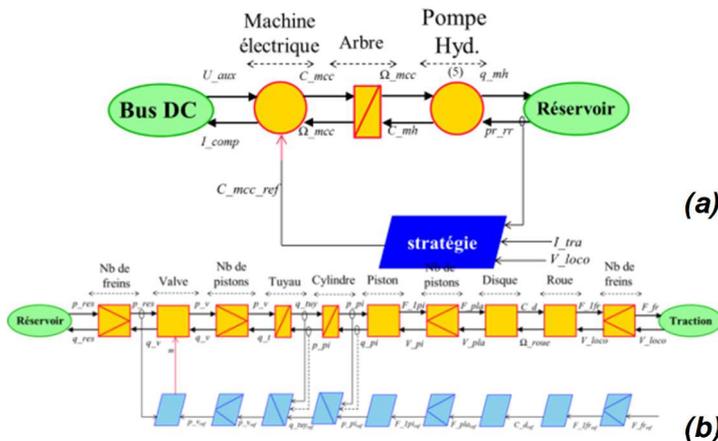
Figure 4: REM et thermostat de la thermique d'un habitacle.



Le flux d'air apporté par l'ouverture des portes est déclenché lorsque le train est à l'arrêt. La régulation de la température est faite par une stratégie thermostat, allumant le radiateur lorsque la température chute en dessous de 20°C, et l'éteignant lorsque la température dépasse les 22°C. Lorsque le train freine ( $I_{tra} < 0$ ), les seuils bas et haut du thermostat sont augmentés à 24 et 26°C au lieu de 20 et 22°C. Ceci permet de garantir la mise en route du chauffage lors d'un freinage, tout en évitant que la température de l'habitacle ne devienne trop élevée.

**2.3.2. Compresseur et freins**

Le second auxiliaire à être pris en compte est le compresseur d'air utilisé pour les freins. Le compresseur est composé d'une machine électrique emmenant une pompe hydraulique via un arbre mécanique. La pompe hydraulique envoie à son tour un débit d'air dans le réservoir d'air dont la pression augmente (Figure 5 (a)) [10]. Cet air comprimé est ensuite transmis aux cylindres des freins pneumatique via le réseau d'air du train, résultant en une force appliquée aux disques de freins. Ces derniers transformeront cette force en un couple résistant qui sera appliqué aux roues, créant une force s'opposant au déplacement du train (Figure 5 (b)) [11]. Il est important de noter que dans le ferroviaire, le fonctionnement des freins est inversé pour des raisons de sécurité. Cela signifie que lorsqu'il n'y a pas de pression dans le piston du frein, les mâchoires sont serrées sur le disque.



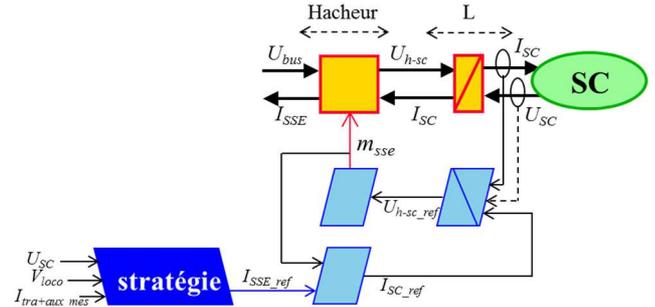
**Figure 5: REM et commande du compresseur d'air (a) et du système de freinage pneumatique (b) du TER.**

La pression du réservoir d'air est régulée par une stratégie similaire à un thermostat, mettant en route le compresseur lorsque la pression chute en dessous de 8 bars, et stoppant la compression lorsque la pression dépasse les 9 bars. A l'instar de la commande du chauffage, les seuils bas et haut de cette stratégie sont augmentés à 9 et 10 bars respectivement lorsque le train est en phase de freinage.

La commande du frein est faite par régulation de la pression de l'air dans le cylindre du frein, elle-même variant à l'action de la valve libérant plus ou moins d'air dans le tuyau. La consigne de pression du cylindre est déduite de la force de freinage demandée par la commande de la partie traction.

**2.4. Système de stockage embarqué et stratégie**

Le dernier organe à être ajouté à la REM du train est le Système de Stockage d'Énergie (SSE). Un SSE est un composant permettant de stocker de l'énergie sous une certaine forme (électrochimique pour les batteries, électrostatique pour les super-condensateurs, cinétique pour les volants d'inertie...). La puissance développée par la machine électrique du train lors d'un freinage a orienté le choix du SSE vers les super-condensateurs. Celui-ci est géré par un convertisseur le chargeant ou le déchargeant en fonction des besoins des auxiliaires et de la traction [7] [8]. Cette partie est illustrée par la Figure 6.



**Figure 6: REM et commande du Système de Stockage d'Énergie embarqué**

La commande du convertisseur est faite par une boucle de courant composée d'un correcteur PI. Ce correcteur prend comme référence un courant calculé en fonction du rapport cyclique du hacheur  $m_{sse}$  et le courant référence  $I_{SSE\_ref}$  que le système de stockage doit fournir ou absorber. Ce courant est calculé grâce au courant de la traction et au courant demandé par les auxiliaires.

L'assemblage de l'alimentation, de la traction, des auxiliaires, et du SSE permet l'obtention de la REM du TER servant à la mise en place de la simulation HIL.

**3. De la REM au HIL**

Cette partie détaille le principe et la méthodologie du HIL, ainsi que son application au train étudié. Cette dernière étape permet d'estimer les gains possibles grâce au freinage régénératif en prenant en compte les effets apportés par certains composants réels.

**3.1. Principe du HIL et contraintes à respecter**

Le principe du HIL est de remplacer certains modèles d'un système simulé par des composants réels. Le sous-système réel est relié à un système d'interface reproduisant le comportement du sous-système émulé (Figure 7) [12]. Des calculateurs et des composants du même type que ceux utilisés dans l'application finale d'un projet peuvent alors être testés hors ligne et possiblement à échelle réduite, ce qui demande un nombre de ressources moins important [1], en particulier dans certains domaines tels que le ferroviaire ou le spatial [3].



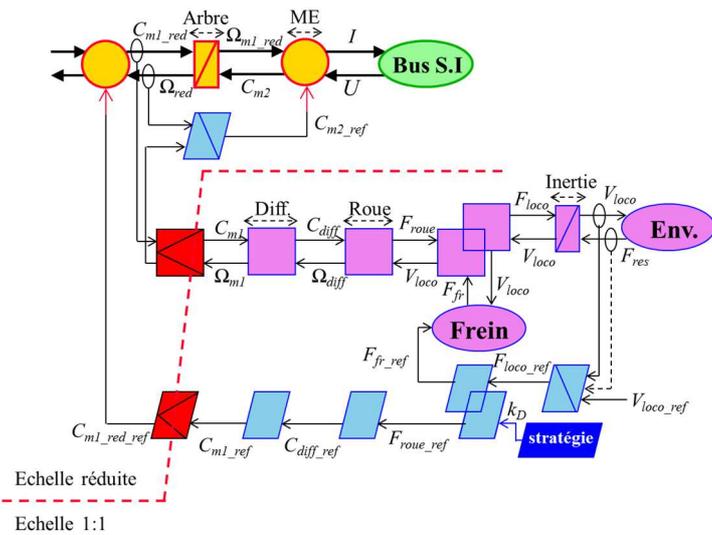


Figure 10: Représentation de la simulation HIL de la chaîne de traction

3.2.3. Auxiliaires

La simulation HIL de la partie auxiliaires cadre 3 Figure 8) a pour partie réelle un hacheur débitant un courant dans une résistance afin de recréer la puissance absorbée par les auxiliaires à échelle réduite. Les auxiliaires sont donc émulsés, et le courant qu'ils consomment est réduit et envoyé comme référence à la commande du système réel (Figure 11).

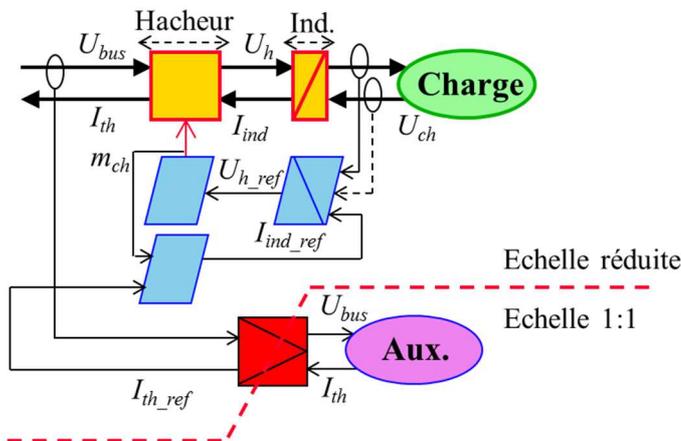


Figure 11: Représentation de la simulation HIL des auxiliaires du train

3.2.4. Système de stockage d'énergie

La dernière partie de la simulation est le SSE. Celle-ci n'a cependant pas besoin d'une partie émulée. En effet, son environnement existe déjà grâce aux autres parties réelles de la simulation HIL. Sa structure et sa commande restent donc inchangées (Figure 6).

Ces différentes parties assemblées forment la simulation illustrée Figure 12.

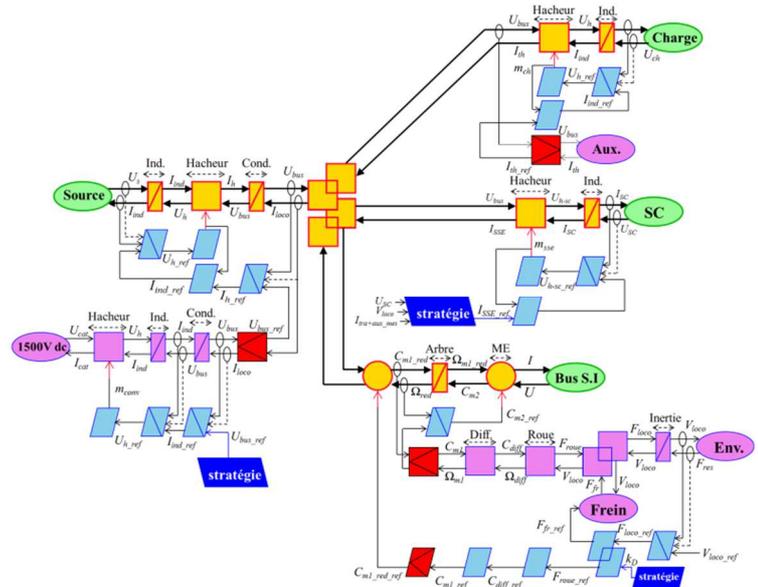


Figure 12: Représentation de la simulation entière

Le montage final en plateforme est illustré par la Figure 13 et la Figure 14.

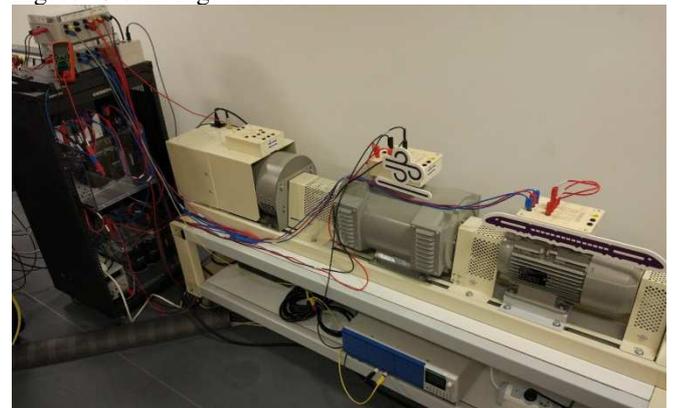


Figure 13: Machine de traction (machine de droite) et système d'interface (machine du milieu)



Figure 14: Système d'interface de la caténaire, auxiliaires, Système de Stockage d'Énergie

4. Résultats

Cette partie présente dans un premier temps les résultats issus des modifications de la commande des auxiliaires, puis les résultats obtenus avec les supercondensateurs embarqués. Un bilan énergétique plus

général sera finalement dressé sur l'ensemble de la simulation.

#### 4.1. Comportement chauffage et compresseur

La modification de la commande du chauffage et du compresseur a une influence sur la température de la cabine et la pression d'air dans le réservoir. La Figure 15(a) montre que la température dans l'habitacle, généralement variant entre 20 et 22°C, a atteint 23°C à trois reprises dans ce scénario. De même pour la pression du réservoir d'air Figure 15(b) qui a atteint les 10 bars à plusieurs reprises.

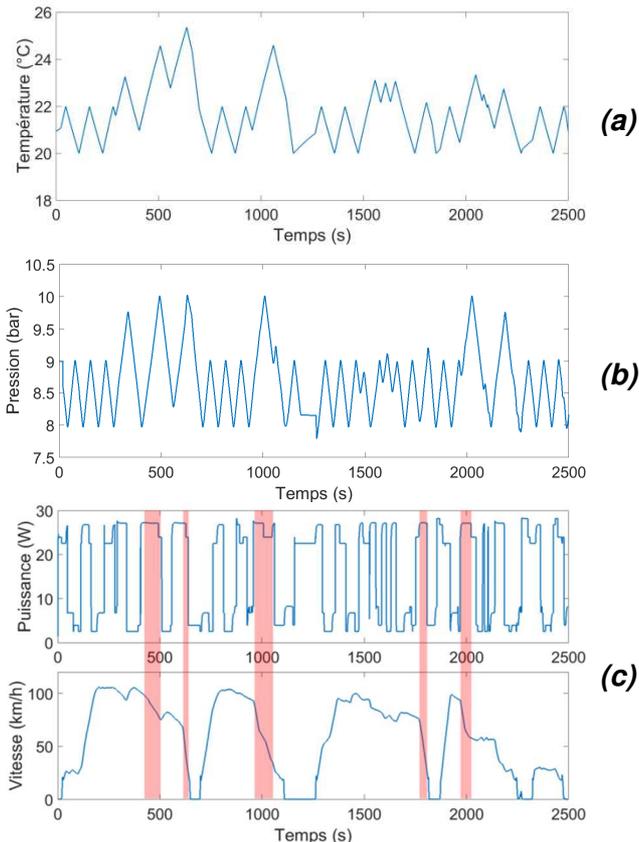


Figure 15: Comportement des auxiliaires après changement de la stratégie :

- (a) Température dans l'habitacle  
 (b) Pression dans le réservoir d'air  
 (c) Puissance absorbée par les auxiliaires à échelle réduite et cycle de vitesse

Les effets de cette modification sont également visibles sur la consommation des auxiliaires. Figure 15(c) présente la puissance instantanée des auxiliaires à échelle réduite. Après chaque phase de freinage (surlignées en rouge), la puissance absorbée par les auxiliaires a tendance à baisser fortement. Ceci s'explique du fait que les auxiliaires considérés ont accumulé une certaine quantité d'énergie pendant le freinage. Suite à une décélération, la température de l'habitacle et la pression du réservoir d'air sont suffisamment élevés pour que le chauffage et le compresseur restent éteints pendant un certain temps.

#### 4.1.1. Comportement SSE

Le SSE a pour rôle de stocker l'énergie produite par la machine de traction lors des freinages quand celle-ci n'a pas été consommée par les auxiliaires.

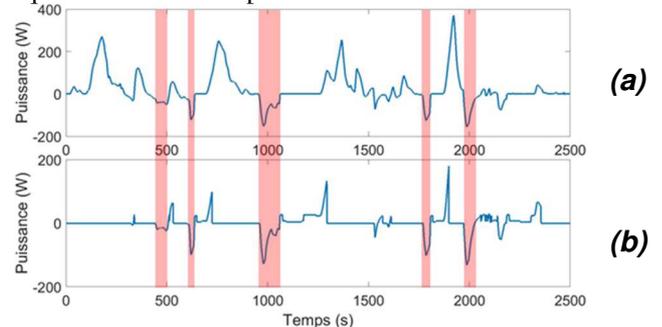


Figure 16: Puissance de la traction à échelle réduite (a), puissance des super-condensateurs (b)

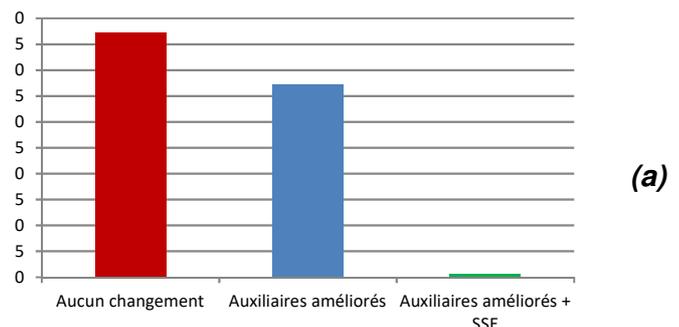
Les zones surlignées en rouge sur les Figure 16(a) et (b) mettent en évidence les freinages pendant lesquels la traction produit beaucoup d'énergie, qui est alors stockée dans les super-condensateurs. Cette énergie est rendue après chaque freinage lors de démarrage du train.

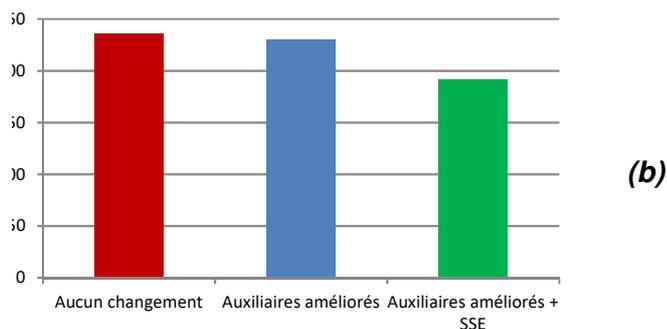
#### 4.2. Bilan énergétique complet

Le bilan énergétique global est fait avec l'énergie consommée par le train et l'énergie de freinage a dû être dissipée. Trois scénarios sont considérés :

- La commande des auxiliaires est inchangée, et le train n'embarque pas de SSE (rouge Figure 17)
- La commande des auxiliaires est modifiée lors des freinages et le train n'embarque pas de SSE (bleu Figure 17)
- La commande des auxiliaires est modifiée lors des freinages et le train embarque un SSE (vert Figure 17)

La Figure 17(a) présente l'énergie de freinage qui a dû être dissipée, c'est-à-dire que ni le SSE ni les auxiliaires n'ont pu en tirer profit. Dans le premier scénario, qui est le scénario de référence, la quantité d'énergie dissipée après un cycle complet s'élève à 47,27kWh. Le deuxième scénario montre que la modification du comportement des auxiliaires lors du freinage permet de réduire cette énergie dissipée de 21%, ce qui fait chuter l'énergie de freinage perdue à 37,29kWh. Le dernier scénario permet de constater que l'ajout d'un SSE permettrait de réduire de 98% l'énergie de freinage perdue, réduisant sa quantité à 0.7kWh.





**Figure 17: Énergie de freinage dissipée pour 3 scénarios(a), énergie consommée par le train pour trois scénarios(b)**

La Figure 17(b) montre une réduction de l'énergie totale nécessaire au train pour effectuer le trajet en question. Dans le scénario de référence, le train aurait besoin de 236kWh pour ce trajet. L'amélioration de la commande des auxiliaires permet de réduire la consommation du train de 2,5%. L'ajout d'un SSE permettrait de réduire la consommation de 18%.

La simple modification de la commande des auxiliaires a des gains énergétiques modérés. Elle a cependant l'avantage d'être plus simple, plus rapide, et moins coûteuse que l'ajout d'un SSE au train. Elle est également complémentaire avec le SSE étant donné qu'elle permet de réduire la quantité d'énergie à stocker à chaque freinage, et donc la capacité du système de stockage et donc son cyclage. Cela permet de réduire le volume, le poids, ainsi que le prix d'achat et de possession (maintenance, etc.) de ce dernier.

## 5. Conclusion

Cette étude a débuté par le développement de la REM d'un TER comprenant son alimentation, sa chaîne de traction, certains de ses auxiliaires, ainsi qu'un système de stockage embarqué. L'utilisation de cette représentation graphique a permis de faciliter le passage de la simulation sur ordinateur à la simulation HIL, intégrant des composants réels à la simulation.

L'utilisation de la méthodologie HIL a permis dans un premier temps de tester la commande et les stratégies de gestion énergétique de chaque organe en temps réel. Grâce à l'ajout de matériel à la boucle de simulation, les effets tels que les harmoniques de la machine, les imprécisions et erreurs de mesures, et le comportement non linéaire de la charge/décharge des supercondensateurs ont pu être pris en compte sans nécessiter le développement de modèles complexes.

Les gains énergétiques des améliorations envisagées ont donc pu être évalués dans des conditions plus proches de la réalité, en particulier vis-à-vis du SSE utilisé, spécialement prévu pour les usages embarqués du ferroviaire.

Effectuer cette expérimentation à plus grande échelle et intégrer du matériel supplémentaire tel qu'un système de chauffage-climatisation rendrait le bilan énergétique plus complet et plus proche de la situation réelle.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. BOUSCAYROL, *Hardware-In-the-Loop Simulation*, France: CRC Press, 2011.
- [2] S. BRUNI, A. FACCHINETTI, M. KOLBE et J.-P. MASSAT, «Hardware-in-the-Loop testing of pantograph for homologation,» *Proceedings of 9th World Congress on Railway Research (WCRR 2011)*, pp. 1-11, Mai 2011.
- [3] K. HIGASHIKAWA, S. URASAKI, M. INOUE, M. TOMITA et T. KISS, «Hardware-in-the-Loop Simulation of Superconducting Devices for DC Electric Railway Systems Based on a Real-Time Digital Simulator,» *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, n° 14, Juin 2016.
- [4] L. XIONG, Z. ZHONG, B. AI et H. WEI, «Performance evaluation for high-speed railway mobile communication on HIL simulation platform,» *Wireless, Mobile & Multimedia Networks (ICWMMN 2011)*, 10 Mai 2012.
- [5] A. BOUSCAYROL, "Formalisme de représentation et de commande appliqués aux systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs", Lille, 2003.
- [6] J.-N. VERHILLE, «Représentation énergétique macroscopique du métro VAL 206 et structures de commande déduites par inversion,» Thèse de doctorat, 2007.
- [7] A. CASTAINGS, *Gestion d'énergie de véhicules multi-sources électriques et hybrides au travers de la représentation énergétique macroscopique*, Thèse de doctorat, 2016, pp. 144-147.
- [8] D. LOUKAKOU BOUNZEKI MBEMBA, «Modélisation, Conception et Experimentation d'un véhicule hybride léger pour usage urbains,» Thèse de doctorat, 2012.
- [9] L. HORREIN, docteur de l'Université Lille 1, "Gestion d'énergie décomposée d'un véhicule hybride intégrant les aspects thermiques via la représentation énergétique macroscopique", Thèse de doctorat, 2015.
- [10] T. HALLU et M. ZEGHOUANI, "Modélisation des auxiliaires d'une chaîne de traction ferroviaire hybride", Rapport de projet - 2ème année de master, 2014.
- [11] J. PASCAL, «Valorisation de l'énergie de freinage du matériel roulant,» Rapport de stage - 2ème année de Master, Lille, 2017.
- [12] J.-M. TIMMERMANS, J. VAN MIERLO, P. LATAIRE, F. VAN MULDER et Z. MCCAFFREE, «Test Platform for hybrid electric power systems: development of a HIL test platform,» *EPE'07-ECCE Europe*, Septembre 2007.

# Évaluation des capacités de freinage récupératif sur un navire électrique

**N. BENNABI<sup>1, 2</sup>, H. MENANA<sup>3</sup>, J-F. CHARPENTIER<sup>1</sup>, J. Y BILLARD<sup>1</sup>, B. NOTTELLET<sup>2</sup>**

1. Institut de Recherche de l'École Navale (IRENav), 29240 Brest, France.

2. SEGULA Technologies, 76600, Le Havre, France.

3. Groupe de Recherche en Électrotechnique et Électronique de Nancy (GREEN), 54000 Nancy, France.

nacera.bennabi@segula.fr, hocine.menana@univ-lorraine.fr, jean-frederic.charpentier@ecole-navale.fr,

jean-yves.billard@ecole-navale.fr, benoit.nottellet@segula.fr

**Résumé :** Le travail présenté vise à étudier la possibilité de récupérer de l'énergie lors du freinage d'un navire de faible tonnage équipé d'une chaîne de propulsion entièrement électrique ou hybride. Les modèles des différents éléments de la chaîne de propulsion sont décrits puis intégrés pour une simulation dynamique sous Matlab/Simulink. Ce modèle comprend un modèle d'hélice à quatre quadrants qui permet de prendre en compte la récupération d'énergie. Une étude de cas est considérée sur la base des spécifications d'une navette fluviale entièrement électrique. Plusieurs stratégies de contrôle du moteur de propulsion pendant le freinage sont étudiées. Les résultats mettent en évidence les avantages de l'application d'une stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui conduit à une augmentation considérable de l'énergie récupérée.

**Mots-clés :** Récupération d'énergie, freinage, bateaux électriques, MPPT.

## 1. NOMENCLATURE

$Q_{GEAR}$	Couple délivré par le réducteur [Nm]
$Q_m$	Couple délivré par le moteur électrique [Nm]
$\Omega$	Vitesse angulaire arbre hélice [rad/s]
$I$	Moment d'inertie des parties tournantes [kg.m <sup>2</sup> ]
$K_{GEAR}$	Rapport de réducteur [-]
$Q_p$	Couple délivrée par l'hélice [Nm]
$B$	Angle d'attaque de l'hélice [degré]
$V_a$	Vitesse d'avance du bateau [m/s]
$\rho$	Masse volumique de l'eau de mer [kg/m <sup>3</sup> ]
$R$	Rayon de l'hélice [m]
$C_t$	Coefficient de poussée [-]
$T_p$	Poussée développée par l'hélice [N]
$C_q$	Coefficient du couple [-]
$w$	Coefficient de sillage [-]
$V$	Vitesse bateau [m/s]
$V_{batt}$	Tension aux bornes de la batterie [V]
$E_{batt}$	Tension à vide de la batterie [V]
$I_{batt}$	Courant de la batterie [A]
$R_{batt}$	Résistance de la batterie [ohms]
$\Omega_{GEAR}$	Vitesse angulaire à la sortie du réducteur [rad/s]
$1+k$	Facteur de correction de la résistance de frottement [-]
$R_{TOT}$	Résistance à l'avancement totale [N]
$M$	Masse du bateau [kg]
$C_f$	Coefficient de frottement [-]
$T$	Coefficient de succion [-]
$\lambda_{opt}$	Tip Speed Ratio optimal [-]
$\lambda$	Tip Speed Ratio [-]

$C_{p\_max}$	Coefficient de puissance maximal de l'hélice [-]
$C_p$	Coefficient de puissance de l'hélice [-]
$P_a$	Puissance développée par l'arbre hélice [W]
$E_{frein}$	Énergie totale récupérée lors du freinage [J]
$S_p$	Surface du disque hélice [m <sup>2</sup> ]
$P_a$	Puissance de l'hélice [W]
$V_{0.7}$	Vitesse de l'eau à 70% du rayon de l'hélice [m/s]
$E_{batt}$	Tension non linéaire de la batterie [V]
$B$	Capacité exponentielle [Ah-1]
$A$	Tension exponentielle [V]
$i_t$	Capacité extraite de la batterie [Ah]
$Q$	Capacité maximale de la batterie [Ah]
$i^*$	Dynamique du courant à basse fréquence [A]
$K$	Constante de polarisation [Ah-1]
$E_0$	Tension constante de la batterie [V]
$I_{batt}$	Courant de la batterie [A]

## 2. INTRODUCTION

Un des objectifs futurs de l'industrie maritime et fluviale est de réduire l'impact des émissions des navires afin de répondre au mieux aux réglementations les plus strictes de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) sur les émissions de gaz à effet de serre [1]. Dans ce contexte, développer l'hybridation et l'électrification des chaînes de propulsion est une solution intéressante.

L'un des principaux avantages de ces systèmes de transmission de puissance pour les navires est de pouvoir faire fonctionner les machines thermiques à des régimes proches de leurs fonctionnements nominaux, ce qui augmente leurs rendements.

Dans un système électrique ou hybride, lors du freinage, il est également possible de récupérer de l'énergie si un système de conversion d'énergie réversible est associé à un système de stockage d'énergie. Cette stratégie est massivement utilisée pour les véhicules hybrides terrestres [2].

Dans le secteur naval, l'augmentation de la vitesse des plates formes et la minimisation de la masse et le volume des composants de la chaîne de propulsion tout en réduisant la consommation d'énergie est une priorité majeure. Par conséquent, les chaînes de propulsion, y compris les hélices, sont optimisées pour le mode de propulsion et non pour la production d'énergie. La possibilité de récupération de l'énergie lors du freinage n'est souvent pas envisagée dans de tels systèmes [3].

Cependant, la récupération d'énergie pendant les opérations de freinage peut être une solution intéressante pour augmenter l'efficacité énergétique du navire, si les

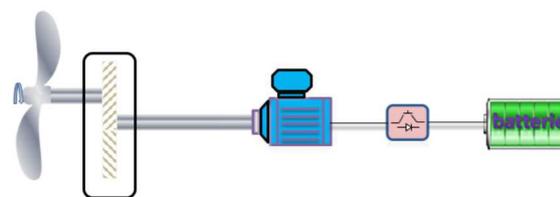


Fig. 1 : Diagramme simplifié d'une chaîne de propulsion tout électrique

L'objectif de cette partie est de présenter la modélisation de la chaîne de propulsion électrique. Après la présentation des modèles séparés des différents éléments de la chaîne de propulsion, une simulation dynamique de l'ensemble de la chaîne de propulsion est réalisée afin d'étudier le fonctionnement du système global.

La Fig.2 présente le schéma global de la chaîne de

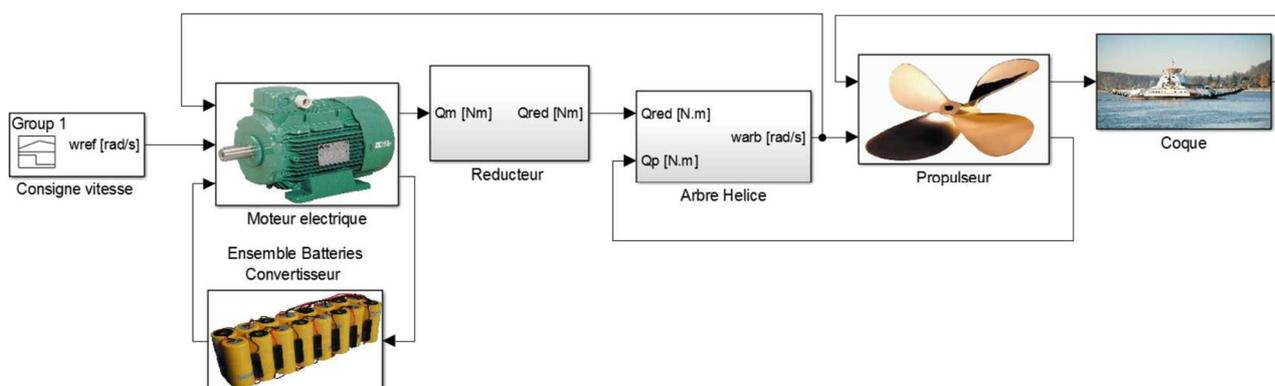


Fig. 2 : Schéma global de simulation de la chaîne de propulsion tout électrique sous Matlab/Simulink

modes de fonctionnement du navire permettent de récupérer une énergie significative.

Le but de ce travail est d'évaluer le potentiel de récupération d'énergie dans un navire entièrement électrique de faible tonnage. La capacité d'une hélice de propulsion à fonctionner comme un système de récupération énergie est considéré (l'hélice fonctionne comme une turbine) et les avantages de l'application d'une stratégie MPPT qui conduit à une augmentation considérable de l'énergie récupérée est mise en évidence.

Les modèles de la chaîne de propulsion seront décrits dans la section III. Dans la section IV, les résultats d'une étude de cas basée sur les spécifications d'une navette fluviale sont présentés.

### 3. MODELISATION DE LA CHAÎNE DE PROPULSION

Un schéma de base de la chaîne de propulsion entièrement électrique est décrit à la Fig. 1. L'hélice est entraînée par une machine électrique alimentée par des batteries. Selon la nature du moteur électrique utilisé et de sa commande, l'utilisation d'un réducteur peut être envisagée pour adapter sa vitesse à celle de l'hélice.

propulsion tout électrique implémentée sous l'environnement Matlab/Simulink

#### 3.1. Batterie

Les batteries au lithium-ion sont, à l'heure actuelle, privilégiées pour la mobilité électrique sous toutes ses formes, en raison de leur haute densité énergétique, leur durée de vie acceptable et leur efficacité élevée comparée aux autres types de batteries.

Le modèle utilisé dans ce travail a été développé en 2009 par Tremblay, O et Dessaint [4]. Il est disponible dans la bibliothèque Simpowers de Matlab/Simulink. Ce modèle permet de modéliser différents types de batteries en reliant les équations électriques du système à un modèle électrochimique, ce qui permet de lier l'évolution des paramètres électriques à l'évolution dynamique de l'état de charge de la batterie.

Le principal avantage de ce modèle est la possibilité de représenter de façon assez précise le comportement de différents types de batteries électrochimiques, sur la base des données communément trouvées dans la fiche technique des fabricants [6].

La tension nominale de la batterie est déterminée à l'aide d'une équation non linéaire en fonction de l'état de charge de la batterie comme suit :

- Etat de déchargement ( $i^* > 0$ )

$$f_1(i_1, i^*, I_{batt}) = E_0 - K \frac{Q}{Q - i_t} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + Ae^{-B i_t}$$

- Etat de chargement ( $i^* < 0$ )

$$f_2(i_1, i^*, I_{batt}) = E_0 - K \frac{Q}{i_t - 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + Ae^{-B i_t}$$

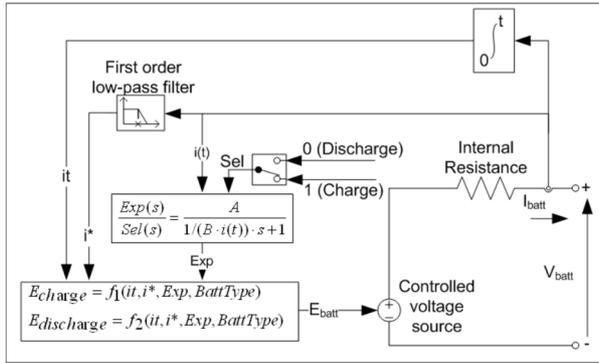


Fig. 3 : Modèle de batterie sous Matlab/Simulink [5]

Avec :

- $E_{batt}$  : Tension non linéaire de la batterie [V]
- $E_0$  : Tension constante de la batterie [V]
- $K$  : Constante de polarisation [ $Ah^{-1}$ ]
- $i^*$  : Dynamique du courant à basse fréquence [A]
- $Q$  : Capacité maximale de la batterie [Ah]
- $i_t$  : Capacité extraite de la batterie [Ah]
- $A$  : Tension exponentielle [V]
- $B$  : Capacité exponentielle [ $Ah^{-1}$ ]
- $I_{batt}$  : Courant de la batterie [A]

### 3.2. Moteur électrique

Un moteur électrique et son électronique de puissance associée sont utilisés dans ce travail. Ce modèle repose principalement sur la connaissance d'une caractéristique couple-vitesse limite de l'ensemble convertisseur/machine.

Cette caractéristique couple vitesse limite peut se déduire des paramètres électriques du moteur et du convertisseur. On suppose alors que l'ensemble convertisseur machine est capable d'imposer un couple de référence de manière quasi instantanée sur l'arbre de la machine si la valeur de ce couple est comprise dans l'enveloppe de la caractéristique couple vitesse limite. Cette hypothèse est raisonnable compte tenu des faibles valeurs des constantes de temps électriques de la machine et du convertisseur par rapport aux constantes de temps mécaniques des parties tournantes et du navire.

Nous considérons alors une caractéristique du type de celle de la Fig.4 : à des basses vitesses de rotation (vitesse inférieure à la vitesse nominale), le couple est limité à un couple maximal constant ( $Q_{MAX}$ ). Pour une vitesse de rotation plus élevée, le couple est limité par une puissance maximale  $P_{MAX}$  (la valeur maximale du couple est égale à  $P_{MAX} / \Omega_{MAX}$  où  $\Omega$  est la vitesse de rotation de l'arbre) [7].

Ce comportement correspond au cas traditionnel d'un moteur à courant alternatif associé à un variateur utilisé en défluxage au-delà de la vitesse de base.

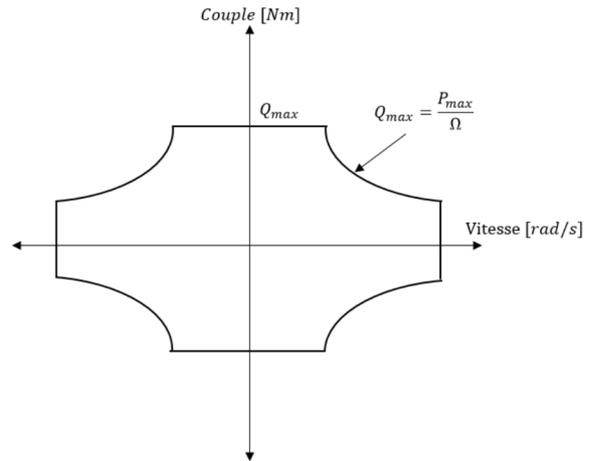


Fig. 4 : Limite de fonctionnement de l'ensemble convertisseur machine

La Fig.5 présente le contrôle en couple et en vitesse de l'ensemble convertisseur/moteur électrique. La boucle de régulation de vitesse contient un régulateur PI ou PID associé à une fonction de limitation de couple qui prend en compte la caractéristique couple / vitesse de la Fig. 4.

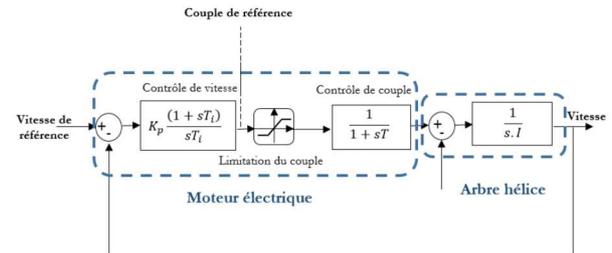


Fig. 5 : Schéma fonctionnel d'un entraînement par moteur

### 3.3. Réducteur

Le réducteur est utilisé pour adapter la vitesse de l'hélice à celle du moteur de propulsion. La vitesse de rotation ( $\Omega_m$ ) et le couple ( $Q_m$ ) produits par le moteur sont convertis par le réducteur en couple ( $Q_{GEAR}$ ) et en vitesse de rotation ( $\Omega_{GEAR}$ ) à la sortie du réducteur.

$$\begin{cases} Q_{GEAR} = K_{GEAR} Q_m \\ \Omega_{GEAR} = \frac{\Omega_m}{K_{GEAR}} \end{cases} \quad (2)$$

où  $K_{GEAR}$  est le rapport du réducteur. Les pertes et le comportement dynamique de ce réducteur ne sont pas considérés et le réducteur est modélisé par un simple gain (équation 2).

### 3.4. Arbre hélice

Le moment d'inertie de toutes les parties tournantes est pris en compte au niveau de l'arbre de transmission à l'hélice. La dynamique des parties tournantes est modélisée par l'équation mécanique suivante :

$$I \frac{d\Omega}{dt} = Q_{GEAR} - Q_P \quad (3)$$

où  $I$  est le moment d'inertie de l'ensemble des masses tournantes ramenées à l'arbre d'hélice et  $Q_p$  est le couple hydrodynamique du propulseur.

### 3.5. Propulseur

Pour modéliser le comportement hydrodynamique de l'hélice (propulseur), un modèle à quatre quadrants de type «  $C_t C_q$  » est utilisé en raison de sa capacité à fonctionner dans les différents quadrants d'échange d'énergie et de sa simplicité de mise en œuvre. Ce modèle permet de prendre en compte les phases propulsives et les phases de récupération d'énergie issue de l'hélice.

Les caractéristiques de l'hélice étudiée correspondent à une hélice de la série B de Wageningen qui a été totalement caractérisée par des essais en bassin de traction par le Marin Research Institute aux Pays-Bas [8].

Les travaux menés dans [8] permettent de caractériser le comportement de l'hélice à l'aide des coefficients de poussée et de couple :  $C_t$  et  $C_q$ . Ce sont des nombres adimensionnels qui permettent de lier le couple et la poussée à la vitesse relative du fluide sur l'hélice et à la vitesse de rotation de l'hélice pour une géométrie d'hélice donnée.

Ils sont définis comme suit :

$$\begin{cases} C_t = \frac{T_p}{0.5 \pi \rho R^2 V_{0.7}^2} \\ C_q = \frac{Q_p}{\pi \rho R^3 V_{0.7}^2} \end{cases} \quad (4)$$

où  $T_p$  est la poussée de l'hélice en Newton,  $Q_p$  est le couple de l'hélice en Newton mètre,  $\rho$  est la masse volumique de l'eau et  $V_{0.7}$  est la vitesse relative de l'eau par rapport aux pales à 70% du rayon de l'hélice.

$V_{0.7}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{0.7}^2 = V_a^2 + (0.7R\Omega)^2 \quad (5)$$

où  $R = D/2$  est le rayon externe du propulseur et  $V_a$  est la vitesse d'avancement du fluide dans le disque hélice donnée en m/s.

Les essais en bassin permettent de caractériser ces coefficients en fonction de l'angle d'attaque ( $\beta$ ) qui est défini par l'équation (6) et la Fig.6 [8].

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_a}{0.7R\Omega}\right) \quad (6)$$

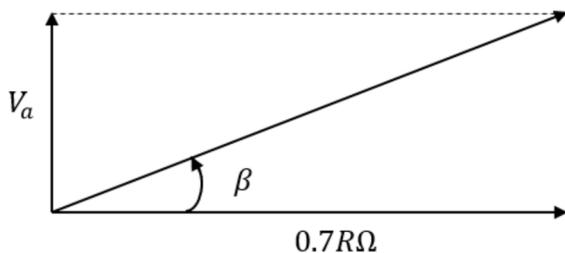


Fig. 6 : L'angle  $\beta$  en fonction de la vitesse d'avancement et la vitesse tangentielle

Les courbes expérimentales  $C_t$  et  $C_q$  en fonction de  $\beta$  peuvent être interpolées par des séries de Fourier [9].

$$\begin{cases} C_t(\beta) = \sum_{k=0}^{k_{max}} (A_t(k)\cos\beta k + B_t(k)\sin\beta k) \\ C_q(\beta) = \sum_{k=0}^{k_{max}} (A_q(k)\cos\beta k + B_q(k)\sin\beta k) \end{cases} \quad (7)$$

Les courbes de  $C_t$  et  $C_q$  en fonction de  $\beta$  sont présentées figure 7 pour la géométrie d'hélice utilisée :

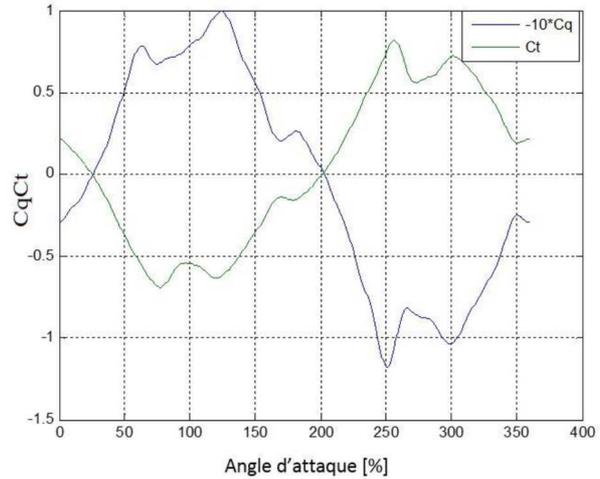


Fig. 7 : Caractéristiques en eau libre d'un propulseur quatre quadrants

Un coefficient de sillage ( $w$ ) peut permettre de prendre en compte le ralentissement de l'eau le long de la coque et de lier ainsi la vitesse d'avance  $V_a$  à celle du navire  $V$  (équation 8) [10-11].

$$w = \frac{V - V_a}{V} \quad (8)$$

Dans notre cas ce phénomène est négligé ( $V=V_a$ ).

### 3.6. Coque

L'étude de la résistance à l'avancement sur un bateau permet d'évaluer la force propulsive qui servira à le faire avancer à la vitesse désirée [12]. Elle se décompose en général en trois parties : la résistance de frottement, la résistance résiduelle et la résistance de l'air [13].

La résistance de frottement présente la majeure partie de la résistance à l'avancement dans un bateau. De ce fait, on se limite à la résistance de frottement donnée par l'équation suivante dans des conditions de navigation idéales : sans courant ni houle [14]

$$R(V) = \frac{1}{2} S \rho V^2 C_f' (1 + K) \quad (9)$$

avec  $S$  : surface mouillée en  $m^2$ ,  $C_f'$  est le coefficient de résistance,  $1 + K$  est le facteur forme et  $V$  est la vitesse du bateau en mètre par seconde.

L'équation dynamique de l'avancement du navire est alors donnée par (10) [15], où  $M$  est la masse du navire en [kg] et  $V$  est sa vitesse [m / s].

$$M \frac{dV}{dt} = (1 - t)T_p - R_{TOT}(V) \quad (10)$$

Dans (10) un coefficient de suction ( $t$ ), peut être introduit pour prendre en compte l'interaction de l'hélice sur la coque qui augmente sa traînée.

Il est considéré comme négligeable dans cette étude ( $t=0$ )

#### 4. CAS D'ETUDE

L'étude de cas est envisagée sur la base des spécifications d'une navette fluviale présentée par SEGULA Engineering à la Conférence de Paris sur le Climat COP 21, appelée Green Deliriver (Fig. 8).



Fig. 8: Navette fluviale Green Deliriver

Les principales caractéristiques de la navette sont indiquées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques de la navette Green Deliriver

Paramètres	Valeurs
Longueur à la flottaison	41.9 m
Largueur bateau	7.7 m
Tirant d'eau	2.2 m
Volume immergé	568 m <sup>3</sup>
Surface mouillée	405 m <sup>2</sup>

##### 4.1. Stratégie de commande

Nous voulons ici utiliser un processus de freinage régénératif de manière à récupérer une part de l'énergie cinétique initiale en générant de l'énergie électrique. Celle-ci peut être alors utilisée immédiatement (par exemple par la consommation en énergie du bord) ou stockée dans des systèmes de stockage [15].

Le moteur électrique et le convertisseur sont alors utilisés en mode générateur lors des phases de freinage et permettent ainsi de récupérer de l'énergie pour recharger les batteries [16]. L'évaluation quantitative de la puissance régénérative pendant le freinage est d'une importance fondamentale.

Par conséquent, il est important de définir, en plus de la performance de l'hélice en mode de propulsion, le coefficient de puissance ( $C_p$ ) de l'hélice dans le mode de récupération, qui est déterminé par la relation suivante comme pour une turbine éolienne ou hydrolienne :

$$C_p = \frac{P_{\text{extraite}}}{P_{\text{cinétique}}} = \frac{P_{\text{extraite}}}{\frac{1}{2} \rho S_p V_a^3} \quad (11)$$

où  $S_p$  est la surface du disque hélice. Le coefficient de puissance est tracé en fonction de la vitesse spécifique de l'hélice  $\lambda = \frac{\Omega R}{V_a}$  appelée en anglais "Tip Speed Ratio" (où  $R$  désigne le rayon du propulseur) à partir du modèle basé sur la connaissance des courbes des coefficients  $C_l$  et  $C_d$  en fonction de  $\beta$  présentées à la figure 8.

De manière pratique cette courbe de  $C_p$  est obtenue en utilisant le modèle d'hélice décrit précédemment en maintenant la vitesse de l'eau sur l'hélice constante pour différentes valeurs de vitesse de rotation.

La Fig.10 définit la courbe de coefficient de puissance de l'hélice ainsi obtenue pour l'hélice étudiée en fonction de ce paramètre  $\lambda$ .

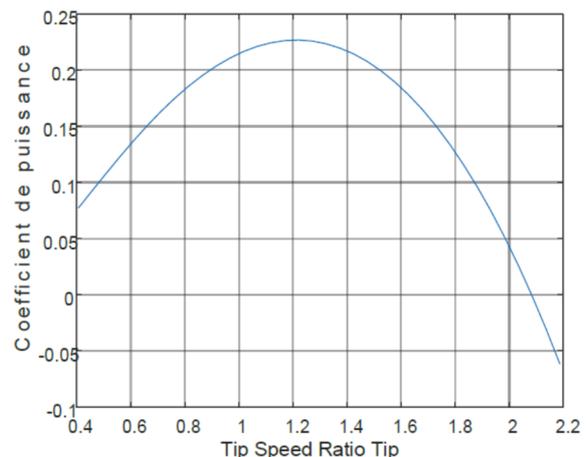


Fig. 9 : Coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$

Comme le montre la Fig.9, le coefficient de puissance optimal  $C_{p\_MAX}$  est atteint pour  $\lambda_{\text{optim}}=1.2$  et vaut environ 0.227 ce qui est nettement inférieur à ce que l'on pourrait obtenir avec une turbine hydrolienne industrielle (ou le coefficient de puissance optimal est généralement compris entre 0.4 et 0.5).

Pour évaluer les possibilités de récupération lors d'un freinage, deux stratégies de freinage sont appliquées à partir d'un régime permanent établi.

##### 1) STRATEGIE 1

Une consigne constante de la vitesse arbre hélice est maintenue lors de la décélération.

##### 2) STRATEGIE 2

La consigne de vitesse de l'arbre hélice varie afin de maximiser la puissance extraite (stratégie MPPT). Ceci est fait en calculant la vitesse de rotation de référence de l'hélice en fonction de la vitesse du navire afin de maintenir  $\lambda$  à sa valeur optimale ce qui conduit à  $C_p = C_{p\_MAX}$ . Dans ce cas, la vitesse de rotation de référence de l'hélice sera donnée par  $\Omega = \frac{\lambda_{\text{opt}} V_a}{R}$

La quantité d'énergie totale récupérée est évaluée comme suit, où  $t_b$  correspondant au temps où la puissance arbre hélice change de signe et  $t_{\text{end}}$  est le temps présentant la fin du freinage.

$$E_{\text{frein}} = \int_{t_b}^{t_{\text{end}}} P_a(V_a, \Omega) dt \quad (12)$$

où  $P_a$  est la puissance récupérée sur l'hélice.

##### 4.2. Résultats et discussions

La propulsion entièrement électrique de la Fig.1 est modélisée et implémentée sous Matlab/Simulink. Les données de simulation, y compris les valeurs des principaux paramètres des modèles, sont données dans le Tableau 2.

Les simulations sont effectuées sur un intervalle de 3000 secondes. Un cycle de commande de base est utilisé pour tester le comportement du navire lors du freinage. Il se compose de trois phases (Fig.10).

Tableau 2 : Données de simulation

Paramètres	Valeurs
$\rho$	1025 [kg/m <sup>3</sup> ]
$w$	0 [-]
$C_f$	1.95e-3 [-]
$K$	0.05 [-]
$M$	586 [Ton]
$t$	0 [-]
$D$	1 [m]

Dans la première phase, la vitesse de référence de l'arbre hélice est fixée à 40 rad/s pendant 1500 secondes, ce qui permet au navire d'atteindre une vitesse constante en régime permanent. Afin d'évaluer la quantité d'énergie récupérée, la référence de vitesse à l'arbre de transmission est alors réduite après 1500s à une vitesse fixe de 10 rad/s. Au bout de 2000s la référence de vitesse de l'arbre d'hélice est annulée. Dans le second cas la stratégie MPPT est appliquée à partir du même régime permanent qu'au cas 1 jusqu'à la fin de la simulation (de t=1500s à t=3000s) comme le montre la figure 10

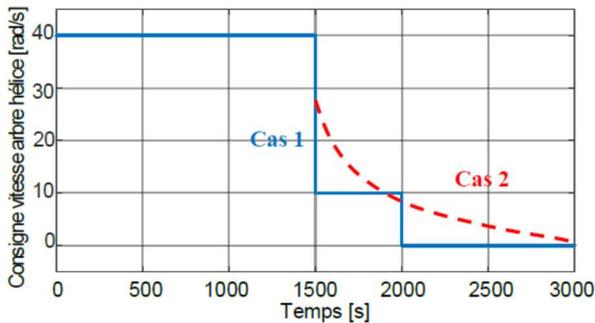


Fig. 10 : Références de principe pour la vitesse d'arbre hélice

Les figures 11 et 12 montrent respectivement la vitesse de l'hélice et sa référence, la vitesse du bateau et la puissance à l'arbre hélice pour les stratégies 1 et 2. La figure 11 correspond au cas de la 1<sup>ère</sup> stratégie et la figure 12 à la seconde.

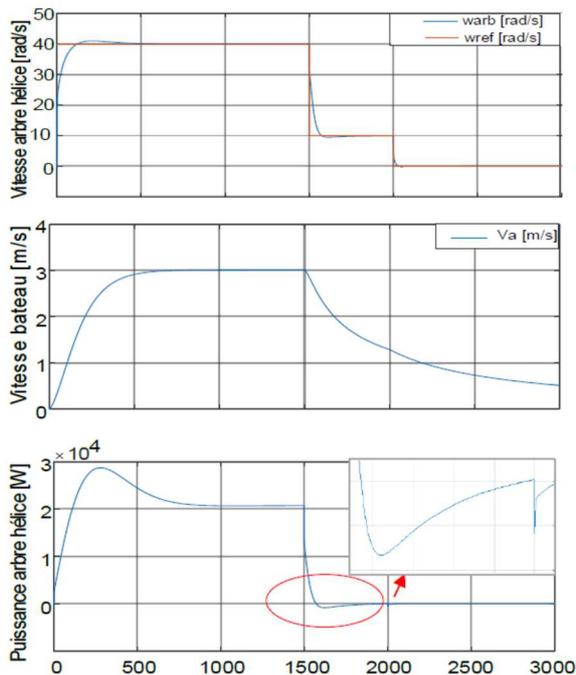


Fig. 11 : Résultats de simulation pour la stratégie 1

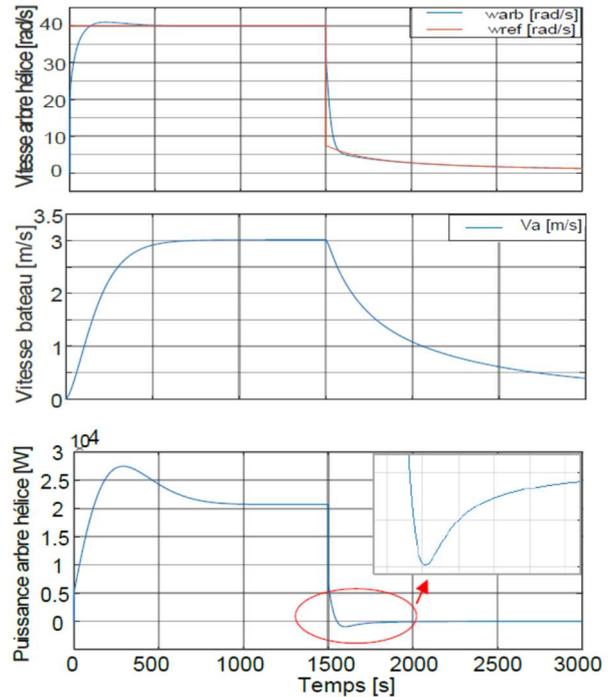


Fig. 12 : Résultats de simulation pour la stratégie 2

Tout d'abord, on peut remarquer que la première phase du cycle conduit à une vitesse du navire établie qui est d'environ 3,3 m/s au début du freinage (dans les deux cas).

En appliquant l'équation (12), la quantité d'énergie récupérée dans la stratégie 1 est de 142 kJ ce qui reste très faible par rapport à l'énergie cinétique du navire au début du freinage (3,2 MJ).

Dans la deuxième stratégie, l'énergie récupérée est d'environ 400 kJ, soit environ quatre fois l'énergie récupérée dans le premier cas. Cette énergie représente environ 12,5% de l'énergie cinétique initiale du navire.

À partir de ces résultats de simulation, nous pouvons voir que la méthode MPPT permet une augmentation considérable de l'énergie récupérée et une bonne efficacité de freinage (à condition que le profil de mission le permette).

Cependant, on peut remarquer que l'hélice n'est pas un système très efficace de récupération d'énergie (faible valeur du coefficient de puissance comme le montre la Fig. 10) et que les opérations classiques des navires comportent beaucoup moins de phases de freinage que celles des véhicules terrestres. C'est pourquoi l'intérêt de récupérer de l'énergie lors du freinage ne sera réellement significatif que pour des cas très spécifiques. Néanmoins, il reste intéressant d'évaluer les contraintes inhérentes (prix et poids des équipements) et aussi, d'envisager l'utilisation d'hélices plus adaptées si ce type de stratégie est utilisé.

## 5. CONCLUSIONS

Dans ce travail, le potentiel de récupération d'énergie dans un navire entièrement électrique de faible tonnage est étudié. L'avantage de l'application d'une stratégie MPPT, pour récupérer de l'énergie de façon optimale au freinage, est mis en évidence. Il est cependant clair que la récupération d'énergie n'est pas une priorité dans les navires. En pratique, les phases de freinage ne sont qu'une partie très marginale des profils de mission. La réversibilité des convertisseurs et l'installation de systèmes de stockage d'énergie représentent des coûts supplémentaires et des volumes supplémentaires à bord, en particulier pour les petites unités.

C'est pourquoi ce type de stratégie de freinage ne sera intéressant que dans des cas très spécifiques où les cycles d'exploitation des navires sont courts et incluent une grande variation de la vitesse du navire et de nombreuses phases de freinage. Dans ce cas, il serait probablement intéressant d'envisager un dimensionnement spécifique des propulseurs en prenant en compte les phases de récupération d'énergie afin d'améliorer le rendement global du système propulsif et les capacités de freinage.

## 6. REMERCIEMENT

Les auteurs aimeraient remercier Bjorn Baxter et ASP. Krystel Torrano de l'École Navale de Brest pour leur contribution lors d'un projet scientifique interne à l'École Navale.

## 7. REFERENCES

- [1] Hman, S., Olivier, J. C., Bourguet, S., Loron, L. "Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in-ferry". *Applied Energy*, 153, 3-14.2015.
- [2] Varocky, B. J., Nijmeijer, H., Jansen, S., Besselink, I. J. M., & Mansvelder, R. (2011). Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car. TNO Automotive, Helmond & Technische Universiteit Eindhoven (TU/e), 2011, Report No. D&C 2011.002.
- [3] Gerard Filiau, Paul Letellier, A. Bondu, L. Mazodier, "Navires Tout électrique ", Techniques de l'Ingénieur D5620, D5610 et D5615.
- [4] Tremblay, O., & Dessaint, L. A. (2009). Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electric Vehicle Journal*, 3(1), 1-10.
- [5] <https://fr.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>, consultation en avril 07 2018.
- [6] Gåsemyr, Ø. R. (2014). Modeling of Hybrid Marine Electric Propulsion Systems (Master's thesis, Institutt for marin teknikk).
- [7] Sørensen, A. J., Ådnanes, A. K., Fossen, T. I., & Strand, J. P. (1997, September). "A new method of thruster control in positioning of ships based on power control". In 4th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'97), Brijuni, Croatia (pp 172, p. 179).
- [8] G. Kuiper, The Wageningen Propeller series, 1992, Book Marin Research Institute Netherland
- [9] Florian Dupriez-Robin. "Dimensionnement d'une propulsion hybride de voilier, base sur la modélisation par les flux de puissance". PhD Thesis. Université de Nantes, France, 2010.
- [10] Oltmann P. Identification of hydrodynamic damping derivatives – a pragmatic approach. In: Proceedings of the international conference on marine simulation and ship manoeuvrability (MARSIM'03), vol. III, Kanazawa, Japan, 25–28 August 2003, pp.575–583.
- [11] MAN Diesel & Turbo, Basic principles of ship propulsion. December 2011. Copenhagen, Denmark, <https://marine.man.eu/docs/libraries/provider6/propeller-aftship/basic-principles-of-propulsion.pdf?sfvrsn=0>. Dernière consultation en février 21 2018.
- [12] Bertram, V. (2012). "Practical ship hydrodynamics". Edition Elsevier.
- [13] Karlsen, A. T. (2012). On Modeling of a Ship Propulsion System for Control Purposes (Master's thesis, Institutt for teknisk kybernetikk).
- [14] Paulet, D., & Presles, D. (1998). Architecture navale: connaissance et pratique. Les Éditions de la Villette.
- [15] Smogeli, Ø. N. (2006). Control of Marine Propellers: from Normal to Extreme Conditions. PhD thesis, Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2006, Trondheim, Norway Marc, N. "Méthodologie de dimensionnement d'un véhicule hybride électrique sous contrainte de minimisation des émissions de CO2". PhD Thesis, Université d'Orléans, France. 2013.
- [16] Lajnef, W. "Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications véhicules électriques et hybrides". PhD Thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux, France .2006.

# Aperçu du fonctionnement des fours à arc

**JACQUES COURAULT**

**Résumé :** Cet article présente une synthèse du fonctionnement des fours à arc à courant continu ou alternatif. L'analyse des avantages et des inconvénients des deux technologies du point de vue de leurs caractéristiques électriques et thermiques permet d'expliquer pourquoi les fours à courant alternatif restent majoritairement répandus dans le monde.

## 1. Historique

En 1850 la production mondiale de fer était de 60000 t/an. Fer à l'état pâteux, à l'époque on ne savait pas maîtriser les températures élevées.

1856 en Angleterre, on obtient de l'acier liquide par injection d'air à travers un bain de fonte.

1865 en France, MARTIN obtient de l'acier liquide par préchauffage de l'air de combustion avec une flamme de gaz.

1878 en Angleterre, THOMAS réussit à affiner des fontes haute teneur en phosphore avec un revêtement en dolomie et en ajoutant de la chaux.

1900 en France, HEROULT réalise pour la première fois la production d'acier dans un four électrique.

Pendant 50 ans ces moyens de production seront améliorés de manière continue... Ainsi, en 1950 la production d'acier dans le monde était de 190 millions de tonnes.

- Four MARTIN ..... 80%
- Convertisseur BESSEMER et THOMAS... 12%
- Four électrique à arc ..... 8%

En 1990, la production du monde occidental était de 500 millions de tonnes (hormis URSS, Chine ). La répartition de cette production était la suivante:

- Four MARTIN.....2%
- Convertisseur BESSEMER et THOMAS.... 0%
- Four électrique à arc .....32%
- Convertisseur à l'oxygène.....66%

## 2. Les principaux types de four à arc

Le four à arc est essentiellement un outil de production d'acier liquide à partir de ferrailles, celles-ci pouvant être remplacées partiellement par de la fonte ou des minerais pré-réduits.

### 2.1. Les fours de fusion

Le four à arc est un outil de fusion des ferrailles de très haut rendement. Associé à une coulée continue dont le temps d'opération est généralement de 40 à 90 min, il permet à lui seul d'assurer des coulées en séquence, étant entendu que toutes les opérations d'affinage, autres que décarburation et déphosphoration, sont reportées en poche dans une installation d'affinage secondaire adaptée à la qualité des aciers à obtenir. Les fours dits de fusion sont de gros perturbateurs des réseaux électriques.

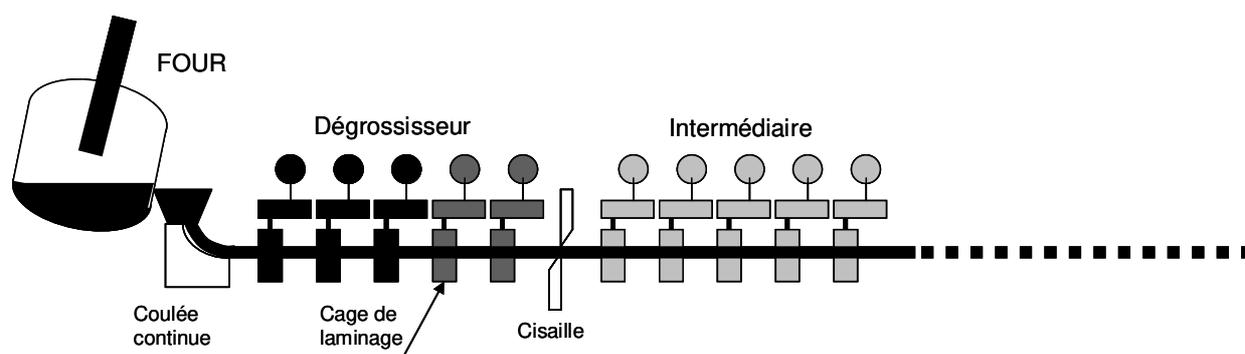


Figure 1 : Exemple de coulée continue

## 2.2. Les fours poche

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, le traitement de l'acier liquide hors du four d'élaboration était limité à deux types d'applications très spécifiques.

- Le dégazage sous vide d'aciers spéciaux, destiné surtout à éliminer l'hydrogène.

- Le brassage de l'acier lors de sa coulée en poche avec un laitier désoxydant et désulfurant fondu séparément. Au début des années 50, les essais de brassage en poche par injection de gaz neutre, au moyen de bouchons poreux placés au fond de la poche, peuvent être considérés comme le début de la nouvelle métallurgie, dénommée métallurgie en poche ou métallurgie secondaire, qui allait se développer considérablement dans les deux décennies suivantes. Ce développement spectaculaire de la métallurgie en poche, qui représente un des éléments marquants de l'évolution de la sidérurgie depuis 1950, peut être attribué à trois raisons principales.

- Le souci de réserver le four principal – convertisseur, four électrique – à la production d'acier brut, et de confier l'ajustement de composition et de température, délicat et consommateur de temps, à une opération effectuée ultérieurement en poche. D'où un gain global de productivité et de prix de revient.
- L'apparition de la coulée continue, qui nécessite une fourchette plus étroite de température que la coulée en lingots, ainsi qu'un métal plus propre en inclusions, ce qui est plus facilement obtenu par un traitement en poche, avec l'avantage supplémentaire de pouvoir utiliser la poche comme réservoir tampon entre le four et la coulée continue.
- Le développement des exigences sur les fourchettes de composition, et sur les compositions elles-mêmes, qui ne peuvent être réalisées que par un traitement spécial en poche.

- Les fours poche perturbent faiblement les réseaux.

## 2.3. Les fours à réduction - fours à carbure, à phosphore et certains fours à ferroalliages.

Ils ne nécessitent pas d'être équipés de systèmes de réglage rapides. Au contraire, ces fabrications sont caractérisées par une marche sur résistance et non sur arc pour laquelle les électrodes doivent être déplacées le moins souvent possible. De plus, il se présente fréquemment un phénomène d'auto-réglage qui provoque une compensation partielle des écarts brusques de courant, par une modification de la résistivité de la charge. Le réglage n'a donc pas à intervenir pendant l'évolution de ce phénomène, mais seulement si l'écart moyen de réglage atteint une valeur déterminée au bout d'un certain temps... Le réglage est basé plus sur l'énergie apportée au four que sur tout autre paramètre... Par rapport aux fours dits de fusion, ces fours sont de puissance très modeste. La raréfaction des ferrailles de bonne qualité (en raison du développement des aciers alliés et revêtus, notamment pour l'automobile) et la disponibilité d'énergie fossile à bon marché ont conduit certaines usines à remplacer une partie des ferrailles par du minerai pré-réduit (DRI) ajouté en continu pendant la fusion dans une proportion pouvant atteindre 95 %.

## 2.4. Deux types de four. AC et DC...

Les fours à courant continu existent depuis une trentaine d'années. Leur intérêt est qu'ils engendrent des perturbations sur les réseaux plus faibles que les fours alternatifs. Malgré cela les fours alternatifs, plus classiques, continuent à être retenus par les métallurgistes, pour des raisons de simplicité, essentiellement.

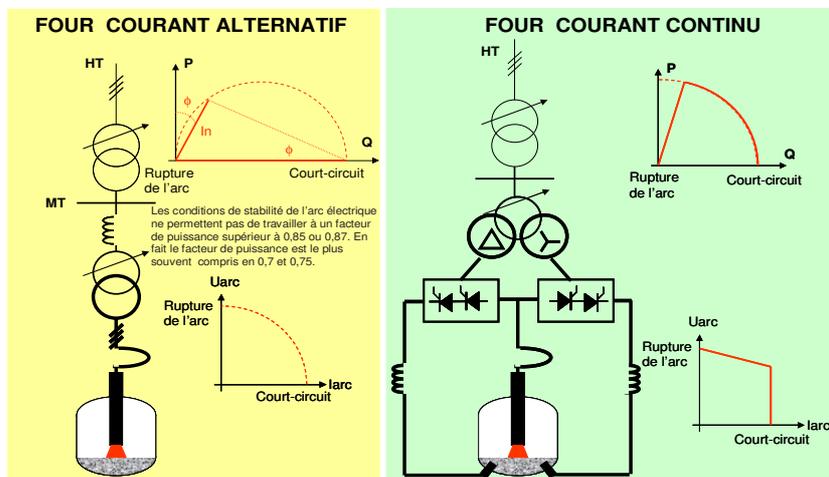


Figure 2 – Principe d'alimentation des fours en alternatif et en continu

### 3. Morphologie de l'arc

L'arc se compose d'un jet de plasma (gaz ionisé négatif) de la cathode vers l'anode.

- Pour un arc alternatif, l'électrode de graphite devient cathode ou anode, suivant l'alternance du courant. On observe des inclinaisons variables de l'arc, dues aux interactions magnétiques des arcs.
- Pour un arc continu, on observe une stabilité accrue de l'arc et une usure de l'électrode moins importante : en choisissant l'électrode de graphite pour cathode et le bain d'acier pour anode, le jet de plasma s'effectue de l'électrode vers le bain.

La résistance dynamique de l'arc est négative... Dans tous les cas cela pose le problème de la stabilité de l'arc; pour les fours alternatifs la partie alimentation aide à la stabilité. Pour les fours à courant continu l'enveloppe des valeurs, de cette résistance négative, permet, en association avec les performances dynamiques de l'alimentation, le dimensionnement de l'inductance qui est disposée en série avec l'arc...

#### 3.1. Transfert de chaleur

Les mécanismes de transfert de la chaleur, par ordre d'importance, sont les suivants:

- Le rayonnement.
- La convection.
- La conduction.

Il en résulte que l'efficacité maximale est obtenue quand l'arc est entouré de matière. C'est le cas en début de fusion avec « les puits ».

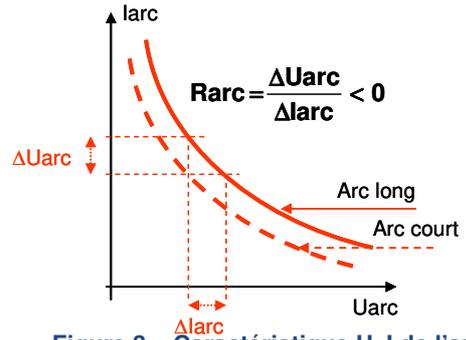


Figure 3 – Caractéristique U, I de l'arc

#### 3.2. Modèles macroscopiques de l'arc

Il en existe plusieurs, celui proposé par Herta Ayrton et des modèles dynamiques comme celui de Mayr et celui de Cassie qui est le plus utilisé.

$$\frac{dR_a}{dt} = \frac{R_a}{\theta} \cdot \left( 1 - \frac{R_a^2 \cdot I_a^2}{V_o^2} \right) \quad (1)$$

Ra résistance de l'arc.

θ constante de temps de désionisation de l'arc, de l'ordre de 400 μs.

Vo tension d'arc, elle est en relation avec la longueur de l'arc, comprise entre 400 et 800 V.

Ia courant d'arc.

Cette dernière modélisation donne des formes courant / tension en accord avec les mesures (figure 4).

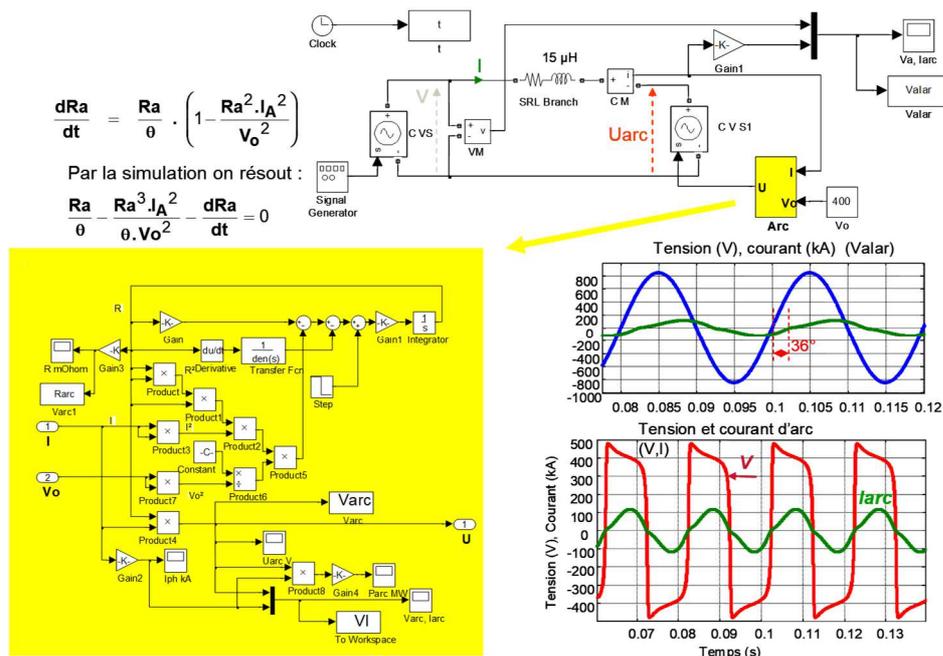


Figure 4 – Simulation de l'arc avec le modèle de Cassie

### 4. Fours à courant alternatif

Encore aujourd’hui, ils sont les plus utilisés. Essentiellement pour des raisons de maîtrise technologiques. Pour fixer les idées, quelques exemples

de fours existants sont donnés dans le tableau de la figure 5.

La quantité d’énergie théoriquement nécessaire pour fondre une tonne de ferrailles en une tonne d’acier liquide à 1550°C est de l’ordre de 365 kWh.

	FOUR 1	FOUR 2	FOUR 3
CAPACITE	<b>60 tonnes</b>	<b>360 tonnes</b>	<b>100 tonnes</b>
DIAMETRE DE LA CUVE	<b>5,5 m</b>	<b>9,8 m</b>	<b>6,8 m</b>
PUISSANCE DU TRANSFORMATEUR	<b>35 MVA</b>	<b>162 MVA</b>	<b>77 MVA</b>
TENSION ENTRE PHASES	<b>130 à 450 V</b>	<b>600 à 840 V</b>	<b>793 V</b>
INTENSITE MAXIMALE	<b>45 kA</b>	<b>110 kA</b>	<b>80 kA</b>
DIAMETRE DES ELECTRODES	<b>500 mm</b>	<b>710 mm</b>	<b>600 mm</b>
PRODUCTION ANNUELLE POSSIBLE	<b>180000 à 300000 tonnes</b>	<b>1000000 tonnes</b>	<b>250000 à 600000 tonnes</b>

Figure 5 – Trois fours existants...

#### 4.1. Quelques éléments technologiques

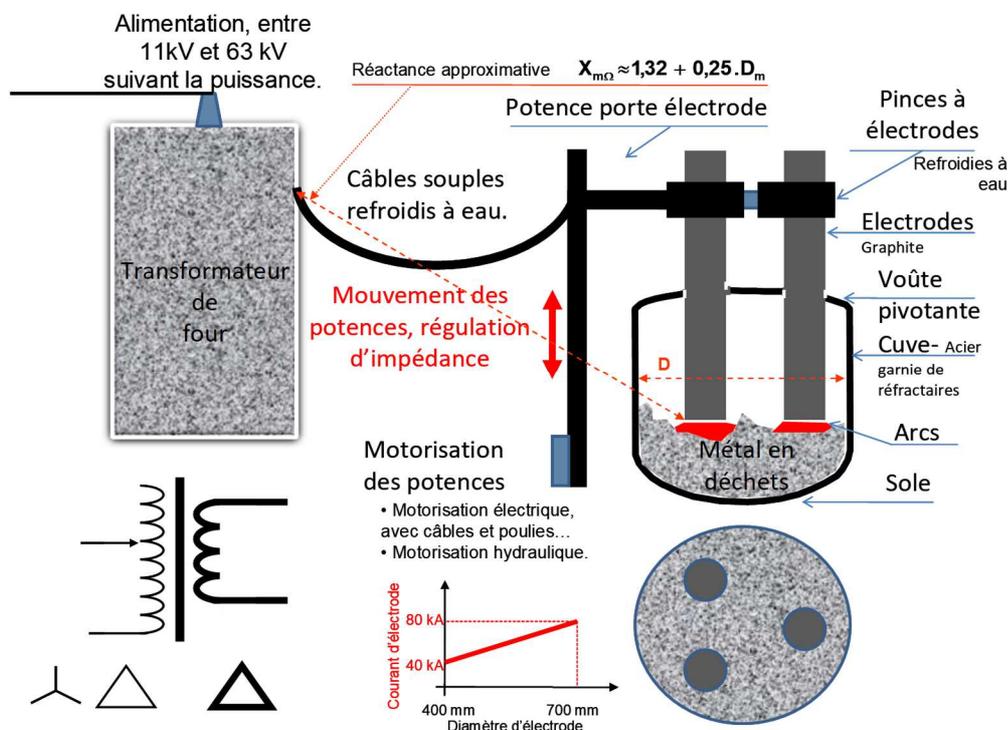


Figure 6 – Représentation simplifiée des composants d’un four à arc triphasé

- **Voûte**, en fait seule la partie centrale, autour des électrodes est constituée de réfractaires: elle est remplacée toutes les 200 coulées (environ). Le reste de la voûte est refroidi par une projection d'eau pulvérisée: la tenue dépasse les 10000 coulées.
- **La cuve peut être divisée en trois parties**, supérieure, médiane et sole. Il s'agit de parties amovibles, acier et réfractaires, refroidies à eau. La maintenance est faite sur site mais le plus souvent on procède à un échange de cuve (plus rapide et moins perturbant pour les fabrications).
- La consommation d'électrodes s'élève de 2 kg par tonne d'acier liquide pour les fours les plus performants à très haute productivité et à 4 kg par tonne pour les fours de production plus petits.

- Un four à arc comprend pour chaque électrode un dispositif de réglage qui contrôle la longueur de l'arc, en fonction d'une consigne.
  - L'impédance de l'arc.
  - Le courant d'électrode.

Les difficultés rencontrées pour ce réglage sont les suivantes :

- La mesure de la tension d'arc. En fait c'est la prise de sole qui est délicate à réaliser et parfois instable en fonction de l'état du four (début de fusion).
- Les fluctuations de la tension d'alimentation.

Les performances dynamiques influent,

- Sur la qualité du produit.
- Sur la consommation d'électrode.
- Sur les perturbations sur le réseau.

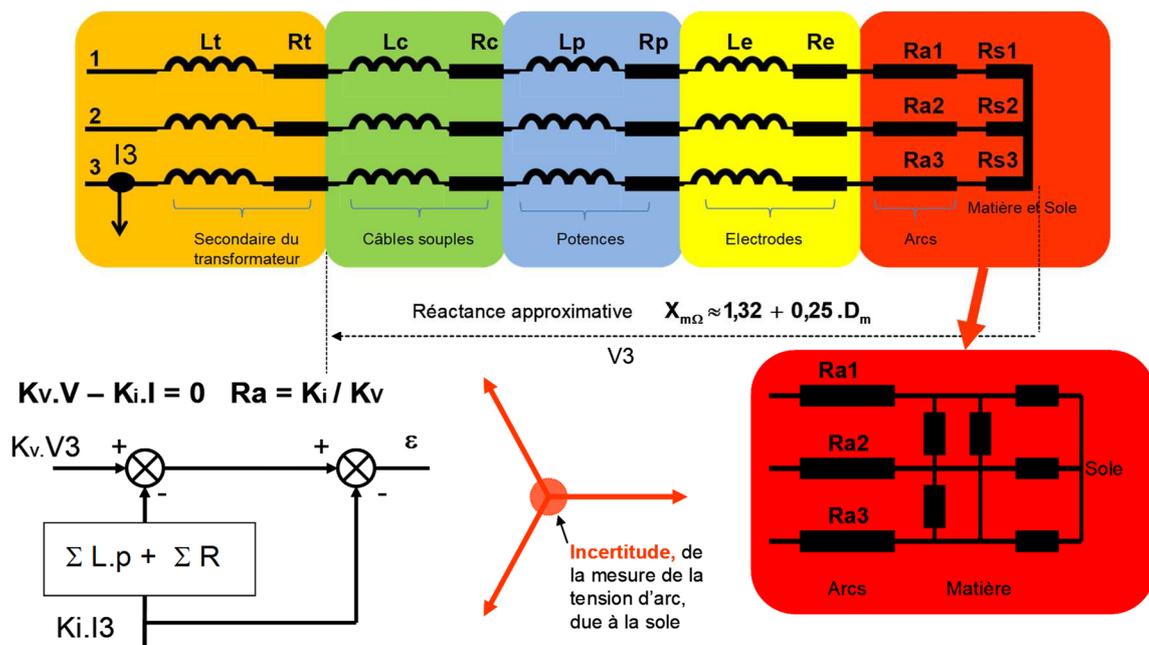


Figure 7 – Mesure de la tension d'arc

### 5. Régulation de la résistance de l'arc

On parle généralement de régulation d'impédance... Les impédances (ou les résistances) sont les seuls paramètres indépendants pour les 3 phases. Ce n'est pas le cas des courants, ils sont liés par  $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ ...

La résistance de l'arc est en première approximation proportionnelle à sa longueur... Quand on souhaite augmenter la résistance de l'arc on soulève l'électrode, quand on veut la réduire on la baisse. Quand elle est jugée satisfaisante, la référence vitesse est nulle... Il est bien clair que chaque électrode a son contrôle.

Le modèle le plus classique d'évaluation de la résistance de l'arc est donné par la formule de Cassie. Dans le cas présent, cette formule est difficile à utiliser, nous préférons une vision plus simpliste qui lie la résistance de l'arc à sa longueur.

$$Ra = \alpha \cdot \frac{xa}{Sa} \quad \text{Sa représente la surface de l'arc.}$$

$$\frac{dRa}{dt} = \frac{\alpha}{Sa} \cdot \frac{dxa}{dt} \rightarrow Ra \cdot p = \beta \cdot \Omega$$

$\Omega$  est la vitesse du moteur de réglage.

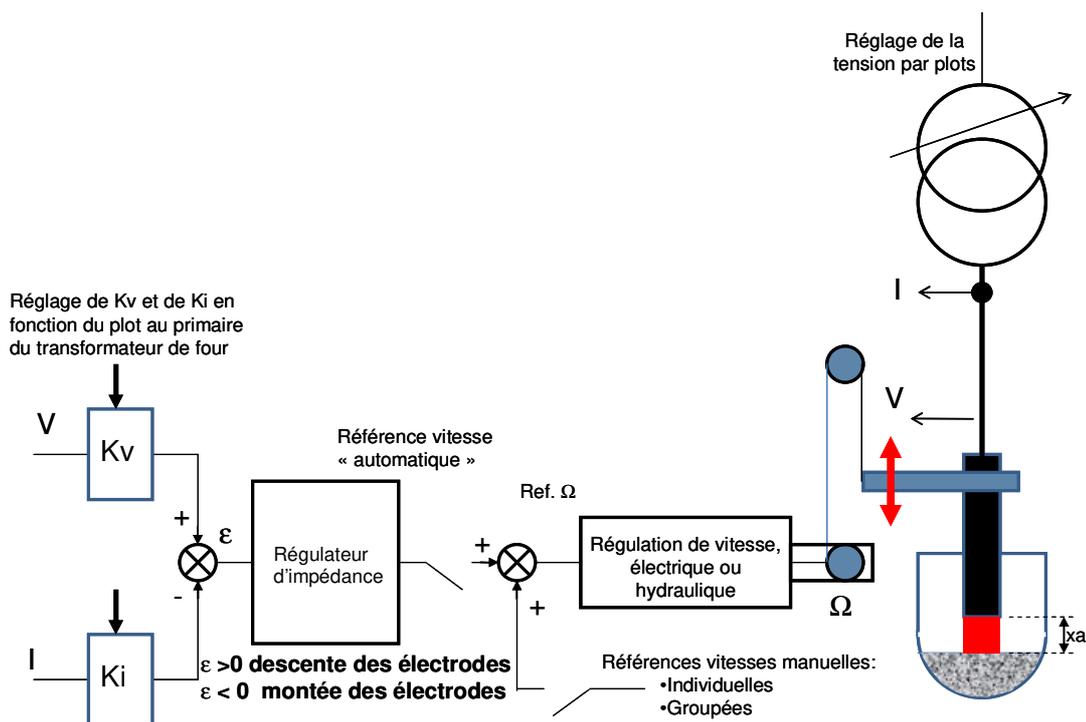


Figure 8 – Principe de la régulation de l'arc.

Il n'est pas illogique de trouver une relation intégrale en une position et la vitesse. Ainsi se trouve définie de manière approximative la fonction de transfert entre la résistance de l'arc et la référence vitesse du moteur.

Si le déplacement est obtenu à partir d'une motorisation électrique, cette dernière est bien évidemment quatre quadrants et les performances souhaitées peuvent être résumée par la formule suivante.

$$\frac{\Omega}{\text{Réf } \Omega} = \frac{1}{K_{\Omega}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{p}{3}}$$

Une des limites de performances est donnée par la fréquence propre des potences : les ensembles potences et électrodes ont des fréquences propres qui sont de l'ordre de 1 à 2 Hz

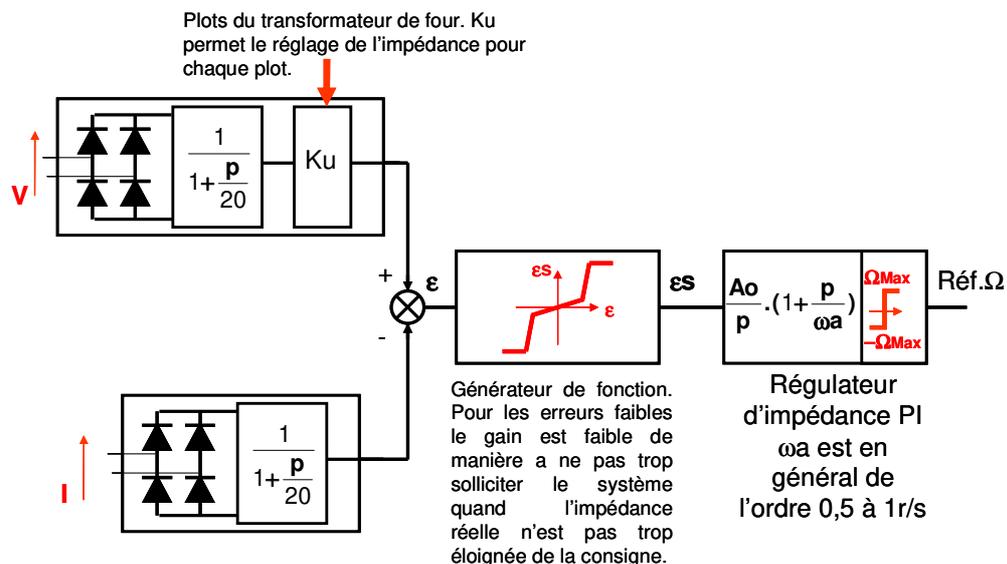


Figure 9 – Régulation d'arc pour chaque électrode

Les retours V et I sont traités de manière sommaire. Redressement double alternance et filtrage à 50 ms c'est assez rustique... Des améliorations basées un calcul plus précis des valeurs efficaces serait plus satisfaisant pour l'esprit, mais ce conditionnement de V et I, fait depuis des lustres, montre qu'il convient parfaitement...

### Difficultés de la régulation d'impédance

Les principales phases de production sont les suivantes:

#### L'amorçage

Les électrodes sont en position haute. La cuve est pleine de ferraille froide. Les électrodes descendent, sans courant, la première qui touche la ferraille doit attendre les autres pour qu'un courant apparaisse et que la régulation d'impédance fonctionne.

#### La fusion

C'est une phase perturbée, la matière n'est pas encore en fusion et l'arc manque de stabilité. Assez vite, sous le contrôle de la régulation d'impédance, l'arc creuse la matière, on dit que des puits se forment. Le gain des régulateurs d'impédance peut ne pas être bien adapté. Quand on modifie la position de l'électrode, la variation d'impédance est faible. De plus le risque de casse des électrodes est important lors de l'éboulement desdits puits. Les puits sont malgré tout favorables, l'arc est confiné dans la matière et les parois sont protégées.

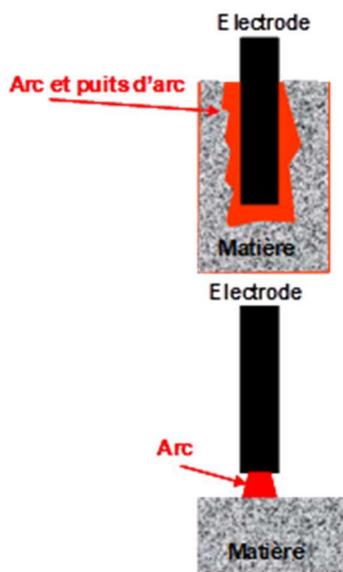


Figure 10 – Configurations de l'arc

#### L'affinage

C'est la phase la plus stable, le bain est formé et les arcs sont géométriquement stables. Dans cette situation les casses d'électrode sont rares. Mais la stabilité de la régulation d'impédance doit être parfaitement stable :

les électrodes ne doivent pas toucher le bain de manière à éviter toute pollution.

## 6. Les transformateurs de four

Le transformateur d'alimentation du four à arc est très différent d'un transformateur de distribution et beaucoup plus délicat à construire.

- Son rapport de transformation est très élevé puisque les tensions secondaires à obtenir se chiffrent en centaines de volts, alors que les tensions primaires sont de l'ordre de 10 à 70 kV ; le rapport est donc nettement plus élevé que celui des transformateurs classiques.
- Il est à prises multiples pour permettre au fondeur d'ajuster la tension secondaire en fonction des étapes de l'opération.
- Il est soumis à des efforts électrodynamiques importants d'où un certain avantage pour le transformateur du type cuirassé, au moins pour les puissances importantes.
- Sa réactance doit être faible, de l'ordre de 4 à 5 % pour les puissances élevées, puisqu'il est nécessaire de maintenir dans des limites raisonnables la réactance totale de l'installation (il doit malgré tout être noté que le flicker est inversement proportionnel à la réactance globale).

Plusieurs types de transformateurs sont couramment utilisés en aciérie : transformateur colonne ou cuirassé. Le réglage de la tension est effectué par variation du nombre de spires au primaire, à l'aide d'un autotransformateur de réglage.

En règle générale, on utilise un transformateur de type intérieur à bain d'huile et circulation forcée avec réfrigérant extérieur au transformateur ; le transformateur est calculé pour satisfaire à des spécifications plus sévères que celles imposées aux transformateurs de distribution.

Les fours des aciéries les plus performantes, dont la capacité de production annuelle dépasse le million de tonnes, ont des puissances spécifiques d'au moins 1 000 kVA par tonne avec une tension secondaire maximale qui peut dépasser 1 000 V entre phases.

### Commutateur de prises

Le réglage du rapport de transformation peut être effectué hors tension ou en charge. Bien que plus exigeant au point de vue entretien, le commutateur en charge est souvent adopté pour les fours d'aciérie de façon à réduire les temps hors tension et les contraintes

imposées au disjoncteur. Un sélecteur de prise réalise, avant la commutation, les connexions entre le commutateur et la prise choisie reliée au sélecteur :

- Dans une première solution, le courant est transféré à travers des résistances de décharge ;
- Certains constructeurs (notamment aux États-Unis) préfèrent incorporer, au commutateur, un interrupteur sous vide qui coupe le courant pendant l'opération de passage.

## 7. Le réseau

Sur les fours alternatifs il convient de réfléchir pour en minimiser les effets sur le réseau. Les outils de compensation dynamiques de la puissance réactive existent : Statocompenseurs en Français ou SCV (Static Var Compensator) équipements à thyristors qui existent depuis une cinquantaine d'années, et STATCOM équipements à GTO ou IGBT qui existent depuis une vingtaine d'années.

Les perturbations sur les réseaux font l'objet de nombreuses normes et recommandations, pour les fours il s'agit du FLICKER dont l'évaluation est basée sur les variations de tension qui perturbent le plus l'œil humain, quand la tension alimente une ampoule classique à filament. C'est donc l'association lampe et œil humain (moyen) face à des scintillements engendrés par les variations de la tension qui sont réglementés. Sachant que la sensibilité de l'œil est maximale à 10 Hz, c'est à 10 Hz que les premières réglementations ont vu le jour.

Dans un premier temps on a considéré le

$$\Delta V_{10} = \left( \frac{\Delta V}{V} \right)_{10\text{Hz}} = \left( \frac{\Delta Q}{S_{cc}} \right)_{10\text{Hz}}$$

Aujourd'hui on considère (CEI) Pst et Plt qui sont des critères de dépassement d'un gabarit sur des périodes de 10 mn pour le Pst (Perceptibility short time) et 2 h pour le Plt (Perceptibility long time). Voir schéma du flickermètre international d'après UIE et CEI 61000-4-15, [7].

Un SVC à thyristors classique est très efficace à 10 Hz, mais avec une certaine pondération, l'évaluation du flicker s'étend jusqu'à une trentaine de Hz, fréquences difficiles à atteindre avec des thyristors, d'où l'utilisation de STATCOM qui permettent des dynamiques beaucoup importantes. Mais pour des équipements dont la puissance dépasse souvent les 50 MVA les SCV classiques ont globalement un coût plus faible, d'où dans certains cas l'association, sur une même installation, d'un SVC de forte puissance et d'un STATCOM de puissance réduite pour les fréquences élevées, par exemple pour un besoin de 100%, 80% de SVC et 20% de STATCOM.....

## 8. Fours à courant continu

L'emploi du courant continu est l'événement le plus important de l'évolution du four à arc au cours des dernières années.

Après un essor plutôt lent en France (en 1987, Métalescaut avec une capacité utile de 75 t et une puissance maximale de 60 MW), , en Allemagne puis aux États-Unis, le four à courant continu a soulevé, à partir de 1990, un vif intérêt au Japon, très probablement parce que, disposant de réseaux électriques relativement peu puissants, un four DC provoquant moins de perturbations électriques y était particulièrement intéressant.

Un schéma de principe, figure (11), comprend transformateur, redresseur à thyristors et inductance de lissage, électrode de graphite et électrode de sole, barres d'interconnexion. La régulation est une régulation d'arc à deux composantes. La commande des thyristors régule l'intensité et délivre la tension requise par le système. Le second étage, effectue le réglage de la longueur de l'arc, ou régulation de la tension d'arc. Aujourd'hui, on peut dire que le four à courant continu est un four mono électrode, les différences essentielles entre constructeurs portant sur la conception du pôle positif relié à la sole, qui peut être réalisé de quatre façons différentes :

- Sole conductrice.
- Anode constituée de feuillets d'acier incorporés dans une sole réfractaire monolithique.
- Anode constituée de billettes rondes en acier (une ou plusieurs) noyées dans la sole et refroidies à leur partie inférieure dans une chemise en cuivre à circulation d'eau.
- Anode constituée d'un assez grand nombre de broches de contact d'un diamètre de l'ordre de 50 mm qui traversent la sole réfractaire et permettent le passage du courant.

Par rapport au four alternatif, les avantages du four à courant continu sont les suivants :

- Réduction du flicker de l'ordre de 50 %.
- Réduction sensible du bruit.
- Réduction de la consommation d'électrode de graphite (de l'ordre de 2 kg/t contre 3 à 4 pour le four alternatif).
- Augmentation de la productivité et économie d'énergie (de l'ordre de 2 %).

En contrepartie, il faut tenir compte :

- Du prix au kilogramme des électrodes de graphite de gros diamètre.
- De frais d'installation plus élevés du fait de la présence du groupe redresseur, souvent compensés en partie par des

investissements moins élevés pour la protection du réseau.

- De frais d'entretien de sole plus élevés.

Dans un four alternatif les trois électrodes mobiles au carbone sont au potentiel des phases et l'acier constitue un neutre flottant, la cuve métallique du four étant reliée à la masse et isolée de l'acier par des réfractaires. Dans un four continu l'électrode mobile au carbone est au potentiel négatif (cathode) et l'acier au potentiel positif (anode), le retour du courant s'effectuant par des électrodes de « sole » disposées au fond de la cuve et en contact direct avec de l'acier liquide. A chaque coulée on conserve un fond liquide, le « pied de bain », pour le début du cycle suivant, lequel commence par le chargement du premier panier de ferraille.

La technologie des électrodes de sole est aujourd'hui bien maîtrisée. Il en existe deux types.

- **Electrodes concentrées :** le courant est concentré sur des billettes d'acier verticales, traversant le fond de la cuve et refroidies à l'eau dans leur partie basse. Cette technologie a été la première développée, en France, par l'IRSID. Elle présente quelques risques, plus théoriques que réels : explosion en cas de mise en contact de l'eau avec l'acier liquide ; percement du réfractaire d'isolement entre billette et cuve, notamment par des coulées de métaux lourds, comme le plomb ; dissymétrie du courant entre les électrodes de sole. La capacité des électrodes billettes est limitée à environ 30 kA et on en dispose en général 4, réparties sur la sole.
- **Electrodes réparties sur la sole.** Plusieurs variantes ont été développées par les mécaniciens : briques réfractaires conductrices, aiguilles ou bobine verticales noyées dans un réfractaire isolant. Cette technologie supprime les trois risques cités pour l'électrode concentrée.
- **La régulation de la longueur de l'arc** est assez comparable à celle que l'on utilise sur les fours alternatifs. La formule de Cassie est parfaitement utilisable. On régule, soit la résistance d'arc, soit la tension d'arc. La difficulté de la mesure de cette tension demeure et s'accroît : Les tensions sont continues, pour avoir un bon isolement on utilise des mesures de tension à « effet Hall ».

### Alimentation des électrodes [3], [4], [5], [6].

Les convertisseurs de forte puissance engendrent sur les réseaux une consommation de puissance réactive importante. Il est donc logique de rechercher les

solutions, topologies et contrôles, qui contribuent à réduire la puissance réactive quand la puissance active varie. On peut éventuellement compenser la puissance réactive fixe, mais les variations sont plus difficiles à éliminer : cette compensation étant nécessairement dynamique.

Le cahier des charges d'un redresseur destiné à alimenter un four à courant continu est relativement succinct mais exigeant...

- Puissance réactive réduite.
- Variations de puissance réactive réduite quand la puissance active varie.
- Possibilité de passage en onduleur pour contrôler rapidement le courant continu en cas de court-circuit entre électrode et ferraille.

**Pont de Graëtz (a).** C'est la solution de base, elle est bien connue. La construction de redresseurs de 50 kA voire de 100 kA ne pose pas de difficultés particulières (électrolyse de l'aluminium). Le problème c'est l'importance de la variation de la puissance réactive en fonction de la puissance active.

**Pont mixte (b).** Trois diodes, trois thyristors, le gain sur la puissance réactive est très significatif. Mais il est impossible de rendre  $E_d$  négatif (pour contrôler rapidement des courants de court-circuit). De plus, dans les courants de phase on trouve des harmoniques pairs, de rang 2 en particulier. Ce n'est pas acceptable pour les réseaux.

#### **Pont de Graëtz avec thyristor de roue libre (c).**

Hélas, la conduction du thyristor n'est passible que pour des angles d'amorçage supérieurs à  $60^\circ$ , ce qui en limite l'intérêt vis-à-vis de la caractéristique  $Q = f(P)$ . Mais la roue libre étant bloquée,  $E_d$  peut devenir négatif.

**Pont de Graëtz avec deux thyristors de roue libre sur le neutre (d).** C'est la même idée que (c), mais dans ce cas les thyristors peuvent conduire dès que  $\alpha$  dépasse  $30^\circ$ . D'où de meilleurs performances au niveau de  $Q = f(P)$ .

**Pont de Graëtz avec commandes décalées (e).** Le pont mixte n'est qu'un cas particulier de commandes décalées. Le fait de dissocier la commande du pont en a et b introduit un degré de liberté supplémentaire qui permet de minimiser la consommation de puissance réactive en fonction de la puissance active. Hélas comme pour le pont mixte il existe une production d'harmoniques pairs qui n'est pas acceptable.

**Pont de Graëtz avec deux thyristors de roue libre sur le neutre et commandes décalées (f).**

Ce schéma reprend l'ensemble des possibilités déjà décrites. Il permet en particulier de définir plusieurs stratégies de commande. A courant d'arc donné, on peut fonctionner sur toute la surface  $S_f$ , La régulation de courant maintient le courant d'arc constant et fixe la puissance active à une valeur qui est fonction de la tension d'arc, il reste alors un degré de liberté pour fixer la puissance réactive. D'où trois stratégies possibles :

**Loi 1** à puissance réactive minimale.

**Loi 2** à variation de puissance réactive minimale.

**Loi 3** commande à roues libres non décalées.

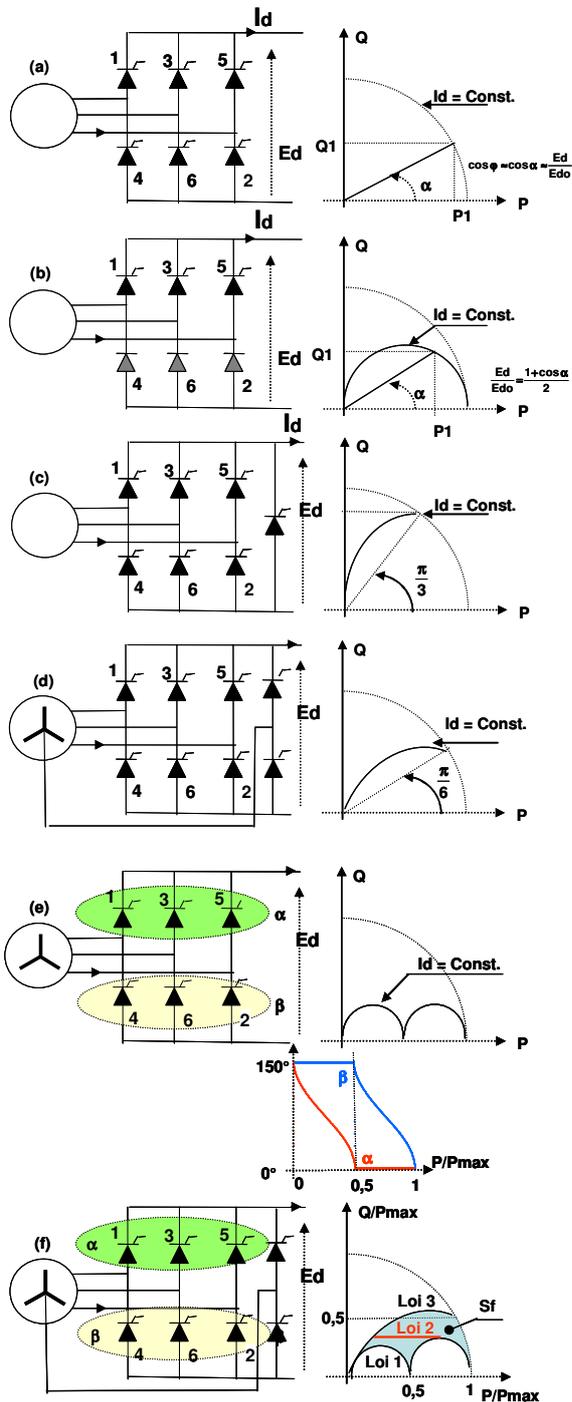


Figure 11 – Evolutions de la topologie de base, pont de Graëtz, pour la prise en compte des impératifs du cahier des charges...

Pour rendre la solution réaliste il faut maintenant éliminer les harmoniques pairs des courants de ligne. Ainsi, pour la figure 12 les courants réseaux sont définis par les rangs  $6.k \pm 1$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ )

Cette élimination des harmoniques pairs est réalisée en disposant deux montages de type (f) de la figure 11

en parallèle, dans l'un des deux, les angles  $\alpha$  et  $\beta$  sont inversés. Les tensions continues  $E_{d1}$  et  $E_{d2}$  sont égales en valeur moyenne, mais les valeurs instantanées ne le sont pas d'où la nécessité d'avoir des inductances de couplage coté continu... Cela dit, cette inductance a également un rôle important dans la stabilité de l'arc, du fait de la résistante dynamique négative. Ce problème se rencontre à chaque fois que l'on alimente un arc, c'est en particulier le cas des torches à plasma...

- Ces inductances assurent le découplage des deux convertisseurs.
- Ces inductances jouent un rôle important dans la stabilité de l'arc. Le dimensionnement tient compte de l'arc et de la régulation de courant.

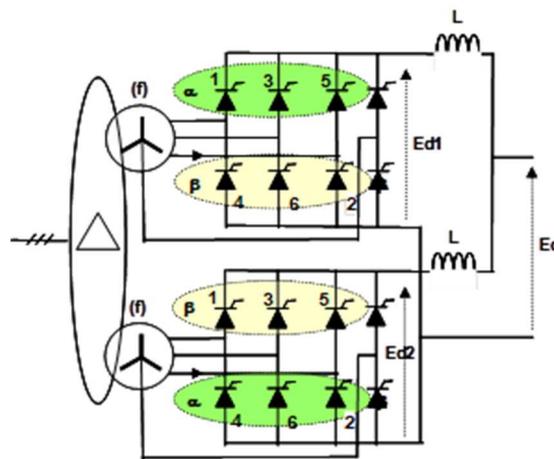


Figure 12 – Alimentation pour une électrode

Du fait des commandes  $\alpha$  et  $\beta$  décalées et des thyristors de roue libre, il est évident que les thyristors des ponts de Graëtz ne sont pas chargés de manière identique. Il est donc nécessaire, en fonction des constantes de temps thermiques, de passer périodiquement de  $\alpha$  à  $\beta$  et réciproquement. Ce passage doit se faire de manière transparente vis-à-vis du procédé.

La topologie des alimentations utilisées est assez complexe, elle est connue depuis des années, elle est assez largement développée dans la littérature. Mais les lois de commande le sont peu, elles font d'ailleurs d'objet de plusieurs brevets, CEGELEC et ALSTOM posés par Monsieur Jacques du Parc.

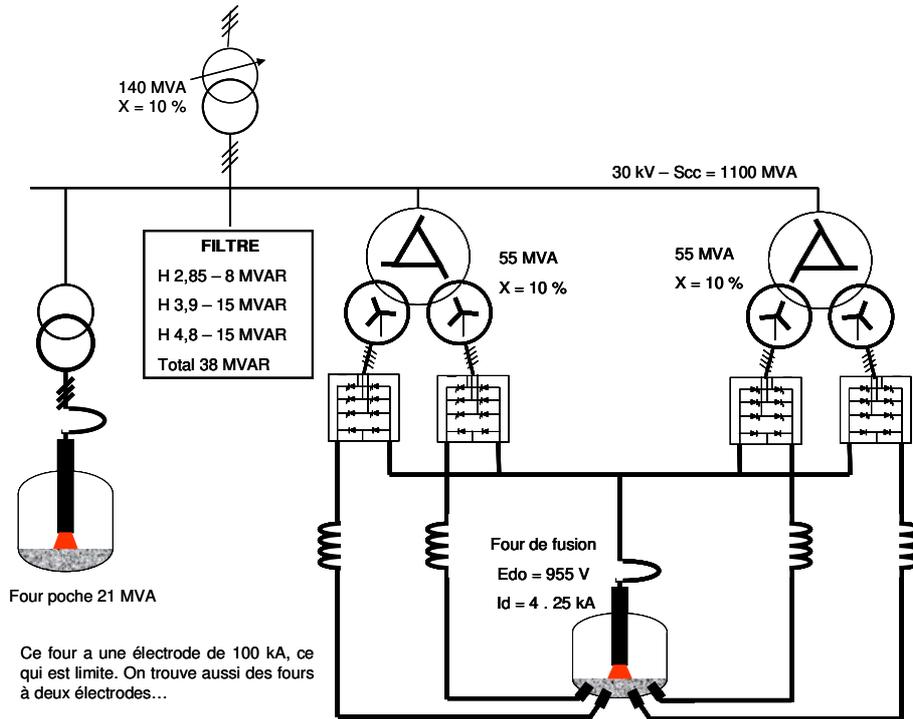


Figure 13 - Schéma unifilaire du four à arc de COCKERILL

Régulation de courant et dimensionnement des inductances

Avant de résoudre le problème particulier des fours à arc à courant continu, posons le problème général de la régulation de courant d'un convertisseur qui alimente un arc : c'est un cas générique qui se pose pour les fours à arc mais également pour les torches à plasma de fortes puissances.

La tension d'arc peut être modélisée de bien des manières, en fait pour chaque problème il faut choisir la modélisation la mieux adaptée... Dans le cas présent

soit  $U_{arc} = A + \frac{k}{I_{arc}}$  ce qui permet de voir que la

résistance dynamique de l'arc est négative  $\frac{dU_{arc}}{dI_{arc}} = -\frac{k}{I_{arc}^2} = -R_a$ . Prenons l'exemple d'un arc

avec deux points de la caractéristique  $U_{arc} = f(I_{arc})$  connus :  $U_1 = 800 \text{ V}$ ,  $I_1 = 3000 \text{ A}$  et  $U_2 = 700 \text{ V}$ ,  $I_2 = 15000 \text{ A}$ . Tous calculs faits nous obtenons  $A = 675 \text{ (V)}$  et  $k = 375000 \text{ (W)}$ .

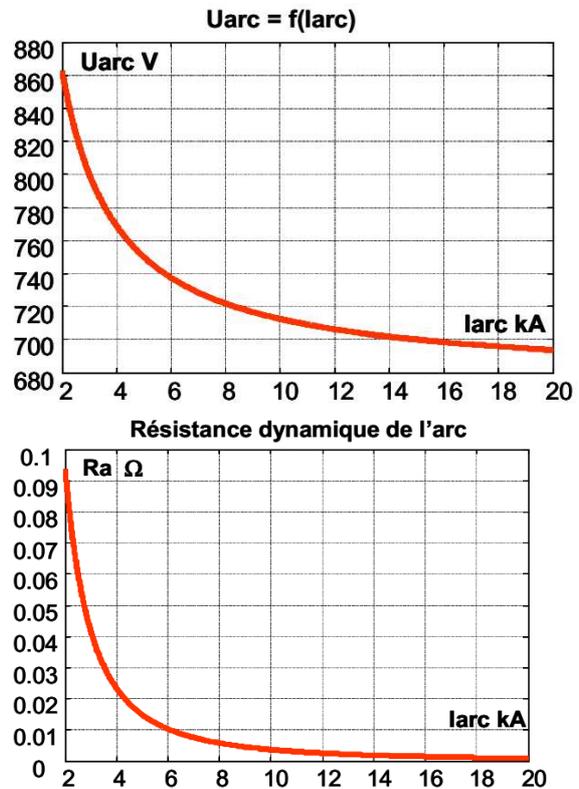


Figure 14 - Caractéristiques approximatives de l'arc pris en compte dans la suite...

Dans le but de déterminer  $\Lambda$  et la structure du régulateur courant nous considérons le système pour de petites variations de  $E$  autour d'un courant d'arc  $I_o$ ...

On pose,  $R_{ao} = \frac{k}{I_o^2}$ , d'où

$$\Delta E = R \cdot \Delta I + \Lambda \cdot p \cdot \Delta I - \frac{k}{I_o^2} \cdot \Delta I = (R + \Lambda \cdot p - R_{ao}) \cdot \Delta I$$

la fonction de transfert en courant est donc,

$$\left( \frac{\Delta I}{\Delta E} \right)_{I_o} = \frac{1}{R - R_{ao} + \Lambda \cdot p}$$

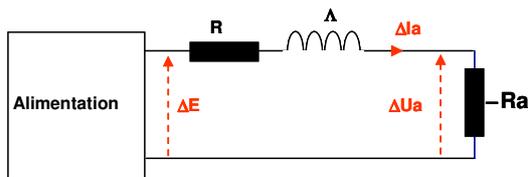


Figure 15 - Schéma de base

Soit encore, en posant

$$\omega_{ao} = \frac{R - R_{ao}}{\Lambda} \text{ et } K_{ao} = \frac{1}{R - R_{ao}}$$

$$\left( \frac{\Delta I}{\Delta E} \right)_{I_o} = \frac{K_{ao}}{1 + \frac{p}{\omega_{ao}}} \quad \omega_{cbo} \text{ et } K_{ao} \text{ sont des grandeurs}$$

de même signe, le plus souvent négatives  $R_{ao} > R$ .

Face à la fonction de transfert  $(\Delta I / \Delta E)$  on peut imaginer un régulateur proportionnel.

$$G_{bo} = A_o \cdot A_r \cdot K_{ar} \cdot K_i \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{\omega_{ar}}\right) \cdot \left(1 + \frac{p}{\omega_f}\right)}$$

l'analyse dans le plan de Bode pose quelques difficultés avec  $\omega_{ar} < 0$

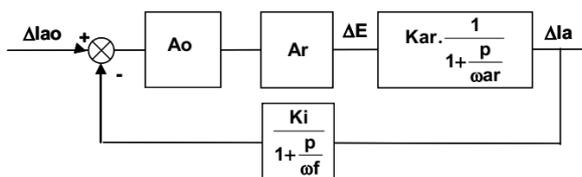


Figure 16 - Première solution

Mais en considérant, pour la coupure en boucle ouverte les pulsations supérieures à  $\omega_a$ , Bode redevient un outil utilisable..

$$G_{bo} = A_o \cdot A_r \cdot K_{ar} \cdot K_i \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{\omega_{ar}}\right) \cdot \left(1 + \frac{p}{\omega_f}\right)}$$

pour  $\omega > \omega_{ar}$

$$G_{bo} \rightarrow \frac{A_o \cdot A_r \cdot K_{ar} \cdot K_i \cdot \omega_{ar}}{p} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{\omega_f}\right)} = \frac{A_o \cdot A_r \cdot K_i}{\Lambda \cdot p} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{\omega_f}\right)}$$

Pour une coupure  $\omega_{cbo}$  entre  $\omega_a$  et  $\omega_f$ ,  $R_a$  n'intervient

plus et  $\omega_{cbo} = \frac{A_o \cdot A_r \cdot K_i}{\Lambda}$   $A_r$  est le gain de l'actionneur, par exemple  $1000V/10V = 100$ ,  $K_i$  est le coefficient d'adaptation du retour, par exemple  $10V/15000A = 0,00067$ ,  $\Lambda$  l'inductance de boucle et  $A_o$  le gain du régulateur.

A ce niveau du calcul nous pouvons faire une première estimation de l'inductance  $\Lambda$ ... Pour une stabilité très moyenne on peut écrire  $\omega_f > \omega_{cbo} > \omega_a$  ainsi la valeur maximale de  $\omega_a$  doit être inférieure  $\omega_f/4$  (et bien sûr  $\omega_{cbo} = \omega_f/2$ ). Donc la valeur maximale de  $\omega_{ar}$  est donnée par  $\omega_{ar} = \omega_f/4$ , soit :

$$\omega_{ar1} = \frac{R - R_{a1}}{\Lambda} \approx \frac{R_{a1}}{\Lambda} = \frac{\omega_f}{4} \Rightarrow \Lambda > \frac{4 \cdot R_{a1}}{\omega_f}$$

$R_{a1}$  est la valeur maximale de  $R_a$ , donc pour le courant d'arc le plus faible. Dans le cas présent  $\Lambda$  est une inductance traversée par des courants de 15000 A, même si le courant minimal est de 3000 A.  $\Lambda$  doit donc avoir une valeur aussi faible que possible, pour des raisons économiques et de volume ( $L \cdot I^2$ )

Ainsi, il apparaît que le paramètre clé c'est la rapidité de l'actionneur définie par  $\omega_f$ . Avec un actionneur capable d'une pulsation  $\omega_r = 900$  r/s ce qui conduit à un filtrage à  $\omega_f = \omega_r/2 = 400$  r/s. Il en découle la valeur de  $\Lambda$  : avec  $R_{a1} = 0,045 \Omega$  (figure (14))

$$\Lambda_{\text{mini}} \approx \frac{4 \cdot R_{a1}}{\omega_f} = \frac{4 \cdot 0,045}{400} = 0,45 \text{ mH}$$

$\omega_{cbo}$  est calculé en fonction de  $\omega_f$ ,

$$\omega_{cbo} = \frac{\omega_f}{2} = 200 \text{ r/s}$$

Il est maintenant possible de calculer le gain  $A_o$  du

$$\text{régulateur } A_o = \frac{\omega_{cbo} \cdot \Lambda}{A_r \cdot K_i} = \frac{200 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 0,00067} = 1,34$$

Ce gain assure la stabilité mais conduit à un manque de précision significatif. Pour corriger les aspects précision nous avons deux solutions, soit mettre en amont de la boucle proportionnelle une boucle intégrale, soit rendre intégrale la boucle proportionnelle évoquée. C'est cette dernière solution que nous allons développer... La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$G_{bo} = \frac{A_o}{p} \cdot \left(1 + \frac{p}{\omega_{av}}\right) \cdot K_{ar} \cdot A_r \cdot K_i \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{\omega_{ar}}\right) \cdot \left(1 + \frac{p}{\omega_f}\right)}$$

Pour  $\omega > |\omega_{ar}|$

$$G_{bo} \rightarrow \frac{A_o}{p^2} \cdot \left(1 + \frac{p}{\omega_{av}}\right) \cdot K_{ar} \cdot A_r \cdot K_i \cdot \omega_{ar} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{\omega_f}\right)}$$

Pour  $\omega > \omega_{av}$

$$G_{bo} \rightarrow \frac{A_o}{p} \cdot \frac{K_{ar} \cdot A_r \cdot K_i \cdot \omega_{ar}}{\omega_{av}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{\omega_f}\right)}$$

Pour  $\omega < \omega_f$  et avec  $Kar \cdot \omega ar = \frac{1}{\Lambda}$ , nous pouvons

calculer  $\omega cbo$

$$G_{bo} \rightarrow \frac{A_o \cdot Ar \cdot K_i}{p \cdot \Lambda \cdot \omega av} \text{ et } \omega cbo = \frac{A_o \cdot Ar \cdot K_i}{\Lambda \cdot \omega av}, A_o = \frac{\omega cbo \cdot \omega av \cdot \Lambda}{Ar \cdot K_i}$$

$$G_{bo} = \frac{\omega cbo \cdot \omega av}{p^2} \cdot \left(1 + \frac{p}{\omega av}\right) \cdot \frac{p}{1 + \frac{p}{\omega ar}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{p}{\omega f}}$$

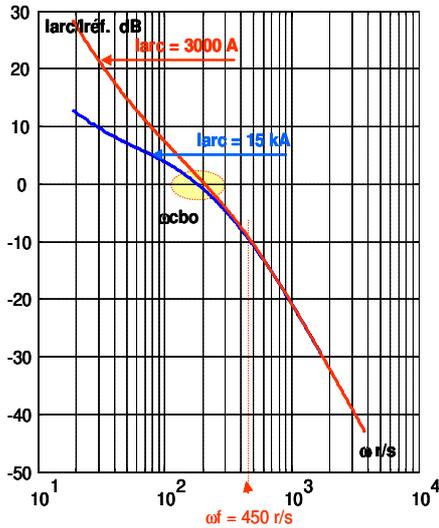


Figure 17 – Bode pour les deux résistances dynamiques de l’arc

La figure 17 a été tracée avec  $Ar = 100$ ,  $K_i = 0,000667$ ,  $R = 2,1 \text{ m}\Omega$ ,  $\omega av = 28 \text{ r/s}$  et  $L = 0,352 \text{ mH}$ , d’où un gain  $A_o = 33,3 \text{ s}^{-1}$  pour obtenir  $\omega cbo = 225 \text{ r/s}$  avec  $\omega f = 450 \text{ r/s}$ .

Compte tenu du fait que  $\omega ar$  et  $Kar$  sont des grandeurs négatives, le diagramme de Bode n’est applicable que pour  $\omega > \omega ar$ ... La figure 17 met en évidence une stabilité limite pour  $larc = 3000 \text{ A}$ , valeur du courant pour laquelle la résistance dynamique est maximale.

Avec pour actionneur un pont de Graëtz classique,  $R$  tient compte de la commutation (il est de la forme  $\frac{3}{\pi} \cdot I \cdot \omega$ ), mais avec le schéma de la figure 12, surtout du fait des thyristors de roue libre, sa détermination ne peut être qu’approximative...

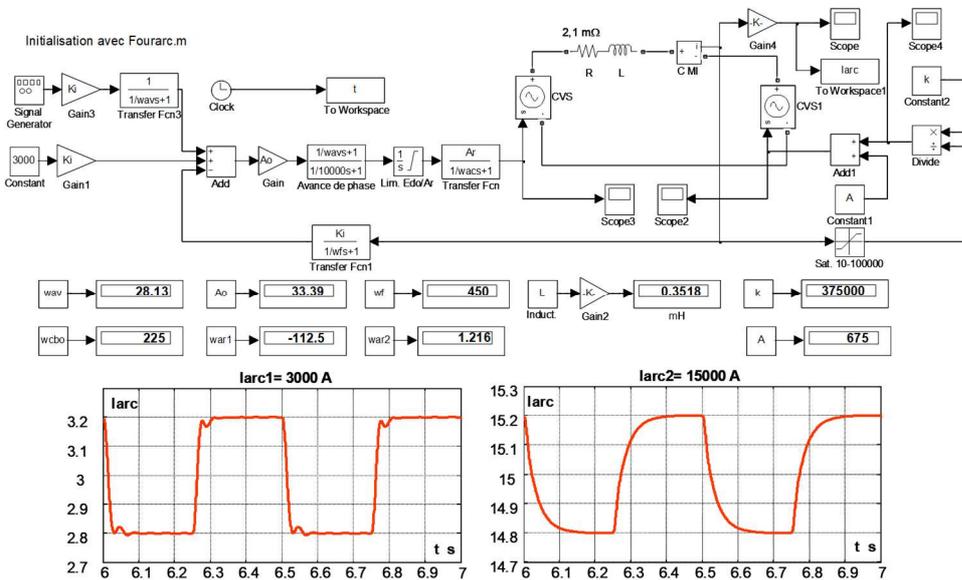


Figure 18 – Mise en place du régulateur – Comportement temporel

La réponse temporelle confirme l’analyse en boucle ouverte, la stabilité pour un courant d’arc faible est limite.

Chaque électrode est alimentée avec deux redresseurs en parallèle, il importe maintenant de mettre

en évidence l'implantation de la structure théorique proposée.

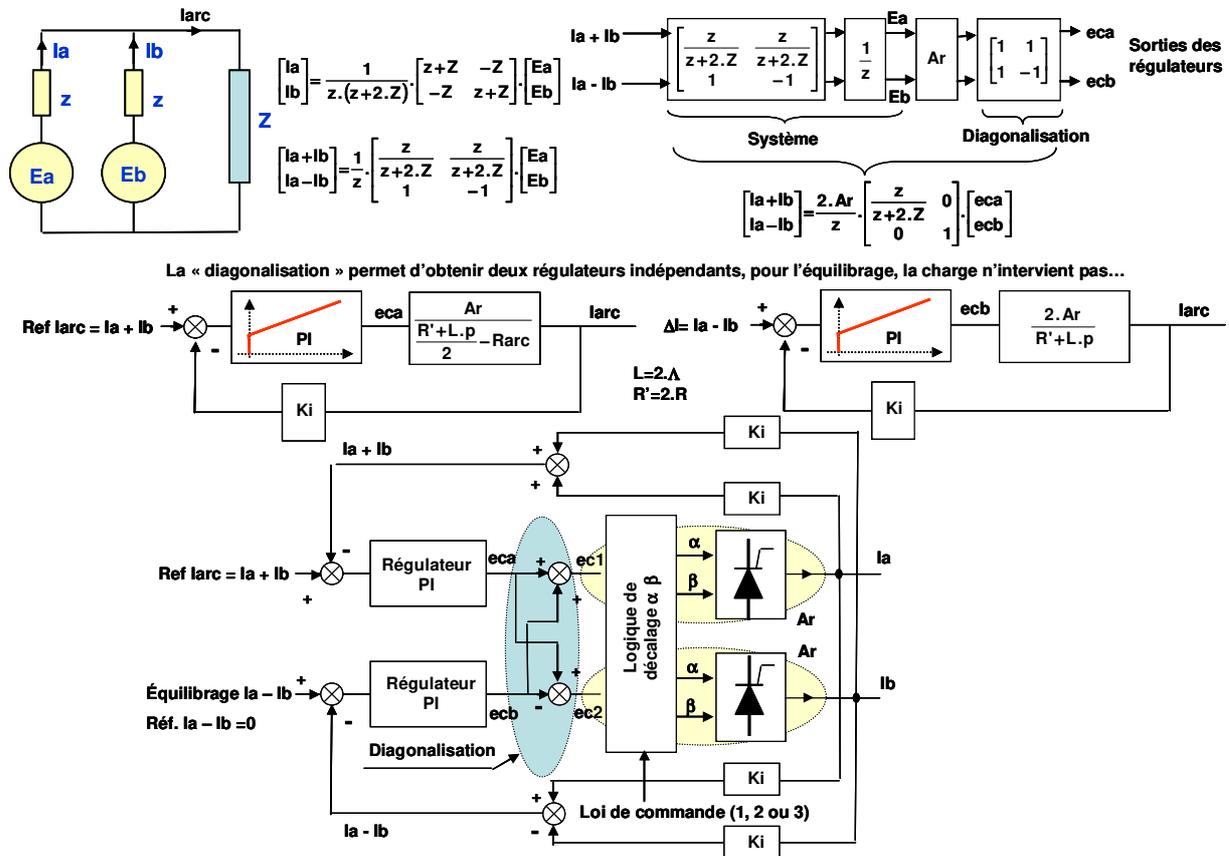


Figure 19 – Implantation du régulateur de courant d'arc dans deux actionneurs en parallèle

La structure dite « diagonalisée » est incontournable... Avec une régulation de courant sur chaque 1/2 groupe la dynamique serait limitée et essentiellement dépendante de l'équilibrage.

Le schéma retenu répond parfaitement aux objectifs fixés, régulation de courant et minimisation des fluctuations de puissance réactive. Cependant, sa mise en œuvre n'est pas aisée...

Nous avons supposé un gain de l'actionneur Ar constant. Il est bien évident, du fait des différents modes de fonctionnement que ce n'est pas le cas, en particulier lors de la conduction des thyristors de roue libre. Donc il est souhaitable de calculer Ar en fonction de  $\alpha, \beta$  et de la conduction des thyristors de roue libre et de corriger Ao en conséquence.

L'inductance L ou  $\Lambda$  est d'autant plus élevée que la résistance dynamique est grande, d'où la nécessité dans certains cas de recourir à des inductances saturables : inductance forte pour les courants faibles et saturée pour les courants élevés. Il est bien clair que Ao devra

évoluer avec la valeur de l'inductance... A partir d'une certaine valeur d'inductance il est indispensable de protéger l'inductance contre les surtensions (rupture du courant d'arc). Pour cela on dispose en parallèle avec chaque inductance un thyristor de roue libre qui s'amorce automatiquement en cas de surtension.

## 9. Conclusions

Les fours à courant alternatif sont majoritairement répandus dans le monde, il existe quelques fours à courant continu qui malgré leurs avantages pour le réseau, surtout quand la puissance de court-circuit est faible, n'ont pas réussi à s'imposer. Les difficultés ne sont pas uniquement électriques, elles touchent également toute l'architecture thermique des fours.

## 10. Bibliographie

[1] ACIERIES – EVOLUTION DES PROCEDES  
– Bernard TRENTINI – Techniques de l’Ingénieur  
M 7 600

[2] ACIERIE ELECTRIQUE – Patricia AYED,  
Claude OUVRADOU, Jacques ASTIER- Techniques  
de l’Ingénieur D 7 700.

[3] CONVERTISSEURS STATIQUES –  
REDUCTION DE LA PUISSANCE REACTIVE ET  
DES HARMONIQUES –Jacques du PARC -  
Techniques de l’Ingénieur D 3 210.

[4] RESEAUX INDUSTRIELS – Correction de la  
puissance réactive et des harmoniques - Jacques du  
PARC - Techniques de l’Ingénieur D 3 215.

[5] LES CONVERTISSEURS DE  
L’ELECTRONIQUE DE PUISSANCE (Conversion  
alternatif – continu) Guy SEGUIER - Lavoisier – Tec  
& Doc 1992.

[6] ETUDE ET MAITRISE DU FLICKER  
ENGENDRE PAR LES FOURS A ARC DE  
SIDERURGIE – Bernard GOLLENTZ – Thèse  
UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE.

[7] FLUCTUATIONS DE TENSION ET FLICKER  
– Parties (1) et (2) – Jacques COURAULT, Guillaume  
de PREVILLE, Jean-Louis SANHET – Techniques de  
l’Ingénieur D 4 315.

## COMMENT ORGANISER UNE FORMATION MATLAB™/SIMULINK

**JULIEN SERRES**

[julien.serres@univ-amu.fr](mailto:julien.serres@univ-amu.fr)

Aix Marseille Univ, CNRS, ISM, Marseille, France

Institut des Sciences du Mouvement – Etienne-Jules Marey, Equipe Biorobotique

CP910 - 163, av. de Luminy

13288 MARSEILLE cedex 09

**Résumé :** Cet article présente un mini-projet de simulation Matlab™/Simulink durant 18 heures de formation destinée à des étudiants en première année d'école d'ingénieurs (niveau bac+3). L'idée est d'introduire l'outil logiciel et les contraintes inhérentes à la simulation telles que nous les rencontrons durant une activité de recherche et développement (R&D). Les mini-projets constituant alors des morceaux de simulation pouvant être contextualisé autour d'une problématique de R&D. L'article développera la pédagogie active mise en place, l'organisation de la formation, et les modalités d'évaluation, pour permettre aux étudiants de devenir autonome à l'issue de leur module ne représentant que 18 heures de formation sur le logiciel expert Matlab™/Simulink.

**Mots clés :** robotique, moteur à courant continu, contrôle moteur, pédagogie active.

### 1. Organisation de la formation

Depuis maintenant 10 ans, j'anime une formation de 18 heures au logiciel Matlab™/Simulink (The MathWorks, [1]) sous forme de mini-projet au sein d'une école d'ingénieur [2]. Le module étant placée au début du cycle de formation de première année, les étudiants ont peu ou pas de connaissance en programmation et le traitement des signaux numériques. J'ai alors dû imaginer une pédagogie plus active pour augmenter l'autonomie et le niveau des étudiants par une formation magistrale réduite, puis complètement décentralisée.

Le module de 18 heures s'organise sous la forme de 6 séances de 3 heures. L'effectif de la promotion de première année est de 72 étudiants, répartis sous forme de 3 groupes de 24 étudiants encadrés par 2 enseignants. Dans le cadre de la virtualisation des logiciels dédiés à la formation et à l'autonomie informatique des étudiants, ces derniers travaillent sur leur propre ordinateur portable durant les séances. Les étudiants sont donc présents dès la première séance avec leur propre ordinateur comprenant tous les logiciels nécessaires à leur formation. Les 6 séances de travail s'organisent de la manière suivante :

#### Séance 1

- présentation des 3 mini-projets de simulation (0h20) comme étant des sous-ensembles d'un projet intégrateur,
- présentation de l'environnement de travail, des boîtes à outil associées du logiciel Matlab, et de la syntaxe du langage Matlab (1h30),
- présentation de la programmation graphique au moyen de l'outil Simulink (1h00),
- présentation des contraintes temporelles de la réalisation du mini-projet et des critères d'évaluation (0h10),

#### Séance 2

Programmation collective sous forme de TD d'une étape de chacun des mini-projets pour améliorer la compréhension de la finalité de chacun des mini-projets et traiter de problèmes de programmation appliqués à un contexte concret (celui de la R&D).

#### Séance 3 à 5

Programmation individuelle sous le logiciel Matlab™/Simulink des mini-projets. Les étudiants avancent à leur rythme, une interaction individuelle ou par petit groupe est privilégiée avec les enseignants sous forme de tutorat.

#### Séance 6

Achèvement de la programmation des mini-projets sous le logiciel Matlab™/Simulink. Présentation par binôme de leur solution de programmation à l'oral durant 7 minutes plus 5 minutes de questions. Suite à cet oral, une première note sur 10 points est établie, complétée par une note de rapport sur 10 points dont la taille maximale est fixée à 6 pages maximum sans les annexes.

#### 1.1. Les 3 sujets de mini-projets

Pour éviter de tomber dans un mode d'enseignement collectif et séquentiel, il n'est apparu indispensable de proposer plusieurs sujets issus de mes travaux de recherche [3]. Pour se faire, je propose 3 sujets aux étudiants, ces derniers s'organisant pour choisir l'un des 3 sujets en fonction de leur centre d'intérêt par binôme. Dans chaque groupe, 8 étudiants travaillent sur le même sujet, et forme ainsi 4 équipes/binômes (à multiplier par 3 car il y a 3 sujets).

Les 3 sujets de mini-projets de simulation sont les suivants :

- **mini-projet 1 :** régulation de vitesse d'un propulseur sans capteur mécanique, ce sujet repose sur les références [4,5],

- **mini-projet 2** : programmation de l'interaction des photodiodes avec un environnement visuel 1D, ce sujet repose sur les références [3,6],
- **mini-projet 3** : capteur de mouvement bio-inspiré, ce sujet repose sur la référence [7] et exploite des signaux réels photorécepteurs issus d'une expérience de R&D.

### 1.2. L'évaluation des mini-projets

Deux items de notation permettent d'évaluer le mini-projet, chacun comptant pour une moitié :

- **Une soutenance orale lors de la dernière séance de projet** : 7 minutes par binôme suivie d'un entretien de 5 minutes permettant de poser quelques questions en lien avec les choix de programmation Matlab™/Simulink des étudiants.
- **La rédaction d'un rapport de 6 pages** (sans les éventuelles annexes) par binôme permettant d'évaluer la capacité des étudiants à produire des résultats de manière synthétique, notamment par la confection de figures à partir du logiciel Matlab™. Les étudiants élève-ingénieur ayant un niveau de compétences en langue anglaise proche du niveau européen B2, depuis l'année dernière, je demande à ce que leur rapport soit rédigé en anglais.

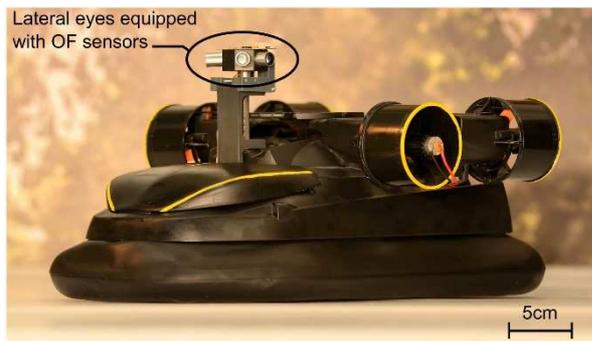


Figure 1. Robot LORA (taille : 0,36x0,21x0,17 m, masse : 878 g). Le robot est équipé de deux packs d'accumulateurs lithium polymère distincts : un pack faible puissance 7,2 V – 360 mAh ; taille 54x31x7 mm ; masse 20 g pour l'électronique, et un pack de forte puissance 7,2 V - 2200 mAh ; 21x33x96 mm, masse 112 g pour la propulsion procurant au robot une autonomie de 10 minutes [10,11]. Le robot est équipé de petits yeux relié à des capteurs de mouvement bio-inspirés, une partie du traitement de l'information visuelle pour extraire l'information de mouvement, appelé flux optique, est abordée dans les deux autres mini-projets.

## 2. Objectifs d'un des 3 mini-projets

### 2.1. Description du projet « sensorless »

Les mini-robots autonomes (Fig. 1) puisent l'énergie électrique pour se propulser dans des batteries de type lithium polymère [8]. Au cours de leur utilisation et de leur vieillissement [9], on observe une chute progressive de la tension batterie, posant ainsi un problème majeur pour stabiliser le contrôle moteur de ces mini-robots. Une solution simple consisterait à mettre en place une carte de régulation pour stabiliser la tension

d'alimentation du système de propulsion, néanmoins cette solution a été écartée compte tenu des contraintes de masse et d'encombrement de la microrobotique, d'autant plus importante en microrobotique aérienne. ce mini-projet appelé « sensorless » propose de montrer aux étudiants que l'on peut supprimer cet étage de régulation de tension pour venir piloter la vitesse de rotation d'un micromoteur à courant continu sans avoir recours à une régulation de tension ni à la mise en place d'un capteur de rotation de l'arbre moteur.

L'objectif du ce mini-projet est de développer sous le logiciel Matlab™/Simulink un régulateur de vitesse sans capteur physique de vitesse de rotation (dit « sensorless » en anglais), par estimation de la vitesse de rotation de l'hélice du propulseur (Fig. 2) à partir de la mesure conjointe du courant et de la tension d'induit. Cela permet ainsi de s'affranchir de la chute progressive de la tension batterie, tout en évitant un régulateur de tension, ce qui alourdirait le robot.



Figure 2. Propulseur GWS™ de type EDF50 équipé d'un micromoteur à courant continu de référence CN12-RXC. Ce propulseur est capable de développer une poussée de 72 g sous 7,2 V.

### 2.2. Observations expérimentales

Lors de son fonctionnement, le mini-robot (Fig. 1) consomme un courant important faisant chuter la tension de la batterie de 8,2 V à 6,9 V en ~10 minutes (durée que l'on placera à 5 secondes pour les tests en simulation) affectant ainsi la vitesse de rotation des 4 propulseurs équipant le robot (Fig. 2). Des mesures expérimentales sur le micromoteur à courant continu ont permis d'établir que :

- sa résistance d'induit :  $R_m = 1 \Omega$ ,
- sa constante de temps électrique :  $\tau_e = L_m/R_m = 2 \text{ ms}$ ,
- sa constante de temps électromécanique :  $\tau_{em} = J_m \cdot R_m / (f \cdot R_m + K_m^2) = 23,5 \text{ ms}$  permettant d'obtenir un temps de montée proche des 52 ms comme observé lors des essais de mesure [5],
- sa constante de couplage électromécanique :  $K_m = 2,70 \cdot 10^{-3} \text{ V/(rad/s)}$
- sous tension d'alimentation maximale 7,2 V, le micromoteur consomme 3,4 A.
- le couple de frottement sec  $T_r$  est nul. Le couple de charge est modélisé par un frottement visqueux. Le coefficient de frottement visqueux est évalué à  $f = 6,52 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$ .

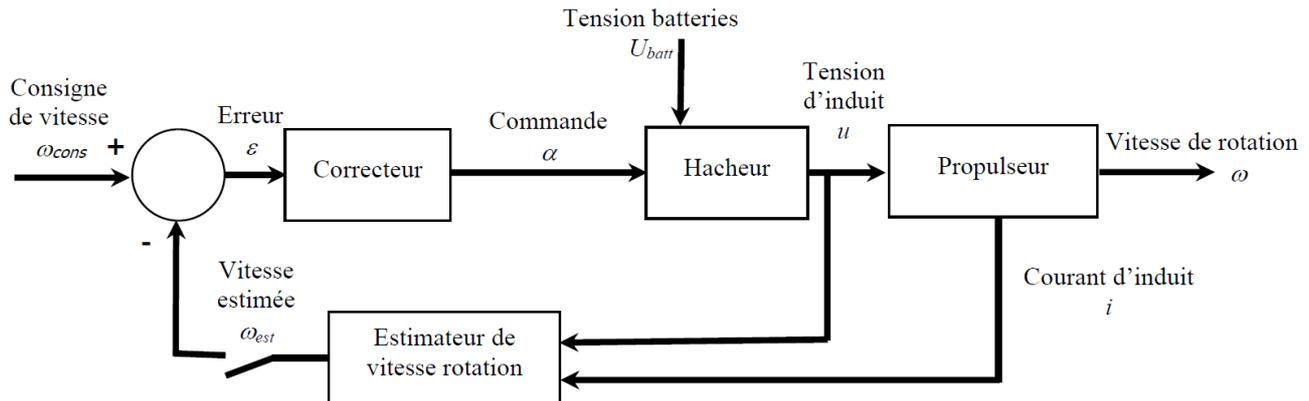


Figure 3. Schéma bloc de la simulation numérique pour réguler la vitesse de rotation d'une hélice sans capteur optique, ni magnétique, ni électromécanique. Cette boucle de régulation est dite sans capteur ou « sensorless ». L'ouverture et la fermeture permet dans un premier temps de valider le fonctionnement du bloc « estimateur de vitesse de rotation », puis dans un second temps, en position fermée de régler le correcteur PI (Proportionnel-Intégral).

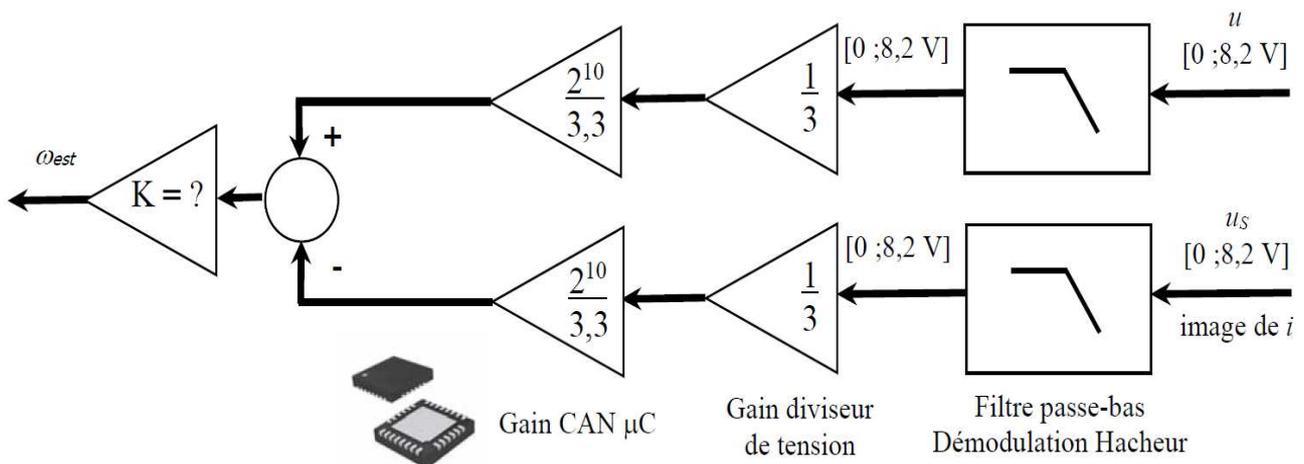


Figure 4. Chaîne de traitement de l'estimateur de vitesse de rotation à partir de la mesure des tensions  $u$  et  $u_s$  via trois potentiels électriques issus des entrées CAN du microcontrôleur de type dsPIC. La référence du dsPIC est un microcontrôleur dsPIC30F2010 de Microchip® au format QFN de 28 pins (6x6 mm ; 20 MHz ; 3,3 V). La tension  $u_s$  représente la tension shunt aux bornes d'une résistance  $R_s$  montée en série avec le moteur, la tension  $u_s$  est donc directement une tension image du courant d'induit  $i$ . Dans [4,5], on montre que l'estimateur fonctionne de manière optimale lorsque  $R_s$  est égale à la résistance d'induit  $R_m$ . Le gain  $K$  est un gain à faire régler par les étudiants ainsi que la fréquence de coupure du filtre passe-bas du premier ordre incarné physiquement par un circuit RC [4,5].

### 2.3. Cinq étapes pour réaliser son projet

Chaque mini-projet est décomposé sous la forme de 5 grandes étapes pour permettre à l'étudiant de mener à bout sa simulation. Chaque étape nécessitant des efforts d'abstraction pour bien régler tous les paramètres inhérents à une simulation numérique.

1) Dédire des données expérimentales les paramètres électriques et mécaniques du moteur, pour cela vous utiliserez un fichier Matlab que vous exécuterez avant la simulation. Modéliser par un schéma Simulink (à temps continu le moteur à courant continu équipant les propulseurs du robot en utilisant les fonctions de transfert analogique en «  $s$  » ; la variable de Laplace étant «  $s$  » en anglais au lieu de «  $p$  » en français).

2) En utilisant le schéma Simulink (Fig. 3) : réglez, puis testez le bon fonctionnement du moteur à courant

continu associé à son hacheur. Vous complétez les blocs de simulation (Fig. 3) dans le but d'obtenir une fréquence de fonctionnement du hacheur de 10 kHz (à ajuster dans l'onglet Simulation → Configuration Parameters) et une précision de calculs sur la variable représentant le rapport cyclique  $\alpha$  à 1% pilotant le micromoteur, sachant que  $\alpha \in [1\% ; 100\%]$ . La rampe de décroissance de la tension batterie est à paramétrer en fonction du cahier des charges. Dans cette étape, vous programmerez dans un premier temps la boucle de régulation en boucle ouverte pour valider le bloc « estimation de vitesse de rotation » sur la Fig. 3.

La tension d'alimentation du microcontrôleur dsPIC étant de 3,3 V, alors que la tension d'alimentation  $U_{batt}$  est au maximum de 8,2 V, les deux tensions représentant la tension et le courant d'induit sont divisées par un facteur 3 au moyen d'un diviseur de tension avant numérisation par les CAN<sup>1</sup> du microcontrôleur (Fig. 4).

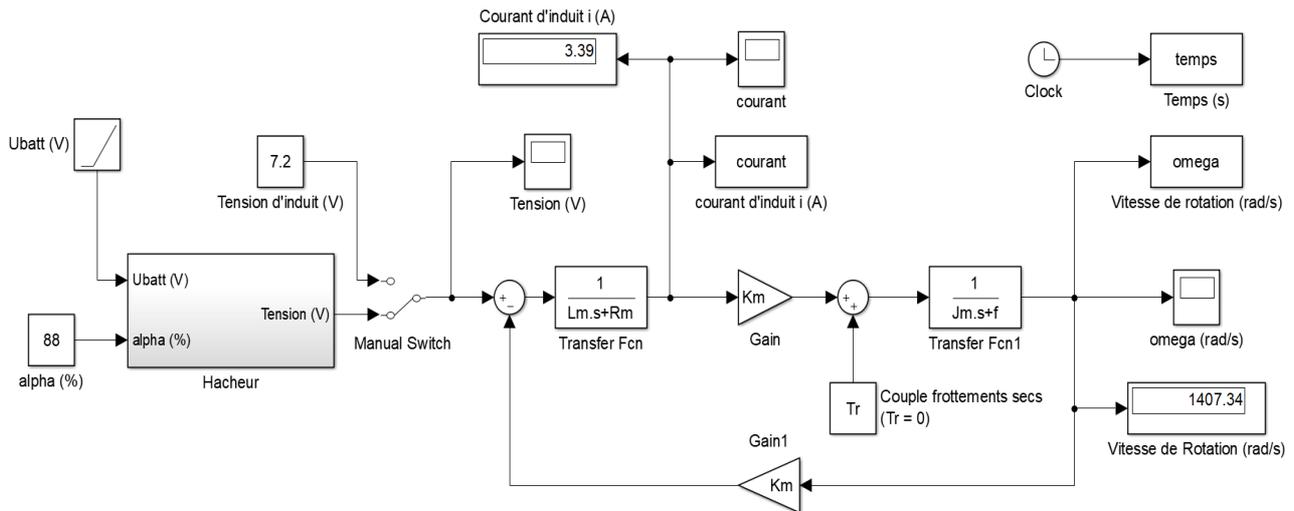


Figure 5. Schéma Simulink du bloc Propulseur (Fig. 1) couplé au bloc Hacheur détaillé sur la Fig. 6. Les paramètres du modèle dynamique du moteur à courant continu sont :  $L_m = 2\text{mH}$  ;  $R_m = 1\Omega$  ;  $J_m = 3,25 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  ;  $f = 6,52 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$  ;  $K_m = 2,70 \cdot 10^{-3} \text{ V}/(\text{rad/s})$ .

3) Développer une boucle de régulation de vitesse par estimation de la vitesse de rotation (Fig. 3) en complétant votre schéma Simulink construit lors des étapes 1) et 2). Pour simuler le système Hacheur+Propulseur, nous imposerons une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz, donc cette fréquence est à configurer dans les paramètres de Simulink. La boucle de régulation, quant à elle, fonctionnera à 1 kHz. Pour cela, vous utiliserez des blocs « Rate Transition » et ajusterez manuellement à 1 kHz les blocs de la boucle travaillant à cette fréquence.

Pour déterminer la valeur du gain  $K$  de l'estimateur de vitesse :

- on placera le système en boucle ouverte (interrupteur ouvert sur Fig. 3)
- on commandera le hacheur avec  $\alpha = 50\%$  pour se placer au milieu de la gamme de commande car l'estimateur de vitesse n'est pas parfaitement linéaire.
- on ajustera ensuite la valeur du gain  $K$  manuellement pour rechercher  $\omega = \omega_{est}$  en régime permanent.

4) Ajuster les paramètres de votre régulateur numérique PI (à temps discret, donc en « z ») compatible avec la programmation d'un microcontrôleur de type dsPIC de Microchip© dont les caractéristiques utiles sont les suivantes :

- Tension d'alimentation 3,3 V,
- CAN<sup>1</sup> de résolution 10 bits,
- fréquence d'échantillonnage des CAN 1 kHz,
- Calculs effectués en nombres entiers 16 bits,
- périphérique de sortie contrôle moteur MLI<sup>2</sup> (« output compare ») : 10 kHz

Pour cela, il faut boucler la chaîne de retour et maintenir la chaîne de commande du hacheur ouverte en commandant le hacheur toujours avec  $\alpha = 50\%$  pour

chercher à faire tendre vers 0 la sortie du correcteur PI dont la plage de valeur en sortie sera calibrée entre 0 et 100 pour être compatible avec la commande du hacheur avec une précision de 1%, puis de la saturer au moyen d'un bloc car la commande du hacheur ne peut pas être physiquement supérieure à 100%.

5) Tester, en simulation, la robustesse de la boucle de régulation numérique « sensorless » lorsque la tension de la batterie chute au cours du temps. Pour valider votre simulation et réduire le temps de simulation, on fera chuter linéairement la tension batterie en 5 s au lieu de 15 min. Il vous appartiendra de représenter vos résultats de simulation en utilisant les fonctions graphiques du logiciel Matlab (plot, subplot...).

### 3. Résultats attendus par étape

#### 3.1. l'étape Propulseur

Le modèle dynamique du moteur à courant continu est bien décrit dans [5,12]. Toutes les équations électriques et mécaniques sont représentées sous forme de fonction de transfert dans le domaine de Laplace (Fig. 5). Lorsque le moteur est alimenté sous tension maximale 7,2 V (ou bien avec un rapport cyclique  $\alpha = 88\%$  via le hacheur), le micromoteur consomme bien 3,4 A avec un temps de montée  $t_m$  de 52 ms (i.e.,  $t_m = 2,2 \cdot \tau_m$ ).

#### 3.2. l'étape Hacheur

La manière de plus simple de programmer un hacheur sous Simulink est représenté sur la Fig. 6. Le bloc « Repeating Sequence » permet de programmer la modulante à  $f_H = 10 \text{ kHz}$ , pour se faire il faut régler le paramètre « Times values » à  $[0 \text{ } 1\text{e-}4]$  correspondant à la période souhaitée du signal triangulaire exprimée en

<sup>1</sup> CAN = Convertisseur Analogique / Numérique

<sup>2</sup> MLI = Modulation en Largeur d'Impulsions

secondes, et le paramètre « Output values » à [1 100], correspondant à une gamme de 100 valeurs de rapport cyclique  $\alpha$ . Ensuite, on souhaite obtenir une précision de 1% sur le calcul du rapport cyclique. Il faut alors considérer 100 points de calcul par période pour positionner le rapport cyclique  $\alpha$  à 1% près. Cela revient donc à diviser par 100 la fréquence de la modulante  $f_H$ . Pour se faire, il faut ajuster le Solver de Simulink (onglet Simulation → Configuration Parameters) :

- Type : fixed-step, i.e., simulation à pas fixe,
- Solver : ode1 (Euler), i.e., déclare la méthode d'Euler pour numériser les équations déclarées à temps continu, notamment représentées par les fonctions de transfert représentées dans le domaine de Laplace pour le propulseur,
- Fixed-step size : 1e-6, i.e., 1  $\mu$ s pour le pas de calcul fondamental qui sera le plus petit pas de calcul envisageable dans cette simulation numérique.

Enfin la batterie est représentée par une fonction « Ramp » de coefficient directeur -0,26 V/s et d'ordonnée à l'origine de 8,2 V pour répondre au modèle de décroissance de la batterie durant les 5 secondes de simulation.

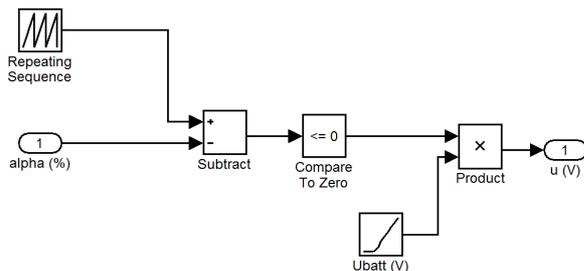


Figure 6. Schéma Simulink modélisant le hacheur.

### 3.3. l'étage Estimateur

L'estimateur de vitesse de rotation dit « sensorless » ou en « U - R·I » comprend tout d'abord un filtre passe-bas analogique de Butterworth du 1<sup>er</sup> ordre pour filtrer les harmoniques générées par le hacheur afin de ne conserver que la valeur moyenne des potentiels électriques liés à  $u$  et  $u_S$  (Fig. 4, Fig. 7a). En choisissant une fréquence de coupure  $f_C = 100$  Hz pour éliminer la modulante du hacheur à  $f_H = 10$  kHz, nous obtenons une estimation peu bruitée et faiblement déphasée par rapport à la vitesse de rotation réelle de l'hélice (Fig. 7b). Il s'en suit un gain diviseur de tension d'une valeur de 1/3, car le microcontrôleur dsPIC possède une plage de mesure de tension allant jusqu'à 3,3 V correspondant à sa tension d'alimentation, alors que les tensions d'induit  $u$  et de shunt  $u_S$  varient entre 0 V et 8,2 V. Enfin on place un gain modélisant le CAN 10 bits d'une valeur  $2^{10}/3,3$  ; suivi d'un bloc « Rate Transition » permettant d'échantillonner les signaux analogiques (en noir sur la Fig. 7a) à une fréquence de 1 kHz correspondant à la fréquence de travail du microcontrôleur (en vert sur la Fig. 7a). On peut observer l'effet de l'échantillonnage et de la quantification sur l'estimée de la vitesse de rotation (Fig. 7b). En boucle ouverte, le gain  $K$  (Fig. 4, Fig. 7a) en sortie du soustracteur est ajusté de telle sorte que l'on

obtienne une vitesse de rotation estimée en régime permanent identique à celle obtenue en sortie du bloc « Propulseur » (i.e., vitesse de rotation réelle).

Pour  $\alpha = 50\%$  (car l'estimateur de vitesse de rotation n'est pas parfaitement linéaire, certains étudiants proposent de mettre en œuvre une table de correspondance entre la valeur de  $\alpha$  et le gain  $K$  pour rendre linéaire l'estimateur), le meilleur réglage est  $K=3,7$  (Fig. 7b). Le profil de l'hélice (Fig. 2) étant asymétrique, l'estimateur ne fonctionne que pour des vitesses positives. Le gain  $K$  est ajusté pour la valeur numérique de l'entier positif représentant la vitesse de rotation estimée corresponde à la vitesse réelle exprimée en rad/s.

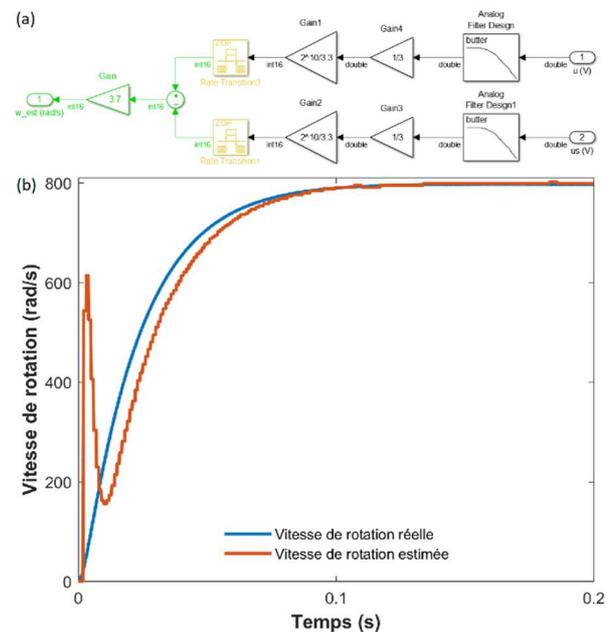


Figure 7. (a) Schéma Simulink de l'estimateur. (b) Comparaison entre les vitesses de rotation réelle et estimée permettant de régler le gain de l'estimateur  $K$  sur la Fig. 4.

### 3.4. l'étage Correcteur

Un correcteur numérique PI (Proportionnel-Intégral) mixte est introduit dans la boucle de par sa simplicité de réglage (Fig. 8a), uniquement un gain proportionnel  $K_P$  sera réglé pour calculer le rapport cyclique commandant le hacheur. Le critère retenu pour le réglage du correcteur est libre, mais il est proposé de régler pour obtenir un amortissement de 0,5 correspondant à une seule oscillation de la vitesse de rotation. Cela revient à régler le premier dépassement de la vitesse de rotation à 15% de la consigne de vitesse. Pour une consigne de vitesse de 1000 rad/s (Fig. 8a), on règle le gain  $K_P$  dans le gain représentant la fonction de transfert du correcteur PI pour atteindre l'objectif de réglage. La valeur de 0,0021 pour  $K_P$  permet d'obtenir un dépassement de la vitesse de rotation limité à 15 % de la valeur finale (soit 1150 rad/s, Fig. 8b).



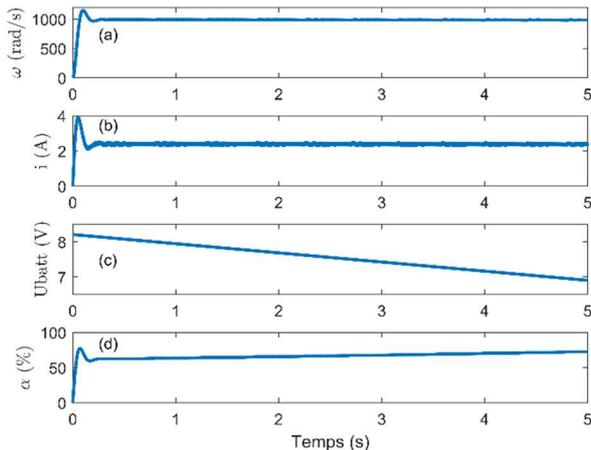


Figure 10. (a) Vitesse de rotation  $\omega$  en fonction du temps. (b) Courant d'induit  $i$  en fonction du temps. (c) Tension batterie  $U_{\text{batt}}$  en fonction du temps qui passe de 8,2 V à 6,9 V en 5 secondes. (d) Rapport cyclique  $\alpha$  commandant le hacheur.

## 4. Conclusions

### 4.1. Facilité la synthèse de correcteur

L'utilisation de logiciel Matlab™/Simulink permet de simuler tout procédé de commande par ordinateur en respectant les contraintes inhérentes à l'échantillonnage (cadence des calculs) et à la quantification (format des données). Simuler de telles contraintes permet d'ajuster des correcteurs numériques sans pour autant faire appel à la synthèse de filtres numériques dont la démarche est parfois bien trop théorique en début de formation d'un cycle ingénieur ou premier cycle universitaire. La simulation Matlab™/Simulink est alors utile pour régler des correcteurs. Dans bien des situations d'apprentissage, les étudiants doivent retranscrire le correcteur optimisé sous une autre forme (analogique, numérique, ou bien d'autres langages de programmation), ce qui pénalise l'intérêt de la simulation Matlab™/Simulink, alors même que son intérêt réside dans la diminution du temps de mise en œuvre de la loi de commande sur le ordinateur.

### 4.2. Passerelle Matlab™/Simulink – Cible matérielle

Une boîte à outils « Simulink – Embedded Target for PIC » [13] permet alors de programmer directement une cible matérielle de Microchip© à partir d'un schéma Simulink [5] lorsqu'on souhaite travailler sur un système embarqué. La simulation Matlab™/Simulink peut aussi être directement couplée à une carte E/S dSPACE en utilisant la boîte à outils « Real-Time Interface » [14]. Les correcteurs numériques optimisés sous Matlab™/Simulink peuvent aussi être mis en œuvre à l'aide du logiciel LabVIEW et d'une carte E/S NI-DAQ USB 6009 [15], ce qui revêt une solution bien moins onéreuse qu'une carte E/S dSPACE couplée au logiciel ControlDesk©. Aujourd'hui, de multiples solutions existent pour programmer une cible matérielle

directement à partir d'une simulation Matlab™/Simulink.

### 4.3. Intérêt pédagogique

En termes de formation logicielle, il m'apparaît aujourd'hui essentiel de former les étudiants à des logiciels experts dans le cadre de projets où le logiciel expert est utilisé comme un outil permettant de mener à bien un projet, et non une juxtaposition d'exercices de programmation. Sa prise en main devant se résumer qu'à quelques heures de formation pour comprendre l'environnement logiciel et la syntaxe. En effet, la disponibilité massive d'information sur un logiciel expert (Internet, Wiki, Blogs, Documentation en ligne) rend aujourd'hui complètement caduc l'enseignement de tels contenus. Cette pédagogie active fixe des objectifs en termes de maîtrise logicielle à travers les différentes étapes de développement du projet de simulation, ce qui implique davantage les étudiants dans leur projet et libère leur créativité. La production étudiante est alors plus importante hors temps scolaire, ce qui permet pendant le temps de formation d'avoir un rôle de tuteur pour guider les choix des étudiants. Une restitution sous la forme d'un court rapport de 6 pages couplé à un court oral de 12 minutes durant la dernière séance, s'avère être très pertinent pour valider le niveau de maîtrise logicielle des étudiants lors de la démonstration de leur simulation.

### 4.4. Perspectives

En termes de continuité pédagogique, les micromoteurs à courant continu sont aujourd'hui omniprésents en microrobotique aérienne (Fig. 11), on peut citer par exemple le micro quadricoptère Craziflie 2.0 pesant seulement 27 grammes pour une autonomie de vol de 7 minutes [16]. Dans sa version commerciale, la chute de tension batterie n'est pas compensée au cours de son vol, limitant ainsi son autonomie de vol, le but de ce nouveau projet serait donc d'intégrer quatre contrôleurs « sensorless » à bord du Craziflie 2.0 (Fig. 10) pour venir accroître son autonomie de vol. A cet effet, il a été démontré qu'une paire de contrôleur



Figure 11. Quadricoptère Craziflie 2.0 équipé de quatre micromoteurs à courant continu [16]. Dans sa version commerciale, la chute de tension batterie n'est pas compensée au cours du vol, limitant ainsi son vol à seulement 7 minutes.

« sensorless » pèse seulement 1 g pour une taille de 13x15 mm, et peut fournir un courant maximal de 2 A sous 8 V [4,5], ce qui est compatible avec les micromoteurs à bord du Crazyflie 2.0, qui consomme unitairement 1 A sous 4,2 V. En ajoutant deux paires de contrôleur « sensorless » à bord du Crazyflie 2.0, cela

représenterait alors une masse supplémentaire de seulement 2 g, alors que le Crazyflie 2.0 peut porter une charge utile allant jusqu'à 15 g. La mise en œuvre de ce type de projet permettrait alors de démontrer toute la potentialité du prototype rapide sous le logiciel Matlab™/Simulink.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] <https://fr.mathworks.com/>
- [2] <http://www.mines-stetienne.fr/fr/ISMIN>
- [3] Serres J., "De l'abeille au robot : la régulation du flux optique - Contrôle conjoint de vitesse et d'évitements » d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés", Thèse de doctorat, Université de Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2008. Ref. HAL : tel-00645272
- [4] Viollet S., Kerhuel L., Franceschini N., "A 1-gram dual sensorless speed governor for micro-air-vehicles", Proc. of the 16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Ajaccio, France, June 25-27, 2008.
- [5] Serres J., Viollet S., Kerhuel L., Franceschini N., "Régulation de vitesse d'un micromoteur à courant continu sans capteur au moyen d'un microcontrôleur dsPIC programmé par une passerelle Matlab™/Simulink", La Revue 3EI, No 56, pp. 66-74, Mars 2009. Ref. HAL : hal-01848804.
- [6] Ruffier, F., "Pilote automatique biomimétique - Système générique inspiré du contrôle visuo-moteur des insectes pour : le décollage, le suivi de terrain, la réaction au vent et l'atterrissage automatiques d'un micro-aéronef", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004. Ref. HAL: tel-00696454.
- [7] Expert F., Viollet S., Ruffier F., "Outdoor Field Performances of Insect-Based Visual Motion Sensors", Journal of Field Robotics, Vol 29, No 4, pp. 529-541, 2011. Ref. HAL : hal-00712699.
- [8] Broussely M., "Les accumulateurs lithium-ion, état de l'art", La Revue 3EI, No 48, pp. 36-45, Mars 2007.
- [9] Pelissier S., "Introduction au vieillissement des batteries lithium-ion et aux protocoles expérimentaux de test de durée de vie", La Revue 3EI, No 68, pp. 17-22, Avril 2012.
- [10] Roubieu F. L., Serres J., Franceschini N., Ruffier F., Viollet S., "A fully-autonomous hovercraft inspired by bees: wall following and speed control in straight and tapered corridors", Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) 2012, Guangzhou, China, pp. 1311-1318. Ref. HAL : hal-00743129.
- [11] Roubieu F. L., Serres J. R., Colonnier F., N Franceschini N., Viollet S., Ruffier F., "A biomimetic vision-based hovercraft accounts for bees' complex behaviour in various corridors", Bioinspiration & Biomimetics, Vol 9, No 3, 036003. Ref. HAL : hal-01446797.
- [12] Roussel J-M., Rebeix P., Emile B., "Régulation de vitesse d'un moteur à courant continu alimenté par un variateur industriel DMV2342", La Revue 3EI, No 68, pp. 46-50, Avril 2012.
- [13] Simulink toolbox - Embedded Target for PIC : [http://www.kerhuel.eu/wiki/Simulink - Embedded Target for PIC](http://www.kerhuel.eu/wiki/Simulink_-_Embedded_Target_for_PIC)
- [14] Roussel J-M., Emile B., Perronnin E., "Identification et régulation d'une alimentation à découpage forward dans l'environnement Matlab/Simulink/dSPACE", La Revue 3EI, No 72, pp. 59-64, Avril 2013.
- [15] Ilary J-P., Le Gall F., "Séance d'essais systèmes en BTS électrotechnique sur le thème « Asservissement & Labview d'une MCC »", La Revue 3EI, No 80, pp. 43-46, Avril 2015.
- [16] Micro quadrirotor Crazyflie 2.0, coût unitaire 210€ <https://store.bitcraze.io/collections/kits/products/crazyflie-2-0>

## Quel paradigme pour les réseaux électriques intelligents ?

VINCENT MAZAURIC, VERONIQUE BOUTIN ET ALFREDO SAMPERIO, CLAUDE LE PAPE-GARDEUX  
Schneider Digital, 38TEC, 38050 – Grenoble France

**Résumé :** *Introduire de l'intelligence dans les systèmes électriques ne relève pas d'une ambition récente. Dès que les régies d'électricité se sont constituées, sur une base historiquement centralisée, et ont été tenues de garantir une certaine qualité de service à l'utilisateur, elles ont conduit à déployer les premiers éléments de la gestion intelligente de la demande. Il s'agissait d'équilibrer les usages au mieux des prévisions de consommation et de les adapter aux caractéristiques techniques des groupes de génération. En ce qui concerne le déploiement des énergies renouvelables, la gestion des systèmes électriques ne nécessite plus d'aplatir la courbe de charge, mais au contraire d'adapter au mieux les usages pour suivre l'abondance de productible. Les réseaux électriques intelligents procurent un chemin technologique pour transformer les systèmes électriques depuis une structure fortement centralisée vers une organisation multi-échelle où chaque « cluster » satisfait au mieux son équilibre offre-demande.*

### 1. L'intelligence dans les réseaux électriques : des motivations contrastées au fil du temps !

Introduire de l'intelligence dans les systèmes électriques ne relève pas d'une ambition récente. Dès que les régies d'électricité se sont constituées, sur une base historiquement centralisée, et ont été tenues de garantir une certaine qualité de service à l'utilisateur à commencer par la disponibilité, la recherche d'un optimum économique et l'équilibrage entre phases ont conduit à déployer les premiers éléments de la gestion intelligente de la demande. Les concepts de foisonnement et de report de charge ont alors été introduits : Il s'agissait d'équilibrer les usages au mieux des prévisions de consommation et de les adapter aux caractéristiques techniques des groupes de génération (essentiellement thermiques ou hydrauliques) constituant le parc exploité par les régies, au mieux de leurs optimums économiques par ailleurs conditionnés par des tarifs le plus souvent régulés, c'est-à-dire en privilégiant la production en base.

Depuis la fin des années 1990, la contrainte climatique a fortement renouvelé le besoin de développer des réseaux électriques intelligents. En effet, l'exploitation des systèmes électriques, dont la croissance est plus soutenue que celle des autres vecteurs d'énergie, est à l'origine de 45% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> en dépit d'une tendance vertueuse vers la réversibilité thermodynamique. L'efficacité énergétique fut ainsi perçue comme le premier gisement d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> – les « négawatts » – et le plus immédiat à mettre en œuvre compte tenu de la durée des cycles d'investissement en génération. Selon une logique de régie intégrée centralisée, les réseaux électriques intelligents devaient :

- accompagner la plus grande versatilité des usages, notamment les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), mais au-delà permettre d'aplatir la courbe de charge pour limiter les appels à la génération de pointe, la plus onéreuse à exploiter et souvent la plus émettrice en CO<sub>2</sub> ;

- favoriser l'intégration d'énergies renouvelables, en pratique largement décentralisées sur les réseaux de distribution.

Au-delà de leurs fonctions de facturation, les compteurs intelligents contribuent à cette double motivation. Par contre, ils ne disposent pas de capacité d'arbitrage en « temps réel » au regard des contraintes d'exploitation. Néanmoins, en permettant d'individualiser l'offre de service, différentes qualités de fourniture peuvent coexister sur un même réseau, ce qui constitue un premier levier de transformation des systèmes électriques.

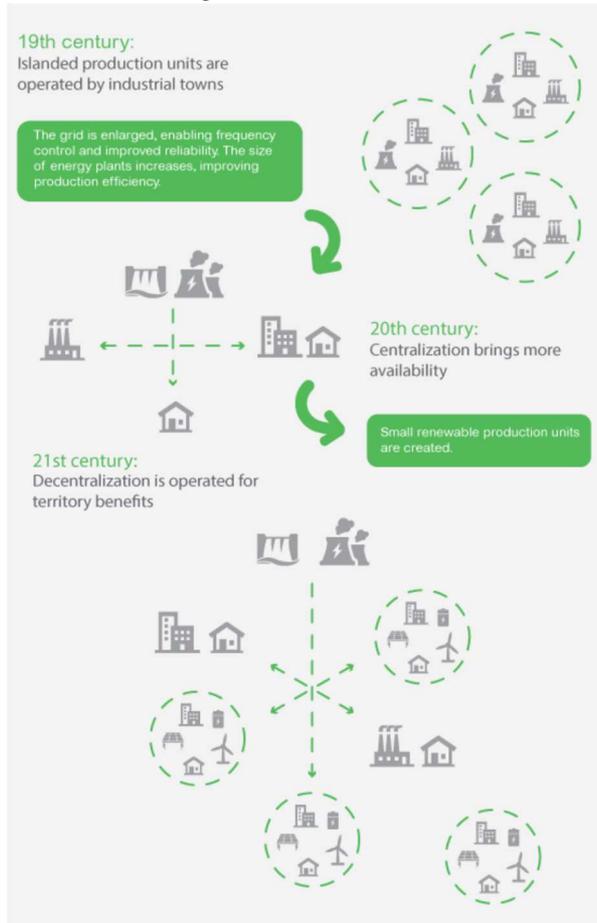
A côté de ces motivations techniques, le secteur de l'énergie électrique traverse depuis plus d'une vingtaine d'années des politiques de dérégulation qui ont provoqué l'éclatement des monopoles historiques au moins dans leur dimension verticale entre génération, transport et distribution. Des nouveaux acteurs de l'énergie comme du traitement des données ou de leur transmission peuvent donc se positionner pour capter une partie de la valeur résultant de la convergence de l'énergie et des données.

Historiquement du côté de la génération centralisée dans un secteur fortement régulé, le centre de gravité des systèmes électriques « descend » peu à peu par l'intégration d'une plus forte intelligence du côté de la demande. Cette tendance :

- incitée par des politiques publiques soucieuses de ne plus supporter seules l'investissement en capacité susceptible d'équilibrer la demande, comme ce fût le cas dans les cycles de planification précédents ;
- accentuée naturellement par l'émergence d'une forte proportion d'énergie renouvelable décentralisée (PV, voire éolien, micro-hydroélectricité...), le plus souvent intermittente, également supposée contribuer favorablement à la transition énergétique ;

élargit le champ de l'intelligence à la gestion d'une auto-consommation possiblement soustraite à la génération

donc susceptible d'amplifier les effets de l'intermittence pour l'opérateur en charge de l'équilibre du réseau. Elle conduit à l'émergence de nouvelles fonctions de flexibilité comme le stockage de l'énergie localement (batterie, y compris celles des véhicules électriques) ou à plus grande échelle (pompage/turbinage, stockage à air comprimé, power to X/X to power...) renforçant dans ce dernier cas l'intégration multisectorielle dans le domaine de l'énergie.



En ce qui concerne le déploiement des énergies renouvelables requis par les engagements climatiques, la gestion des systèmes électriques ne nécessite plus d'aplatir la courbe de charge, mais au contraire d'adapter au mieux les usages pour suivre l'abondance de productible afin d'anticiper les effets de la génération à coût marginal nul voire négatif. La recherche de gisements de flexibilité est alors déterminante et conduit à l'émergence de nouveaux acteurs dans la gestion des systèmes électriques.

D'une logique stricte d'exploitation, la notion de réseau électrique intelligent modifie en profondeur la conception des systèmes électriques, les modes d'usage, la répartition de la valeur et les modèles d'affaire... Cette évolution s'exprime dans une pluralité d'arbitrage entre :

- disponibilité et gestion de la demande/incitation ;
- architectures centralisée et décentralisée ;
- organisation intégrée et multiplicité des acteurs et des secteurs ;
- aplatissage de la courbe de charge et gisement de flexibilité ;
- énergie et données ;
- politiques d'investissement publiques/monopoles historiques et initiatives locales/privées ;
- coût moyen et coût marginal ;
- ...

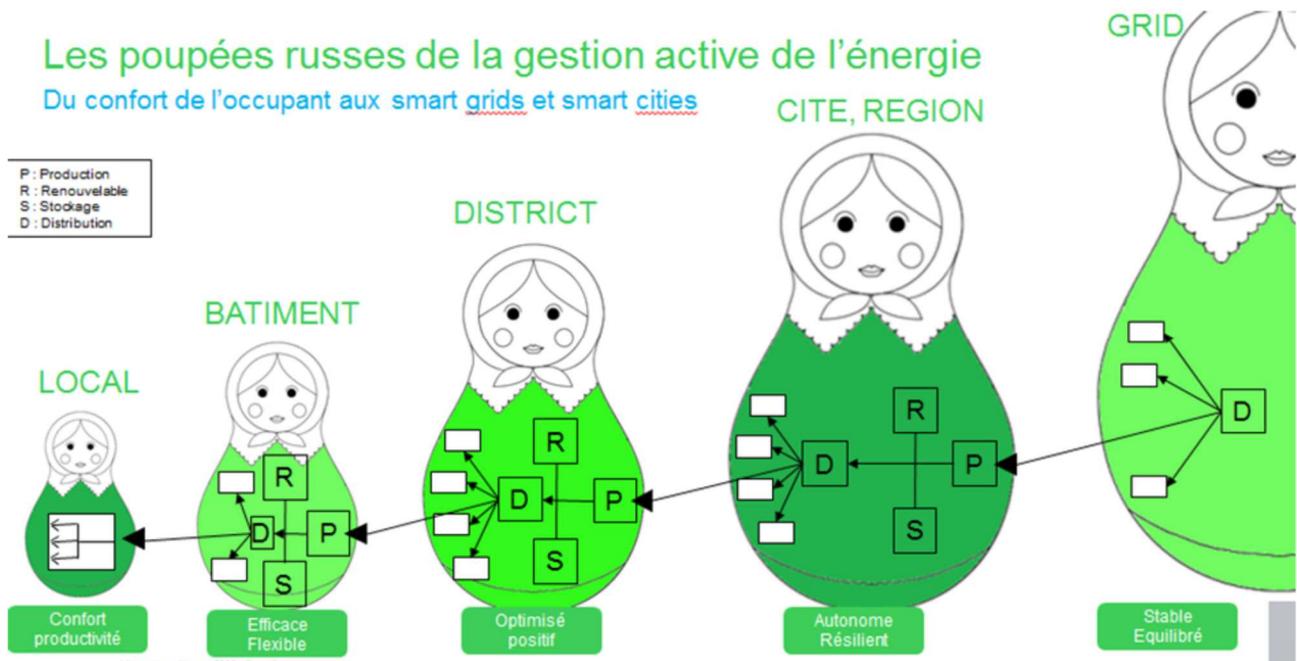
envisageable grâce :

- à des temps caractéristiques d'opération des systèmes électriques du même ordre de grandeur que ceux de l'acquisition (IoT) et du traitement des données à l'échelle du système (Big Data) puis de son contrôle optimal ; et
- à des coûts raisonnables, c'est-à-dire comparables au coût marginal de l'énergie qu'ils sont susceptibles d'effacer.

## 2. Réseaux Electriques Intelligents : Vecteur de transition Energétique

Parmi les opportunités offertes par les réseaux électriques intelligents, le défi climatique constitue un enjeu intégrant tous les arbitrages précédents pour servir un objectif de long terme.

En tolérant les spécificités régionales, les réseaux électriques intelligents procurent un chemin technologique pour transformer les systèmes électriques depuis une structure fortement centralisée (type « parapluie ») vers une organisation multi-échelle où chaque « cluster » satisfait au mieux son équilibre offre-demande, idéalement en temps réel. Le concept de micro-réseau à l'échelle d'une ville ou d'une région devient la pierre angulaire de l'édifice, ni trop inertielle pour disposer de l'agilité propice à sa mise en oeuvre, ni trop petite pour procurer des gisements d'équilibre satisfaisants du point de vue des reports de charge à opérer. Cette transformation de la structure actuelle des réseaux historiques rejoint à cette maille la convergence de micro-réseaux isolés dont le but est de permettre l'accès à l'énergie pour des territoires encore vierges.



Il existe cependant des limites à cette évolution qu'il convient d'apprécier :

- Si les boucles locales sont par nature plus résilientes, la nécessité de disposer en dernier recours de gisements d'équilibre impose de conserver un réseau de transport, notamment si les équilibres offre-demande ne sont pas réalisables en temps réels à l'échelle des microréseaux ;
- Négligeable aujourd'hui, la matérialité énergétique des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) pour réaliser l'acquisition, le traitement des données et le contrôle optimal du système énergétique lui-même, doit être comparé à l'énergie effacée. Le second principe de la thermodynamique impose l'existence d'un point d'équilibre ;
- Si l'abondance de productible renouvelable permet de largement couvrir la demande, sa répartition spatiale et sa disponibilité temporelle (intermittence) déplace le paradigme d'exploitation d'un système énergétique actuellement en tension sur les énergies primaires (OpEx) à un système en tension sur l'investissement (CapEx) et au-delà sur la disponibilité des matériaux fonctionnels constituant les équipements électriques.

### Quelques références

- V. Boutin, M. Feasel, K. Cunic, J. Wild: "How Microgrids Contribute to the Energy Transition." (2016)  
[https://www.schneider-electric.us/en/download/document/9982095\\_12-01-16A\\_EN/](https://www.schneider-electric.us/en/download/document/9982095_12-01-16A_EN/)
- V. Boutin, V. Ignatova, J. Philippe, R. Heliot, Y. Herriot, A. Haun, V. Wagner: "How New Microgrid Technologies Enable Optimal Cooperation Among Distributed Energy Resources" (2017)  
[https://www.schneider-electric.com/en/download/document/998-2095-03-15-17AR0\\_EN/](https://www.schneider-electric.com/en/download/document/998-2095-03-15-17AR0_EN/)
- F. Borghese, K. Cunic, P. Barton: "Microgrid Business Models and Value Chains." (2017)  
<http://www2.greentechmedia.com/l/264512/2018-07-05/67wds>
- J. Wild, V. Boutin, P. Barton, L. Haines: "Microgrid Benefits and Example Projects." (2016)  
<https://microgridknowledge.com/white-paper/microgrid-benefits-example-project/>
- Chaire Modélisation Prospective au Service du Développement Durable :  
[www.modélisationprospective.org](http://www.modélisationprospective.org)

# Emulateur d'une hydrolienne

**YASSINE AMIRAT<sup>1</sup>, GILLES FELD<sup>1</sup>, ELHOUSSIN ELBOUCHKHI<sup>1</sup>, MOHAMED BENBOUZID<sup>2</sup>, NICOLAS RUIZ<sup>3</sup>.**

<sup>1.</sup> ISEN Yncréa Ouest Brest, UMR CNRS 6027 IRDL, 29200 Brest, France

<sup>2.</sup> Université de Brest, UMR CNRS 6027 IRDL, 29238 Brest, France

<sup>3.</sup> Guinard-Energies Brest, France

[Yassine.Amirat@isen-ouest.yncrea.fr](mailto:Yassine.Amirat@isen-ouest.yncrea.fr) ; [Gilles.feld@isen-ouest.yncrea.fr](mailto:Gilles.feld@isen-ouest.yncrea.fr)

**Résumé:** L'objectif de ce document est d'étudier et de développer un prototype d'un émulateur d'une hydrolienne capable d'alimenter une charge isolée.

## 1. Introduction

Le potentiel mondial hydrolien est estimé actuellement à 120 GW. En Europe, un tiers du potentiel des énergies des courants marins se situe le long des côtes bretonnes et normandes. C'est pourquoi, ces deux régions sont en pointe pour tout ce qui touche à l'énergie l'hydrolienne. Tout naturellement, c'est là que sont nés les premiers projets d'installation d'hydrolienne, Sabella sur le site du Fromveur, et Open Hydro – Naval Group sur le site de Paimpol Bréhat. Une caractéristique commune à ces premiers tests est la taille des démonstrateurs, respectivement avec des diamètres de turbine de 10 m et 16 m, avec comme conséquence un coût très important pour toutes les opérations maritimes. Comme tous les projets innovants, la technologie hydrolienne nécessite de solutionner un certain nombre de problèmes et notamment dans la conversion électrique, qui constitue une des causes des retards de ces premiers prototypes.

A la lumière de ces premières expériences très onéreuses, la société Guinard Energies (GEs) a choisi de travailler sur des prototypes de petite et moyenne taille (diamètre de turbine de 0,50 m à 4 m), nécessitant peu de moyen de manutention, pour faciliter l'ensemble des tests de validation des différentes solutions proposées et réalisées. Ceci nous a permis de bien comprendre le couplage courants marins / génération électrique. Dans ce travail on s'intéresse à l'émulateur de l'hydrolienne qui a été réalisé pour valider certaines lois de commande et gestion de l'énergie produite. Cette émulateur a permis de mettre au point un prototype un système de mesure du potentiel hydrolien réellement accessible dans un site donné, le système POSEIDE [1] actuellement déployable partout dans le monde.



Figure 1 : L'hydrolienne P66

## 2. Principe

La structure de base du système proposé est représentée sur la figure 2.

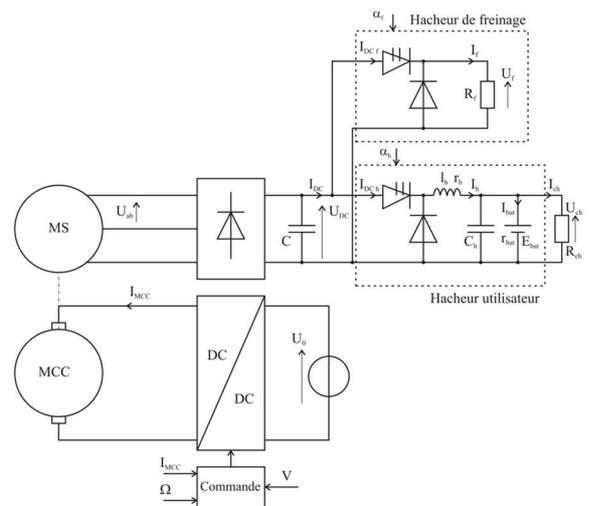


Figure 2 : structure de base

### 2.1. Recherche du maximum de puissance

La recherche du maximum de puissance est réalisée avec connaissance de la caractéristique  $C_p=f(\lambda)$  ;

Cette méthode ne nécessite aucune connaissance préalable des paramètres mécaniques ou électriques du système.

Le principe de cette approche est basé sur la comparaison de la puissance électrique à la puissance optimale, l'erreur produite entre ces deux grandeurs l'action sur le rapport cyclique du hacheur boost permet de minimiser l'erreur.

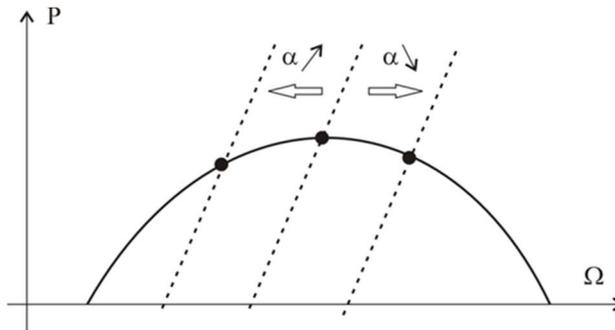


Figure 3 : Principe de la commande MPPT

### 2.2. Gestion du flux d'énergie

La stratégie adoptée pour gérer la répartition de la puissance entre les différentes composantes du système, i.e., la génératrice synchrone, la charge de freinage, le banc de stockage batterie et la charge principale ; cette stratégie est appliquée afin de garantir un équilibre de la puissance active dans tout le système. A cet effet nous avons adopté les scénarios suivants :

- Démarrage : durant la phase de démarrage, les deux hacheurs (utilisateur et de freinage) sont inhibés jusqu'à ce la vitesse de rotation atteigne une valeur minimale. Une fois cette vitesse minimale atteinte, la génératrice commence à débiter sur la charge de freinage en activant le hacheur correspondant.
- Sur-production : la sur-production est caractérisée par  $P_{géné} > P_{charge}$  ; par conséquent, la puissance produite est partagée entre le hacheur utilisateur et le hacheur de freinage.
- Sous-production : la sous-production est caractérisée par  $P_{géné} < P_{charge}$  ; par conséquent, le déficit de puissance est fourni par le dispositif de stockage.
- Arrêt d'urgence : en cas de survitesse ou une situation d'urgence l'hydrolienne doit être arrêtée en faisant débiter la génératrice directement sur une résistance de freinage auxiliaire.

L'organigramme principal de la commande du système est représenté par la figure 4.

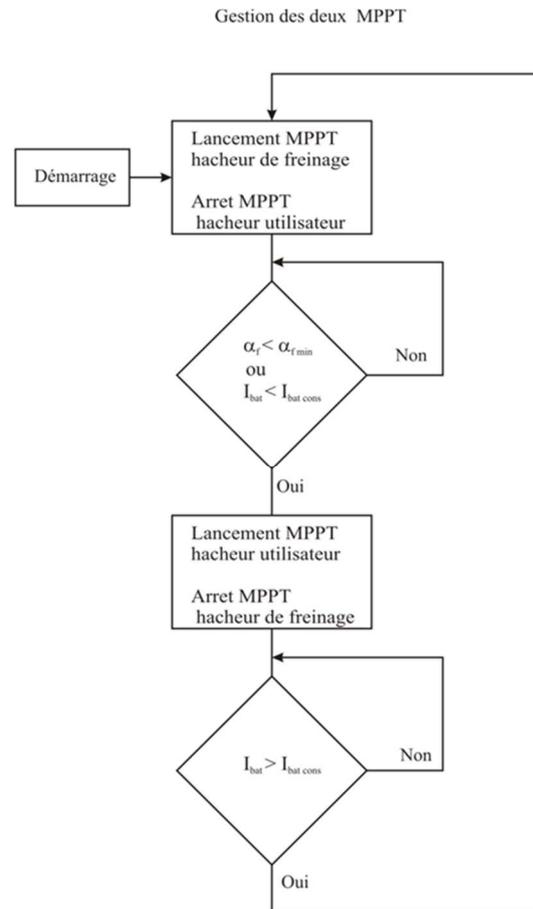


Figure 4 : Organigramme de gestion et contrôle

### 3. Mise en œuvre du système

La mise en œuvre du système a été réalisée en deux étapes ; une étape modélisation et simulation, puis réalisation sur banc de test.

#### 3.1 Modélisation et simulation

Les modèles mathématiques exploités pour l'étude du système sont du type modèle moyen.

- L'hydrolienne a été modélisée par l'expression :

$$P_{tur} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

où  $C_p(\lambda)$  représente le facteur de puissance de l'hydrolienne, la densité du fluide, A la surface balayée par l'hélice de l'hydrolienne et V la vitesse du fluide.

- La génératrice a été modélisée par l'expression reliant la f.e.m.  $E_{gén}$  à la vitesse de rotation  $\Omega$  (rd/sec):

$$E_{gén} = K \cdot \Omega$$

- Le dispositif de stockage a été modélisé par le modèle simplifié d'une batterie :

$$E_{bat} = E_{bat0} + R_{bat} I_{bat}$$

- Les deux hacheurs ont été modélisés par leurs modèles moyens simplifiés :

$$U_{hmoy} = \alpha_h U_{dc}$$

**Résultats de simulation :**

Les résultats de la simulation sont représentés par les figures 5, 6, 7 et 8.

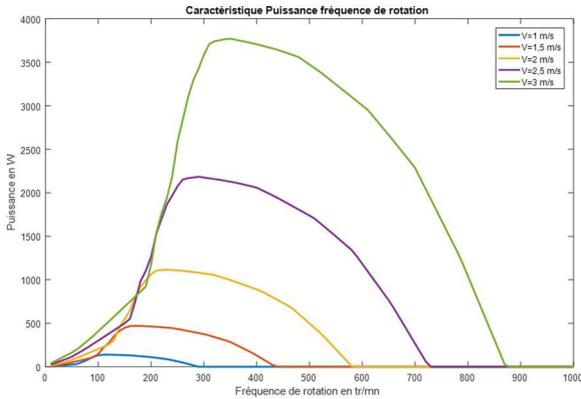


Figure 5 : Caractéristique Puissance en fonction de la vitesse de rotation.

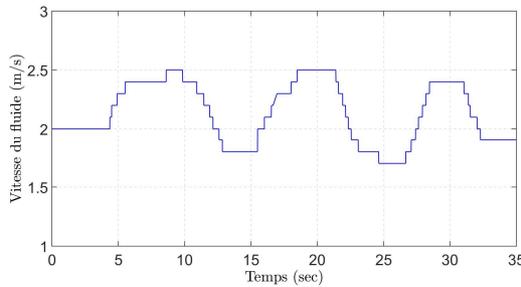


Figure 6 : Profil de vitesse du courant marin

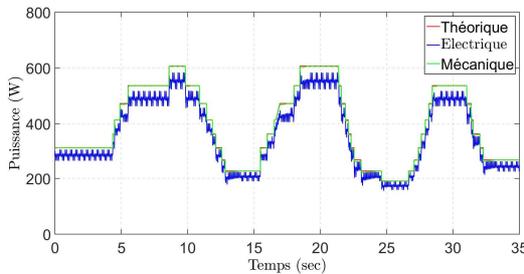


Figure 7 : Forme d'onde des puissances théorique, électrique et mécanique

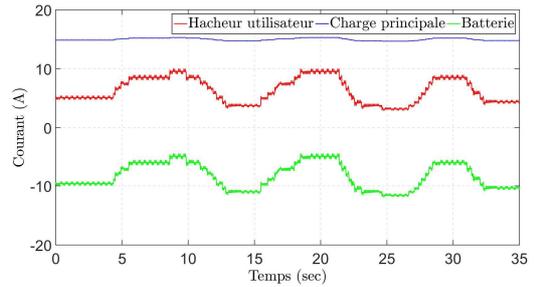


Figure 8 : Forme d'onde caractéristique des courants

**3.2 Manipulation**

Afin de valider les algorithmes MPPT et gestion de la puissance développés en simulation, une maquette à échelle réduite a été développée. La maquette réalisée comporte un convertisseur de puissance intégrant deux interrupteurs statiques avec 2 commandes isolées ainsi qu'une mesure des courants dans chaque bras.

Les algorithmes de commande ont été implémentés sur la carte de prototypage dSPACE MicLabBox1202.

- L'émulateur de l'hydrolienne est réalisé autour d'un moteur à courant continu commandé en couple comme illustré sur la figure 9 et le montage réalisé est représenté sur la figure 10.
- Pour la mise en œuvre de la commande MPPT, l'algorithme P&O illustré par la figure 11 a été appliqué en utilisant la vitesse de rotation et la puissance produite comme entrées. Dans cet algorithme la vitesse de rotation a été estimée en utilisant la méthode de détection de passage par zéro de la tension produite par la génératrice synchrone ; et la puissance produite a été assimilée à la puissance au niveau du bus DC.

Les figures de 12 à 13 représentent les différentes composantes de l'émulateur.

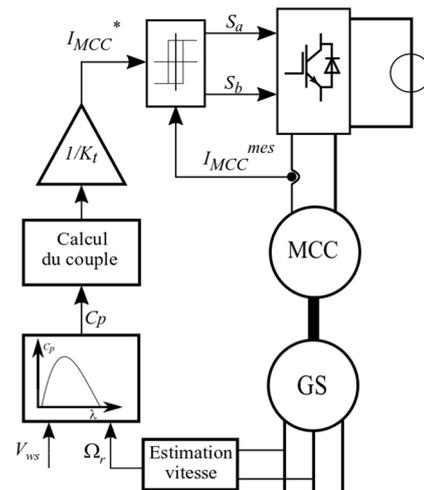


Figure 9 : Bloc de commande du MCC pour reproduire le comportement de l'hydrolienne

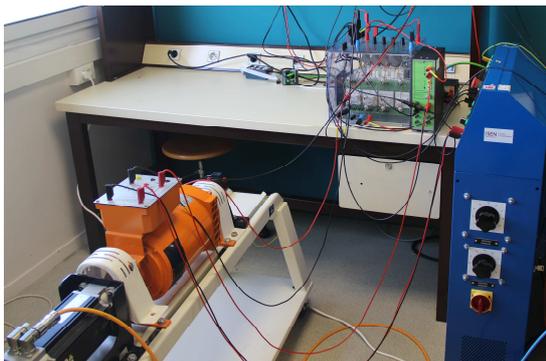


Figure 10 : Emulateur de l'hydrolienne



Figure 14 : Le système de développement et contrôle

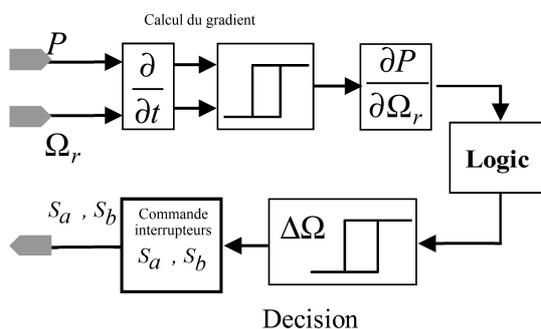


Figure 11 : Hacheur utilisateur et de freinage



Figure 12 : Hacheur utilisateur et de freinage

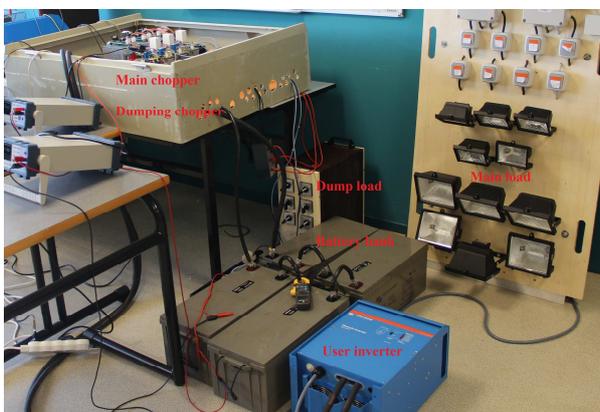


Figure 13 : Dispositif de stockage et la charge principale

Résultats expérimentaux :

Les résultats expérimentaux sont représentés sur les figures 15 et 16. Ces résultats ont été obtenus pour les mêmes conditions, à savoir la même vitesse de fluide représentée précédemment sur la figure 6.

Une fois que les algorithmes ont été validés, une campagne d'essai a été menée en mer avec la vraie hydrolienne P66 comme illustré par la figure 17.

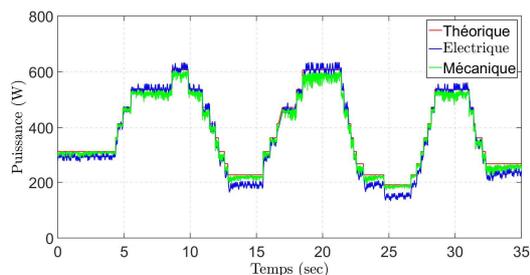


Figure 15 : Courbe expérimentale Puissance=f(t)

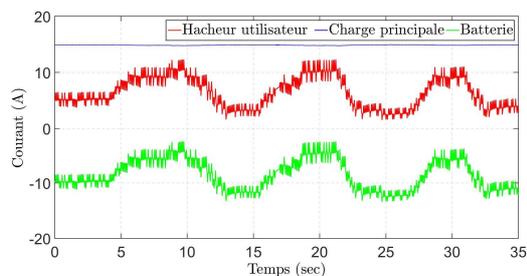


Figure 16 : Courbe expérimentale Courant=g(t)



Figure 17 : Le prototype de l'hydrolienne sur la plateforme d'essai.

#### 4. Perspectives

Après avoir obtenu des résultats concluants et confirmé la faisabilité du concept, il faut s'intéresser aux voies d'amélioration. L'ambition de ce projet est de pouvoir contrôler une grappe d'hydroliennes, de surveiller l'état du système global en développant des algorithmes de surveillance et de gestion de l'état des hydroliennes et des batteries et d'associer d'autres sources renouvelables.

Référence machine synchrone : 115 U 2 C 20 0 B CA A 115 190		
Couple nominal	Fréquence de rotation nominale	Puissance nominale
9,4 N.m	2000 tr/mn	1820 W

$R_{ph} = 4,55 \Omega$	$L_{ph} = 25,7 \text{ mH}$	
$K_t = 2,4 \text{ N.m / A}$	$K_e = 147 \text{ V / krpm}$	$K = 0,8$
$C = K_t \cdot I_{eff}$	$E_{ph} = K_e \cdot N_{en} \text{ krpm}$	$K = \frac{C}{3 \cdot I_{eff}} = \frac{E_{ph} n}{\Omega}$

#### 1. Bibliographie

- [1] <http://www.guinard-energies.bzh/fr/guinard-energies/> consulté le 10/09/2017.
- [2] Y. Amirat, G. Feld, E. Elbouchikhi, M. E. H. Benbouzid, H. Kermarrec, N. Ruiz, and C. Leloup, "Design and applications of a tidal turbine emulator based on a PMSG for remote load," in *Proceedings*

of the 2017 IEEE IECON, Beijing (China), pp. 1-5, October-November 2017.

- [3] [http://www.bretagne.bzh/jcms/preprod\\_91986/pact-e-electrique-breton](http://www.bretagne.bzh/jcms/preprod_91986/pact-e-electrique-breton) consulté le 10/02/2018.
- [4] O.H. Mohammed, Y. Amirat, M. E. H. Benbouzid, and G. Feld, Optimal Sizing and Energy Management of Hybrid Wind/Tidal/PV Power Generation System for Remote Areas: Application to the Ouessant French Island, Smart Energy Grid Design for Island Countries, Chap. 12, p. 381-413, ISBN: 978-3-319-50196-3, Green Energy and Technology Series, Springer International Publishing, 2017.
- [5] S. Toumi, Y. Amirat, E. Elbouchikhi, M. Trabelsi, M. E. H. Benbouzid, and M.F. Mimouni, "A comparison of fault-tolerant control strategies for a PMSG-based marine current turbine system under generator-side converter faulty conditions," *Journal of Electrical Systems*, vol. 13, n°3, pp. 472-488, September 2017.
- [6] Tony El Tawil, Jean Frédéric Charpentier, Mohamed Benbouzid, "Tidal energy site characterization for marine turbine optimal installation: Case of the Ouessant Island in France", *International Journal of Marine Energy*, Volume 18, 2017, Pages 57-64.
- [7] Tony El Tawil, Jean Frédéric Charpentier, Mohamed Benbouzid, "Sizing and rough optimization of a hybrid renewable-based farm in a stand-alone marine context, *Renewable Energy*, Volume 115, 2018, Pages 1134-1143.



## En 2019, j'adhère ou je renouvelle mon adhésion à la SEE

La SEE, société savante française fondée en 1883, forte de 2 000 membres, couvre les secteurs de l'Électricité, de l'Électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication.

Sa vocation : contribuer aux enjeux majeurs du 21<sup>e</sup> siècle, en fédérant la communauté scientifiques, industriels et les opérateurs de l'électricité et des télécommunications notamment par le biais de son Cercle des entreprises qui identifie et traite de problématiques sensibles et actuelles telles que la cybersécurité des réseaux électriques intelligents.

### BULLETIN À COMPLÉTER ET RENVOYER :

SEE - Service adhésions - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France.  
01 56 90 37 17 - [adhesion@see.asso.fr](mailto:adhesion@see.asso.fr)

#### J'ADHÈRE A LA SEE POUR L'ANNÉE 2019\*

- Standard ..... 125 €     Retraité, Enseignant, Jeune actif < 35 ans ..... 65 €  
 Bienfaiteur\*\* ..... 500 €     Etudiant, Recherche d'emploi ..... 15 €

\* Une remise de 10% est accordée aux membres IEEE (merci d'indiquer votre n° de membre IEEE : .....)

\*\* L'adhésion bienfaiteur comprend : un abonnement papier à la REE ou à la 3E.I (en plus de l'accès numérique à ces deux revues), ainsi qu'une participation gratuite à l'une de nos soirées d'étude proposées par l'un de nos clubs techniques. Merci d'indiquer la revue souhaitée ci-dessous si vous optez pour l'adhésion bienfaiteur.  
Pour l'inscription à une soirée, contactez-nous à : [adhesion@see.asso.fr](mailto:adhesion@see.asso.fr)

#### JE M'ABONNE À TARIF PRÉFÉRENTIEL AUX PUBLICATIONS PAPIER DE LA SEE (Prix réservés aux adhérents)



Tarifs France & UE (Prix TTC)  
 63 € Au lieu de 125 €  
Tarifs Hors UE (Prix HT)  
 71,70 € Au lieu de 132,43 €



Tarifs France & UE (Prix TTC)  
 39 € Au lieu de 42 €  
Tarifs Hors UE (Prix HT)  
 48,18 € Au lieu de 51,12 €

#### MES COORDONNÉES

Prénom :  Nom :  N° Adhérent :

#### ADRESSE DE LIVRAISON

Adresse :   
Code postal :  Pays :   
Ville :   
Tél. :   
e-mail\* :

\* Obligatoire

#### MON RÉGLEMENT

- Virement bancaire : **BNP Paribas, Paris Associations (02837) compte n°30004 00274 00010336242 58**  
 Chèque bancaire ou postal à l'ordre de la SEE  
 Prélèvement automatique  
 Carte bancaire Visa / Euro / Mastercard  
N°   
Date d'expiration   Cryptogramme

#### ADRESSE DE FACTURE (Si différente)

Raison sociale de l'employeur :   
Service :  Activité (facultatif) :   
Adresse :   
Code postal :  Pays :

Ville :   
e-mail\* :

\* Obligatoire



+ RAPIDE :

Adhérez dès aujourd'hui sur internet :  
[www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)



En tant que membre de la SEE,  
vous bénéficiez  
de nombreux avantages



Élargir son réseau  
professionnel par la  
participation à des structures  
de réflexions adaptées

- **6 Clubs techniques**
  - Cybersécurité et Réseaux Intelligents
  - Ingénierie des Systèmes d'Information et de Communication
  - Radar, Sonar et Systèmes Radioélectriques
  - Stockage et nouveaux Moyens de Production
  - Eco-conception en Génie Electrique
  - Systèmes Electriques
- **11 Groupes régionaux**
- **1 Cercle des Entreprises**
- **1 Cercle histoire**



Participer et bénéficier  
de tarifs préférentiels  
pour les Conférences  
et Journées d'études SEE

- Conférences nationales et internationales
- Journées d'études thématiques
- Conférences-Débat
- Congrès internationaux, en partenariat ou non avec d'autres sociétés scientifiques



Consulter et télécharger  
gratuitement les publications  
(REE et 3EI) en version  
numérique et s'abonner  
aux publications papier  
à tarif préférentiel

- **La Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE)** se destine aux ingénieurs, chercheurs, enseignants, décideurs techniques et économiques intéressés par les secteurs de l'électricité, électronique, de l'information et communication. Paraissant 5 fois par an, la revue s'articule autour de dossiers techniques, flash-infos, articles invités, entretiens de personnalités du monde de la recherche et de l'industrie.
- **La Revue 3EI** est une publication trimestrielle destinée aux professeurs, universitaires et industriels concernés par l'enseignement de l'électricité et de l'électronique industrielle.



S'engager  
dans une association  
qui reconnaît les talents  
et crée une émulation  
parmi ses membres

- Grades Senior et Emérite SEE
- Remise de prix et Trophées pour les professionnels confirmés, jeunes actifs et étudiants (Brillouin-Glavieux, Général Ferrié, André Blanc Lapierre...)
- Remise de médailles (Ampère, Blondel...)

→ Pour rejoindre la SEE, 2 modes d'adhésions :



Adhésion individuelle :  
via le site [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)  
ou le bulletin d'adhésion



Adhésion collective :  
partenariat d'entreprise ou  
d'école via des conventions

**NOUS CONTACTER :**

SEE - Service adhésions - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France.  
01 56 90 37 17 - [adhesion@see.asso.fr](mailto:adhesion@see.asso.fr) - [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)

Abonnez-vous à la



**BULLETIN À COMPLÉTER ET RENVOYER :**  
SEE - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France  
01 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr

**QUATRE FORMULES AU CHOIX**



**VERSION PAPIER**

5 numéros : mars, mai, juillet, octobre, décembre.  
Distribution postale

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 132,43 € HT



**VERSION NUMÉRIQUE**

Accès aux publications numériques  
ouvert pendant un an à compter  
de la date de souscription

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 90 € TTC	<input type="checkbox"/> 88,15 € HT



**VERSION DUO**

Version imprimée  
+ version numérique

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 155 € TTC	<input type="checkbox"/> 161,81 € HT

**VERSION PREMIUM**

- > Adhésion SEE avec accès eREE
- + Tarif préférentiel à la revue REE format papier
- + Accès numérique aux revues 3E.I et REE
- + Tarifs préférentiels aux conférences et journées d'études

**Adhésion SEE**

Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Étudiants, en recherche d'emploi
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 65 € TTC	<input type="checkbox"/> 15 € TTC

**+ Abonnement REE (Version papier)**

<input type="checkbox"/> France & UE : 63 € TTC	<input type="checkbox"/> Hors UE : 71,70 € HT
---	---

TVA de la revue REE : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

**MES COORDONNÉES**

Prénom :  Nom :

**ADRESSE DE LIVRAISON**

Adresse :

Code postal :  Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail\* :

\* Obligatoire

**ADRESSE DE FACTURE (Si différente)**

Je joins le bon de commande administratif N°   
et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service :  Activité (facultatif) :

Adresse :

**MON RÉGLEMENT**

Je règle la somme de  €

par  Chèque à l'ordre de la SEE  
 Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte

Date de validité  N° cryptogramme  (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Code postal :  Ville :

Pays :  N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE hors de France

e-mail\* :

\* Obligatoire

Date  Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements et informations concernant la SEE et ses activités. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris Cedex 16 ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr



La Revue REE est une publication de la SEE

## 15 ans d'archives 3EI en DVD

La SEE vous propose d'acquérir le DVD « archives » 3EI regroupant **tous les articles des numéros 0 à 59, de mai 1994 à décembre 2009, sous forme numérique** (PDF scannés/ vectoriels).

Pour toute commande merci de remplir le bulletin joint ci-dessous et de l'envoyer à l'adresse indiquée :



### BON DE COMMANDE

Raison Sociale :  
Adresse :  
Ville :  
Tel. :  
E-mail :

Nom du contact : M/Mme  
Pays :  
Fax :

	France et pays de l'Union Européenne	Hors Union Européenne
Tarif individuel	60 €	70 €
Tarif collectivité (CDI, laboratoires...)	100 €	110 €

**MONTANT TOTAL DE LA COMMANDE : .....€ HT soit .....€ TTC (TVA 20%).**

#### REGLEMENT:

- Par chèque bancaire à l'ordre de la « SEE »
- Par virement bancaire :  
**BNP Paribas, Paris Associations (02837)**

**RIB:** 30004 00274 00010336242 58  
**IBAN:** FR76 3000 4002 7400 0103 3624 258  
**BIC:** BNPAFRPPAA

Date, Lieu

Cachet, Signature  
(Précédés de la mention "lu et approuvé")

**Contact : M<sup>lle</sup> Mélisande de LASSENCE**  
Tél : 01.56.90.37.17 - [abo@see.asso.fr](mailto:abo@see.asso.fr)

Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication

17, rue de l'Amiral Hamelin  
75783 Paris Cedex 16

[www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)



