

## Régulateurs de Puissance Interphases : des compléments à la famille des régulateurs FACTS

### 1.0 Régulateurs de puissance interphases (RPI) : pourquoi faire?

Le développement de la technologie des RPI fut principalement motivé par la nécessité de créer de nouveaux contrôleurs d'écoulement de puissance pour surmonter les limitations d'exploitation des réseaux causés par des niveaux de court-circuit trop élevés. En fait, les niveaux de court-circuit trop élevés sont un problème très répandu qui n'a pratiquement pas été pris en compte dans le développement des systèmes FACTS [1]. La flexibilité des réseaux de transport et de distribution est pourtant susceptible d'être nettement améliorée par l'ajout de circuits ou de points d'interconnexion qui n'augmentent pas leur puissance de court-circuit. Malgré les efforts déployés, au niveau mondial, pour développer des dispositifs limiteurs de courants de défaut, le RPI demeure la seule solution économique.

La solution classique aux problèmes de niveaux de court-circuit trop élevés consiste à fractionner le réseau, par exemple en laissant un disjoncteur d'attache ouvert pour permettre l'ajout d'une autre source, production ou ligne. Un deuxième exemple est l'exploitation en antenne des sous-réseaux de transport, avec pour corollaire une perte de flexibilité, voire de fiabilité. Enfin, un troisième exemple : augmentation de la capacité d'un poste de transformation, possible uniquement en sectionnant la barre de tension inférieure. Ces solutions peu performantes sont légion, d'où la nécessité d'équiper les postes de transformation et de distribution de systèmes de commande d'écoulement de puissance qui peuvent limiter les courants de défaut.

### 2.0 Survol de la technologie des RPI

L'objectif premier des concepteurs de RPI est de résoudre, de manière passive, les problèmes de fréquence fondamentale. L'électronique de puissance peut être utilisée lorsqu'il faut agir rapidement pour amortir des oscillations ou prévenir de trop grandes fluctuations de tension. Les systèmes RPI de base n'intègrent que des équipements conventionnels (condensateurs, bobines d'inductance et transformateurs-déphaseurs), ils ne génèrent donc aucun harmonique et ne présentent aucune perte de commutation. Particulièrement robustes, leur maintenance est bien plus simple que celle des dispositifs à électronique de puissance.

Le Régulateur de Puissance Interphase (RPI) n'est pas un appareil de configuration fixe, mais plutôt une technologie innovatrice et flexible permettant de caractériser et de configurer des systèmes de commande d'écoulement de puissance « sur mesure ». Un RPI est, en fait, un dispositif raccordé en série et constitué de deux branches en parallèle dotées chacune d'une impédance avec un élément déphaseur (Figure 1). Les quatre paramètres de conception (deux impédances et deux déphasages) offrent une très grande flexibilité et permettent la réalisa-

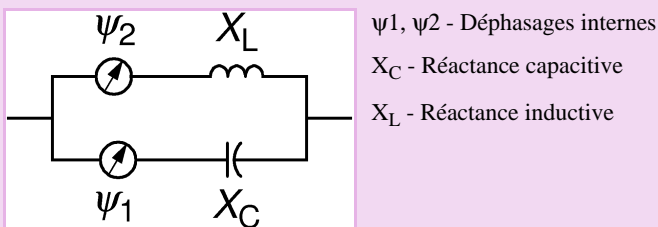


Figure 1: Schéma unifilaire générique du régulateur de puissance interphase

by Jacques Lemay, ABB Canada  
 Jacques Brochu et François Beauregard, CITEQ  
 et Pierre Pelletier, Hydro-Québec

#### Abstract

The current application of Flexible AC Transmission Systems, or FACTS, solutions does not address the widespread problem of excessive short-circuit levels, for which the only conventional solution is to break up networks, thus reducing operating flexibility if not reliability. The Interphase Power Controller (IPC) technology offers innovative solutions for high short-circuit environments. IPCs provide passive solutions for normal and contingency conditions. Power electronics modules can be added as necessary for dynamic conditions. At the present time, there are three commercially available IPC applications.

#### Sommaire

Les Systèmes de Transmission Flexibles en Courant Alternatif (FACTS) actuels ne permettent pas de gérer le problème largement répandu des niveaux de court-circuit trop élevés. La solution traditionnelle, qui consiste à fractionner les réseaux, nuit à leur flexibilité d'exploitation, voire à leur fiabilité. Le Régulateur de Puissance Interphases (RPI) constitue une solution innovatrice pour les environnements à niveaux de court-circuit élevés. Le RPI gère, de manière passive, les régimes permanent et post-contingence. On peut aussi lui adjoindre des modules d'électronique de puissance, selon les besoins en régime dynamique. Trois types de RPI sont actuellement disponibles sur le marché.

tion d'une grande variété d'applications. Du fait de cette polyvalence, chaque solution RPI porte un nom différent.

Les RPI peuvent être adaptés aux conditions d'exploitation. Or, adaptation est souvent synonyme d'optimisation. À titre d'exemple, la suppression du déphasage dans une des deux branches du RPI allège l'équipement et optimise la position de la caractéristique de régulation dans le plan angle-puissance. Autre preuve de l'adaptabilité des RPI : les différentes manières de produire les déphasages internes. Les transformateurs-déphaseurs traditionnels constituent la solution la plus courante. Mais il est également possible de recourir à des transformateurs classiques munis d'enroulements auxiliaires qui produisent le déphasage interne souhaité en injectant des tensions en série provenant d'autres phases.

Trois catégories de RPI sont actuellement commercialisées :

- Dans le premier groupe, les impédances forment un circuit parallèle réglé sur la fréquence fondamentale du réseau. Ces RPI de forte impédance sont les seuls appareils connus capables de limiter d'eux-mêmes leur contribution aux défauts et de découpler les tensions à leurs bornes, d'où leur nom de « liens découplants » (LD). Ils permettent la mise en place de liaisons autrement impossibles du fait des niveaux de court-circuit élevés.
- Lorsqu'un lien découplant reliant deux niveaux de tension est raccordé en parallèle avec des transformateurs classiques, sa configuration peut être simplifiée et optimisée. On l'appelle alors «

transformateur limiteur de courant de défaut » (TLCD) et il sert à accroître la capacité totale d'un poste de transformation sans augmenter la puissance de court-circuit.

- Dans le domaine du transport, la fonction de découplage du lien découplant nuit à la stabilité du réseau et le circuit parallèle du RPI doit être désynchronisé. Sous sa forme la plus simple, un RPI de transport est constitué d'un transformateur-déphaseur en parallèle avec une impédance réactive. Ce dispositif, appelé « transformateur-déphaseur assisté » (TDA) peut servir soit à augmenter la capacité de transit d'un transformateur-déphaseur existant, soit à installer un transformateur-déphaseur de capacité équivalente à moindre coût. Le RPI du poste Plattsburgh (USA), en service depuis juin 1998, appartient à cette catégorie.

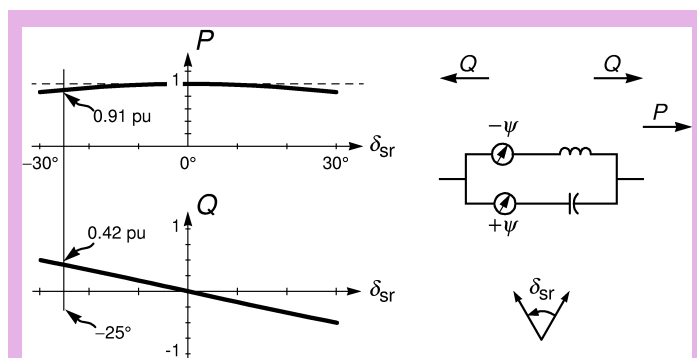
Tous ces RPI font l'objet d'un ou de plusieurs brevets (cinq en tout). Les formules mathématiques, la méthode d'analyse et des exemples d'application de base sont décrits en [2]. ABB a participé au développement de cette technologie et détient une licence exclusive de commercialisation des applications RPI dans le monde entier.

### 3.0 Le lien découplant (LD)

Dans le lien découplant, les impédances forment un circuit parallèle réglé sur la fréquence fondamentale du réseau. Chaque borne du dispositif se comporte comme une source de courant commandée.

En service normal, le lien découplant assure la commande bidirectionnelle de l'écoulement de puissance et le support des tensions en produisant et en absorbant la puissance réactive. Les niveaux d'exploitation souhaités sont obtenus en réglant les déphasages, par manœuvre de changeurs de prises ou d'interrupteurs. Pendant les perturbations, le dispositif ne contribue pas au courant de court-circuit et les tensions de chaque côté sont découplées. En clair, le LD ne répercute pas les perturbations d'un côté à l'autre.

La caractéristique de régulation de base du lien découplant (Figure 2) est obtenue de manière passive avec des éléments classiques : condensateurs, bobines d'inductance et transformateurs-déphaseurs. Parce que ces caractéristiques sont inhérentes au régulateur, elles sont robustes et prévisibles en toute circonstance, avant et après contingences.



P - Puissance active, Q - Puissance réactive  
 $\delta_{sr}$  - Déphasage entre les bornes

Figure 2: Caractéristique de régulation de base du lien découplant.

### 3.1 Applications types

Le LD permet la mise en œuvre de nouvelles interconnexions, comme par exemple :

- des liaisons entre sous-réseaux de transport, pour accroître la flexibilité d'exploitation, partager la capacité de réserve et simplifier la gestion de la puissance réactive ;

- des attaches pour la mise en parallèle des moyens de production ou de transformation sans augmenter les niveaux de court-circuit.

Pour la réalisation de ces liaisons et attaches, la seule solution conventionnelle est le renforcement du pouvoir de coupure et de la tenue aux court-circuits des disjoncteurs et autres appareils.

Le lien découplant peut également servir de circuit de blocage contre les surcharges dans un sous-réseau lors de la perte de lignes parallèles à plus haute tension. Cela permet de charger les lignes de tension supérieure à des niveaux plus élevés. Ce type de RPI constitue alors une solution plus économique que d'augmenter la capacité du ou des circuit(s) en surcharge tout en évitant la dégradation qui résulterait de laisser ces lignes normalement ouvertes.

### 3.2 Prototype de démonstration

Les résultats d'une campagne de démonstration exhaustive sur prototype réalisée sur le simulateur de réseaux de l'Institut de Recherches d'Hydro-Québec sont résumés en [3]. Le régime de fonctionnement le plus sévère pour le dispositif, celui qui conditionne la conception finale de ses composants, est l'ouverture d'un circuit d'un côté ou de l'autre du RPI synchronisé. Dans ce cas, les deux branches du LD forment un circuit résonnant série excité par la source de tension équivalente du déphasage. Le critère de conception est de protéger les composants du LD (déjà hors service) pendant son arrêt. Pour ce faire, on utilise des composants classiques comme des dispositifs d'absorption d'énergie à l'oxyde de zinc.

### 4.0 Les transformateurs limiteurs de courant de défaut (TLCD)

Normalement, les transformateurs des grands postes de transformation et de distribution fonctionnent en parallèle pour une fiabilité et une flexibilité maximales. A l'étape ultime de la construction du poste, le niveau de court-circuit côté secondaire ne permet plus l'ajout de transformateurs, sauf si des mesures particulières sont prises pour gérer ou éviter l'accroissement des courants de défaut. Pour éviter d'apporter de coûteuses modifications au poste ou d'en construire un autre à proximité, on a généralement recours à deux solutions conventionnelles : sectionner la barre basse tension ou, si le poste a été conçu selon le critère (n-1), exploiter le transformateur redondant en mode standby (sous tension mais pas en service).

Le document [5] décrit une application où un cinquième transformateur est ajouté à un gros poste de transformation 315/120 kV, typique des installations d'Hydro-Québec dans la région de Montréal. Bien que plus coûteuse qu'une solution avec un transformateur traditionnel, la solution RPI s'est avérée nettement plus avantageuse que le remplacement ou le renforcement des caractéristiques de nombreux disjoncteurs et autres appareils 120 kV. Depuis la publication de l'article [5], des études d'optimisation ont montré qu'il est possible de simplifier la configuration du transformateur limiteur de courant de défaut à condition qu'au moins deux transformateurs classiques lui soient raccordés en parallèle dans toutes les conditions de fonctionnement. La branche inductive peut

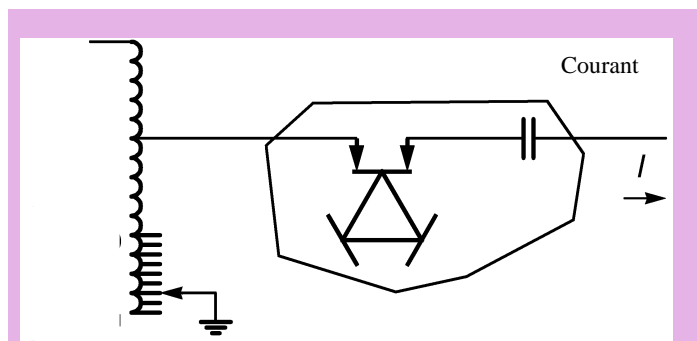
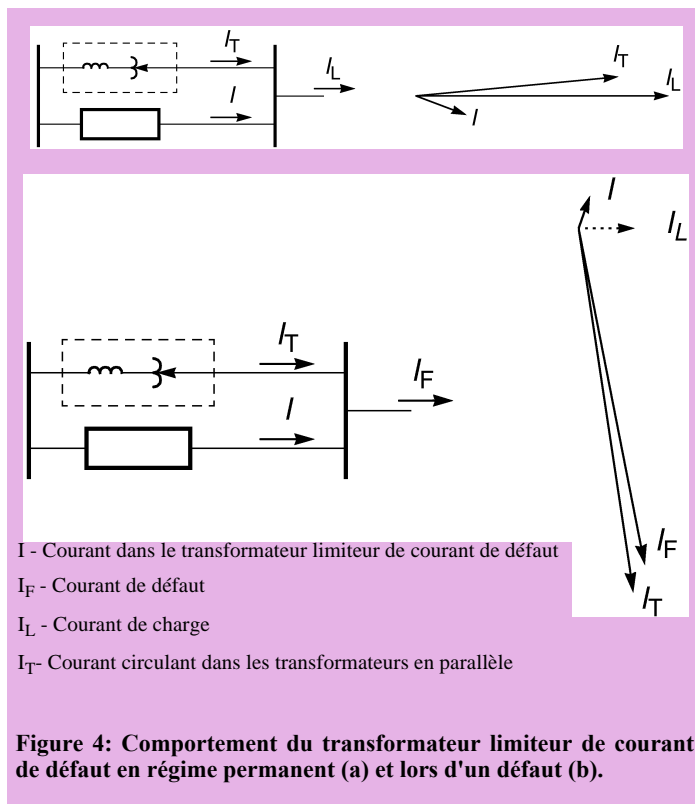


Figure 3: Schéma unifilaire d'un transformateur limiteur de courant de défaut optimisé

être supprimée car elle est court-circuitée par l'impédance plus faible des transformateurs en parallèle. Le transformateur limiteur de courant de défaut optimisé est ainsi composé d'un transformateur classique raccordé en série avec une batterie de condensateurs et un petit transformateur-déphaseur. La figure 3 illustre un schéma unifilaire type et les diagrammes de phaseurs de la figure 4 montrent le comportement du transformateur limiteur de courant de défaut optimisé en régime permanent et lors d'un défaut.



La solution du transformateur limiteur de courant de défaut permet donc l'ajout d'un ou plusieurs transformateurs sans augmenter le niveau de court-circuit. Comparée au sectionnement de la barre, elle conserve la flexibilité et la fiabilité ; les chutes de tension y sont moindres en régimes permanent et transitoire ; elle exige également moins de compensation shunt et évite le ré-équilibrage des charges en post-contingence. Par rapport à la configuration standby, on notera qu'elle permet l'ajout de plus d'un transformateur, offre le niveau de pertes le plus bas et nécessite moins de compensation shunt.

#### 4.1 Applications types

Le transformateur limiteur de courant de défaut est conçu pour accroître la capacité totale des postes de transformation où le niveau de court-circuit est déjà proche des valeurs nominales des disjoncteurs et autres appareils. En termes économiques, son choix se justifie sur la base du coût de remplacement de ces mêmes appareils. Lorsque l'augmentation du niveau de court-circuit est importante, d'autres équipements sont affectés (caractéristiques en régime de courte durée, forces électrodynamiques sur les jeux de barres, etc.)

Dans une autre application, un des transformateurs d'un poste a été converti en transformateur limiteur pour diminuer la contribution totale de courants de défaut. On peut alors ajouter une autre source comme un générateur ou une liaison avec un autre réseau. Ces deux possibilités présentent un intérêt certain dans le marché de l'électricité libéralisé en mutation profonde.

### 5.0 Transformateur-déphaseur assisté (TDA)

L'adaptation de la technologie RPI pour augmenter la capacité de tran-

sit d'une ligne de transport en régimes normal et de post-contingence est décrite en [4] et [6]. Pour ce faire, la configuration la plus simple est une impédance réactive raccordée en parallèle avec un transformateur-déphaseur (TD) traditionnel. La nature de l'impédance dépend du quadrant de fonctionnement de ce dernier : des condensateurs lorsque le TD sert à augmenter l'écoulement de puissance et des bobines d'inductance lorsqu'il travaille à le réduire.

#### 5.1 Applications types

##### 5.1.1 Adjonction de condensateurs à un TD qui augmente l'écoulement de puissance

Le document [4], qui décrit la ligne 500 kV de Mead-Phoenix, montre que la capacité de transit maximale en régime permanent des deux TD à 500 kV du poste Westwing peut passer de 1 300 à 1 910 MW en ajoutant des condensateurs de 125 ohms, 370 MVar en parallèle. Avec les condensateurs, l'angle de déphasage interne effectif du RPI est de 31° contre 25° pour les transformateurs-déphaseurs seuls.

##### 5.1.2 Recours à l'électronique de puissance pour amortir les oscillations réseau

Le réseau de transport principal de l'Arizona et du sud de la Californie, dont la ligne Mead-Phoenix 500 kV est une composante importante, est sujet à des oscillations basse fréquence (0,7 Hz). Pour exploiter la capacité accrue en régime permanent, ces oscillations naturelles doivent être amorties d'une manière ou d'une autre. Pour cela, des condensateurs série commandés par thyristors s'avèrent une solution efficace.

Des études préliminaires ont montré qu'un module de condensateurs à thyristors en série avec les deux transformateurs-déphaseurs (une des branches du RPI) amortit autant les oscillations qu'un autre module de puissance supérieure, raccordé en série avec la ligne. On peut donc réaliser un transformateur-déphaseur assisté dynamique à partir de dispositifs classiques (transformateur-déphaseur, condensateurs) et des composants d'électronique de puissance existants.

##### 5.1.3 Adjonction de bobines d'inductance à un TD qui réduit l'écoulement de puissance

Le premier RPI au monde (un transformateur-déphaseur assisté [6]) est en service commercial depuis la fin de juin 1998, au poste Plattsburgh de la New York Power Authority (NYPA). Ce poste réalise l'interconnexion du réseau de la NYPA et de ceux de l'état du Vermont par l'intermédiaire d'un transformateur-déphaseur à 115 kV. En service normal, l'ajout de bobines d'inductance de 75 ohms accroît de 33 % la capacité de transit de la liaison en été, qui passe ainsi de 105 à 140 MW (Figure 5). Les trois bobines d'inductance monophasées, le disjoncteur et une partie d'un sectionneur sont illustrés en page couverture de la présente édition. Ces équipements, avec le transformateur-déphaseur existant (en arrière plan), constituent le RPI du poste Plattsburgh. La vue en perspective (Figure 6) permet de mieux visualiser l'installation.

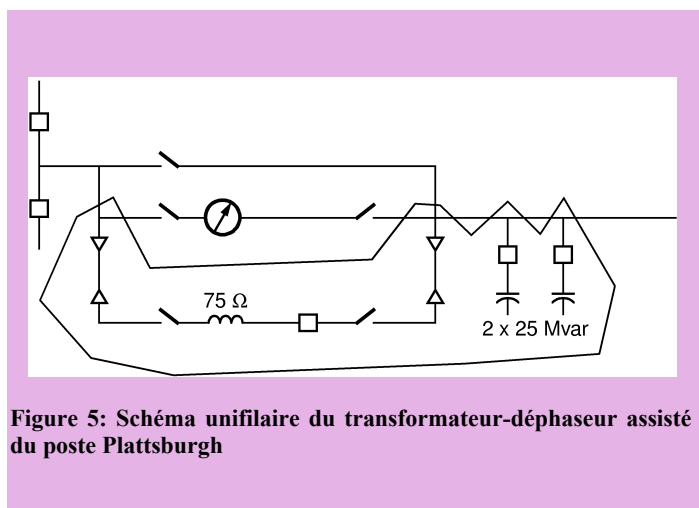
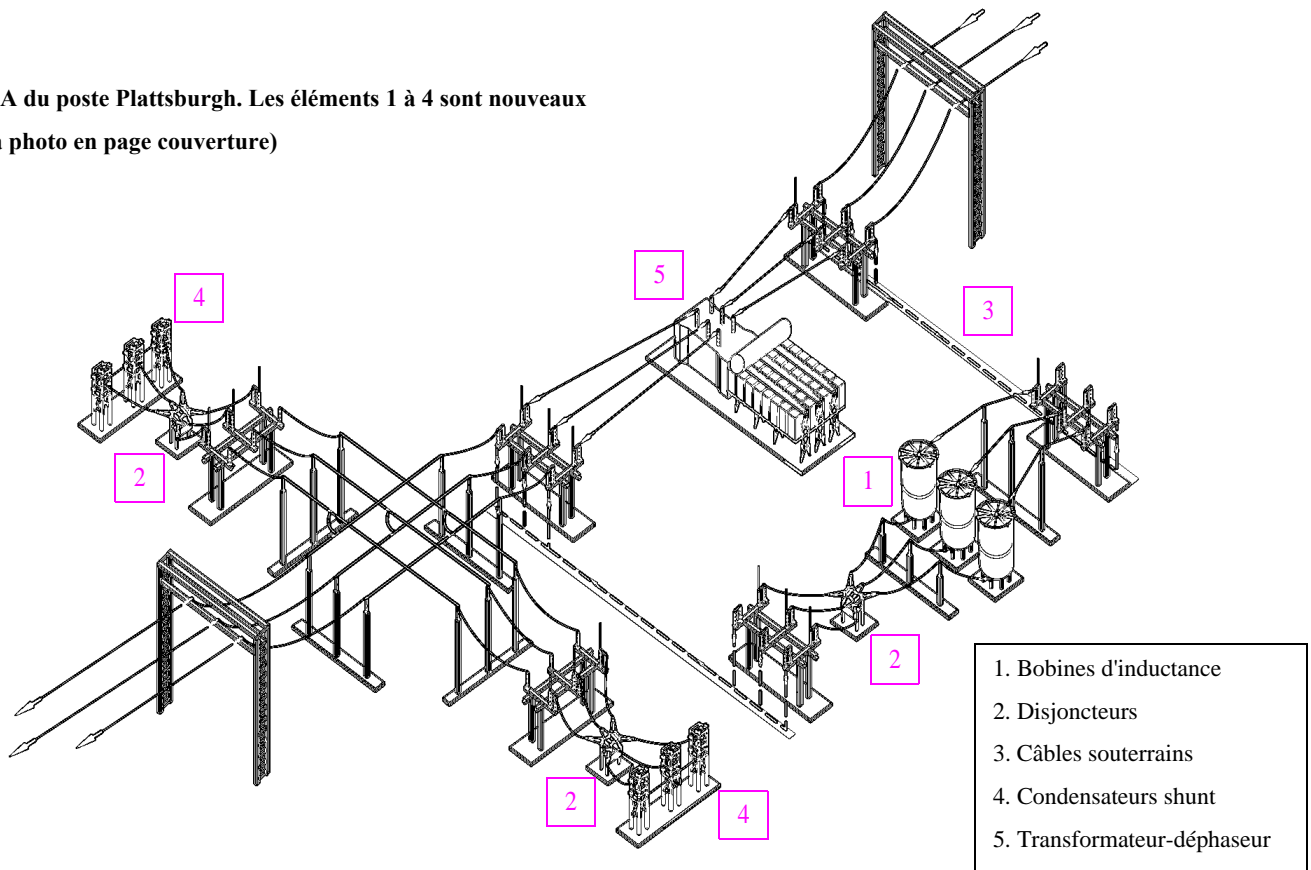


Figure 6: TDA du poste Plattsburgh. Les éléments 1 à 4 sont nouveaux  
(Voir aussi la photo en page couverture)



Les deux batteries de condensateurs shunt ne font pas partie du transformateur-déphaseur assisté. Elles sont cependant nécessaires au support de la tension et font donc partie du projet. La conception et la réalisation du projet de Plattsburgh ont été menées par la Division Systèmes d'ABB Canada.

Après un an d'exploitation du transformateur-déphaseur assisté du poste Plattsburgh, on note un accroissement du transit total d'énergie de 77 GWh (+ 25,7 %) entre l'été 1997 et l'été 1998. Bien que ces excellents résultats ont été obtenus dans des conditions de marché différentes, il faut souligner que sans l'augmentation de la capacité de transit que procure le transformateur-déphaseur assisté, il eût été impossible de transiter au moins 40 de ces 77 GWh.

## 5.2 Nouvelles installations TDA

Ces deux exemples d'application de transformateurs-déphaseurs assistés sont en fait des applications d'extension de postes existants. Dans le cas d'un projet de poste neuf, il est possible qu'un transformateur-déphaseur de puissance inférieure avec les impédances en parallèle donne une solution RPI plus économique qu'un transformateur-déphaseur classique de pleine capacité. Cela est particulièrement vrai pour les applications exigeant une large plage de régulation de déphasage.

## 6.0 References

- [1]. R. Grünbaum, M. Noroozian, B. Thorvaldsson: FACTS - les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique. Revue ABB 5/99, 4-17.
- [2]. J. Brochu, "Interphase Power Controllers", Polytechnic International Press, Montreal, January 1999.
- [3]. G. Sybille et al: "Simulator demonstration of the interphase power controller technology", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.11, No.4, Oct. 1996, pp 1985-1992.

- [4]. J. Brochu, F. Beauregard, J. Lemay, G. Morin, P. Pelletier, R.S. Thallam, "Application of the interphase power controller technology for transmission line power flow control", IEEE Transactions PWRD, vol 12, no 2, April 1997, pp 888-894.
- [5]. J. Brochu, F. Beauregard, G. Morin, J. Lemay, P. Pelletier, S. Kheir, "The IPC technology - a new approach for substation uprating with passive short-circuit limitation", Paper PE-830-PWRD-04-1997, IEEE/PES 1997 Winter Meeting, Tampa, FL.
- [6]. J. Lemay et al, "The Plattsburgh interphase power controller", IEEE/PES 1999 T&D Conference and Exposition, New Orleans, April 11-16, 1999.

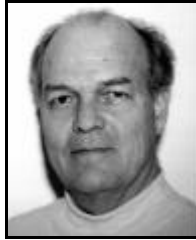
### À propos du CITEQ

Le CITEQ (Centre d'innovation sur le transport d'énergie du Québec) est une entreprise appartenant à Hydro-Québec et à ABB Canada. Ses programmes de R&D portent principalement sur les équipements de transport HT et de distribution, ainsi que pour l'industrie lourde. Ses activités de développement sont étroitement liées à la déréglementation du secteur de l'électricité et aux perspectives d'évolution de ce marché.

L'implantation du CITEQ à Varennes est stratégique : à proximité du site de production ABB de Varennes et de l'IREQ, centre de recherche et d'essais d'Hydro-Québec en technologies de pointe.

## À propos des auteurs

**Jacques Lemay** est consultant dans les domaines du transport de l'énergie électrique, du CCHT et de l'appareillage FACTS. Avant sa retraite d'Hydro-Québec, il était responsable des études d'applications des régulateurs de puissance interphases, qu'on mettait alors au point au CITEQ. Auparavant, il travaillait à la planification du transport chez Hydro-Québec comme coordonnateur technique pour le réseau CC multiterminal Québec/Nouvelle Angleterre de 450 kV, 2000 MW. Titulaire d'un Ph.D., M. Lemay est depuis longtemps membre actif de comités de CIGRÉ et de l'IEEE qui traitent de FACTS, de CCHT et des interactions entre réseaux CA et CC.



**Jacques Brochu** a obtenu son B.Sc.A et sa M.Sc.A en génie électrique de l'Université Laval à Québec en 1981 et en 1986 respectivement, et son Ph.D. de l'École polytechnique de Montréal en 1997. De 1981 à 1983, il a travaillé comme ingénieur de production chez la Compagnie générale électrique du Canada. Depuis 1985, il est ingénieur chercheur à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) où ses travaux portent surtout sur les convertisseurs électriques de puissance et le RPI. Depuis 1990, il œuvre dans la mise au point du RPI au Centre d'innovation sur le transport d'énergie du Québec (CITEQ). Il est co-auteur de plusieurs brevets d'invention et auteur d'un livre sur le RPI.



**François Beaugard** a obtenu son B.Sc.A et sa M.Sc.A en génie électrique de l'École polytechnique de Montréal en 1984 et en 1987 respectivement. Il s'est joint à Hydro-Québec en 1986 et commença sa carrière comme chercheur à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) dans les domaines de l'interférence téléphonique due au CCHT et de la modélisation d'entraînements de moteurs. En 1990, il s'est joint au CITEQ, où il travaille présentement sur les systèmes de contrôle et la modélisation des réseaux. Il est co-auteur de plusieurs brevets d'invention reliés à la conception du régulateur de puissance interphase (RPI).



**Pierre Pelletier** a obtenu son B.A.Sc. en génie électrique de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada en 1969. Il s'est immédiatement joint au groupe d'essais spéciaux à Hydro-Québec où il a été impliqué dans la vérification du comportement du réseau 735-kV. Il a été responsable des essais en chantier ainsi que de l'analyse et des essais d'acceptation pour les premiers compensateurs statiques pour le réseau de transport de la Baie James. Il a aussi été impliqué dans la mise en service de plusieurs installations à courant continu. Il est co-auteur des brevets d'invention sur le RPI. En octobre 1009, il a pris charge de l'équipe de développement de la technologie des RPI au CITEQ. Retraité d'Hydro-Québec depuis mai 2000, il a formé sa propre firme de consultant.

