

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	91 (2000)
<b>Heft:</b>	25
<b>Artikel:</b>	Systèmes de transport adaptatifs : FACTS
<b>Autor:</b>	Pochon, Antoine / Sapin, Alain
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-855643">https://doi.org/10.5169/seals-855643</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 07.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Systèmes de transport adaptatifs: FACTS

## Analyse et performances d'un FACTS de type UPFC dans une ligne de transport haute tension

Les systèmes de transport adaptatifs dits FACTS (Flexible AC Transmission Systems) sont basés sur l'électronique de puissance. Les FACTS permettent une meilleure utilisation des capacités des lignes de transport à haute tension et contribuent à satisfaire les exigences imposées par la libéralisation des marchés de l'électricité. L'Unified Power Flow Controller (UPFC) est une des topologies de la famille des FACTS. Elle se compose de deux parties: la partie parallèle qui permet de maintenir la tension du bus réseau en consommant ou produisant de la puissance réactive, et la partie série qui permet de contrôler le transit de puissance active et réactive en insérant une tension série dans la ligne de transport. Des simulations en régime permanent et en régime transitoire sont effectuées avec le simulateur numérique Simsen afin de vérifier le comportement de l'UPFC.

Durant les dernières années, les échanges d'énergie électrique et la demande d'énergie ont augmenté. Avec la libéralisation du marché de l'électricité, de nouvelles règles apparaissent. Les moyens de transport actuels ne sont pas

### Adresse des auteurs

Antoine Pochon et Alain Sapin, Laboratoire d'électromécanique et de machines électriques, (Prof. J.-J. Simond), Département d'électricité, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne

adaptés à un contrôle simple des tensions et des flux de puissances permettant de satisfaire les exigences de ce nouveau marché. Le développement rapide des semi-conducteurs de puissance a permis le développement de nouveaux systèmes plus adaptatifs tels que les FACTS (Flexible AC Transmission Systems) qui permettent d'optimiser la capacité des réseaux de transport et de diminuer les problèmes de stabilité ou de contrôle des flux de puissances.

### Description de l'UPFC

Le transit des puissances dans une ligne de transport est influencé par trois paramètres: l'impédance de la ligne, l'amplitude des tensions et la différence de phase des tensions à chaque extrémité.

Les FACTS peuvent modifier un ou plusieurs de ces paramètres.

Ils existent deux catégories principales de FACTS: les FACTS parallèles dont la tâche principale est le maintien de la tension et la compensation de la puissance réactive ainsi que les FACTS séries qui permettent le contrôle des flux de puissance dans la ligne de transport. De plus amples informations concernant les FACTS et leurs applications peuvent être trouvées dans [1, 2, 3].

Une des topologies particulières est le Unified Power Flow Controller (UPFC). L'UPFC est la combinaison d'un FACTS parallèle et série ayant un circuit intermédiaire à tension continue en commun. La figure 1 représente la topologie de base

d'un UPFC à trois niveaux connecté à l'extrémité d'une ligne d'un réseau haute tension.

La partie série est connectée à la ligne de transport par l'intermédiaire d'un transformateur série, insérant une tension  $U_{SE}$  permettant de modifier les puissances actives  $P$  et réactives  $Q$ .

La partie parallèle quant à elle est connectée à la ligne par un transformateur classique, permettant d'injecter un courant réactif dans l'extrémité de la ligne.

Ils existent deux configurations d'UPFC: les configurations à deux et à trois niveaux; le principe de fonctionnement est le même, mais la différence se situe principalement au circuit intermédiaire à tension continue. La tension continue de l'UPFC à deux niveaux est fournie par un seul condensateur alors que celle de la variante à trois niveaux est fournie par deux condensateurs. Le nombre de semi-conducteurs de la configuration à trois niveaux est par conséquent plus élevé.

Le principe de fonctionnement d'un UPFC est représenté schématiquement à la figure 2, où la partie série est une source de tension et la partie parallèle une source de courant.

Le but principal du FACTS parallèle est de maintenir un profil de tension plat dans le réseau auquel il est connecté et par conséquent de diminuer le flux de puissance réactive dans la ligne. Il peut consommer ou produire de la puissance réactive afin de maintenir la tension du jeu de barres à l'extrémité de la ligne à une valeur donnée. Il se comporte comme une charge capacitive si la tension est

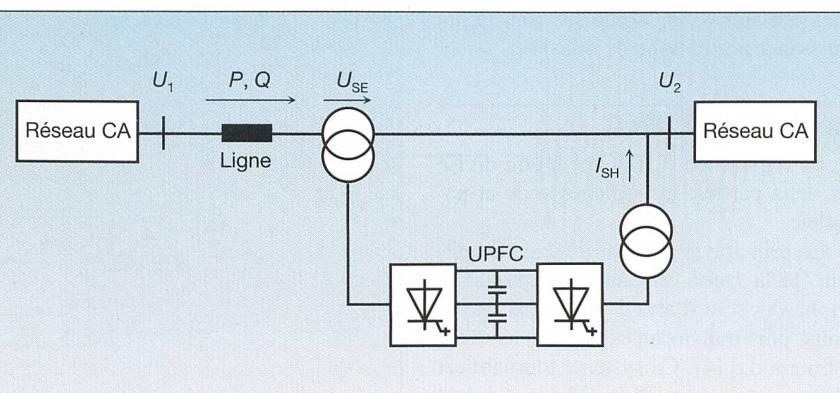


Fig. 1 Topologie de base de l'UPFC

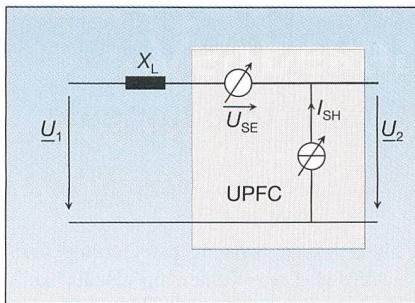


Fig. 2 Schéma de principe

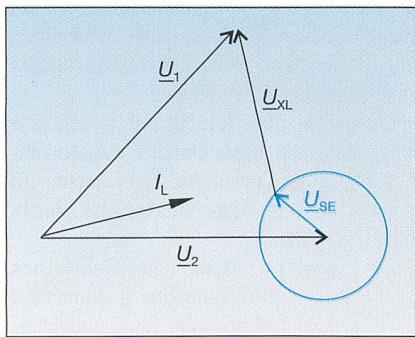


Fig. 3 Diagramme des tensions

trop basse et comme une charge inductive si la tension est trop élevée.

La tâche du FACTS série est le contrôle des flux de puissance sur la ligne de transport.

La puissance active transitant sur une ligne de transport sans FACTS est déterminée par l'équation suivante:

$$P_{12} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L} \cdot \sin(\Theta_1 - \Theta_2) \quad (1)$$

Les puissances transitant sont dépendantes de la configuration du réseau haute tension et la modification du flux des puissances n'est possible que par un changement de cette configuration.

Le FACTS série, par l'insertion d'une tension variable  $U_{SE}$  dans la ligne, modifie le diagramme des tensions comme le montre la figure 3. De ce fait, il permet de contrôler dans une certaine mesure et de manière simple et rapide les transits de puissance sur la ligne de transport.

## Réglage de l'UPFC

Le réglage de l'UPFC peut être divisé en deux parties: les réglages série et parallèle.

Le principe général du réglage est défini de la façon suivante: les grandeurs triphasées sont d'abord exprimées en per units, puis transformées dans un système tournant d,q [4]. Ce système tournant est obtenu avec une PLL (Phase Locked Loop) ayant comme référence la tension

du bus de l'extrémité de la ligne. Cette transformation de coordonnées permet de simplifier le traitement car les grandeurs sinusoïdales deviennent des grandeurs continues. Il est dès lors possible d'utiliser des régulateurs standards de type PI.

Le schéma général de réglage est représenté à la figure 4. Le principe de réglage est similaire à celui réalisé dans [5].

Le réglage série permet le contrôle des puissances actives et réactives transitant dans la ligne de transport. Les courants de ligne sont mesurés et transformés dans le référentiel tournant d,q. Ils sont ensuite comparés aux consignes de courants dans un régulateur PI. Ce réglage fournit les tensions de commande qui vont piloter l'onduleur afin de fournir la tension série désirée. Le réglage peut être fait de manière découpée: l'axe d règle la puissance active et l'axe q la puissance réactive.

Le réglage parallèle a deux fonctions: le contrôle de la tension du jeu de barres et le contrôle de la tension continue du circuit intermédiaire de l'UPFC. Un découplage est également réalisé: l'axe d permet le contrôle de la tension continue de l'onduleur  $U_e$  et l'axe q la tension du bus. Les deux tensions sont comparées avec leur valeur de consigne dans un ré-

glage superposé qui fournit les consignes des courants à injecter dans la ligne. Un réglage interne de courant va ensuite fournir les tensions de commande de l'onduleur parallèle. La commande des deux onduleurs est réalisée en utilisant la modulation PWM (Pulse Width Modulation) [6]. Si la variante trois niveaux est utilisée, un contrôle de l'égalité des tensions continues des deux condensateurs du circuit intermédiaire doit également être réalisé.

## UPFC «trois niveaux»

Un UPFC trois niveaux a été implémenté dans le programme de simulation Simsen.

La figure 5 représente la topologie de l'UPFC trois niveaux. Les deux onduleurs ont quatre semi-conducteurs (de type GTO, IGCT, etc.) dans chaque branche au lieu de deux dans la variante deux niveaux. La tension DC, fournie par les deux capacités en série, permet d'avoir un point neutre. Les avantages de la variante trois niveaux sont d'une part une moins grande contrainte en tension des semiconducteurs et d'autre part une diminution de la distorsion harmonique de la tension de sortie des onduleurs.

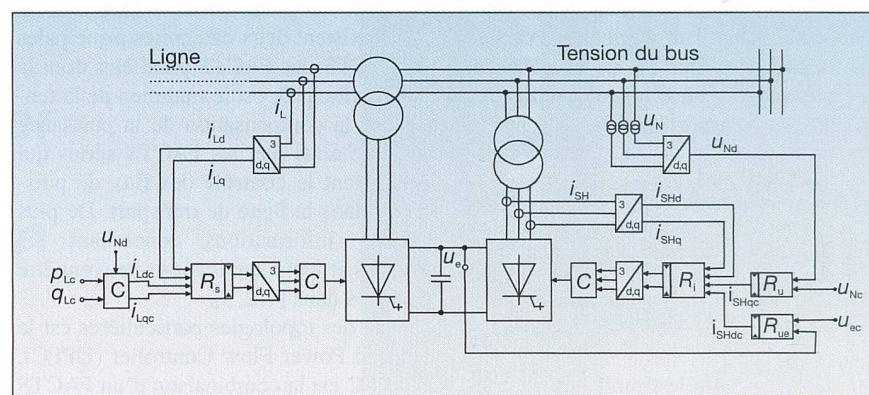


Fig. 4 Schéma général de réglage

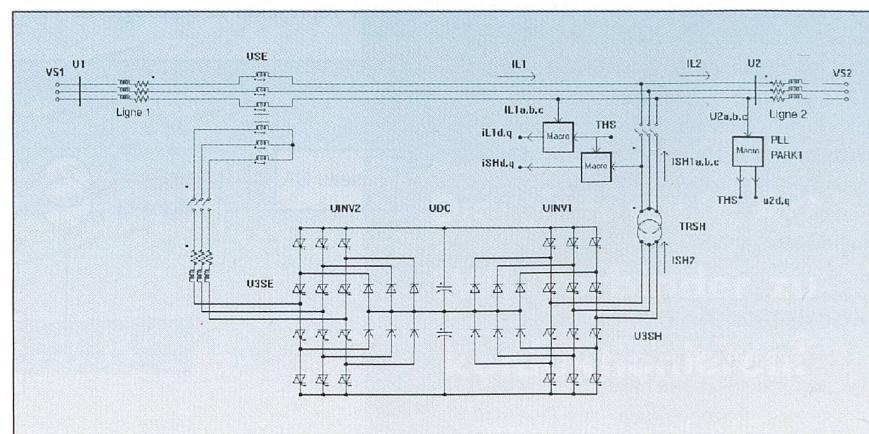


Fig. 5 Schéma de l'UPFC trois niveaux dans le simulateur Simsen

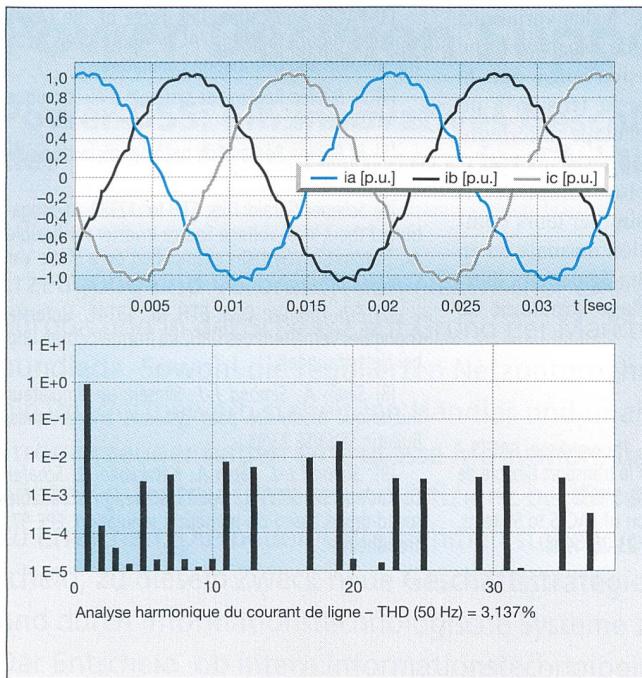


Fig. 6 Analyse harmonique du courant dans la ligne

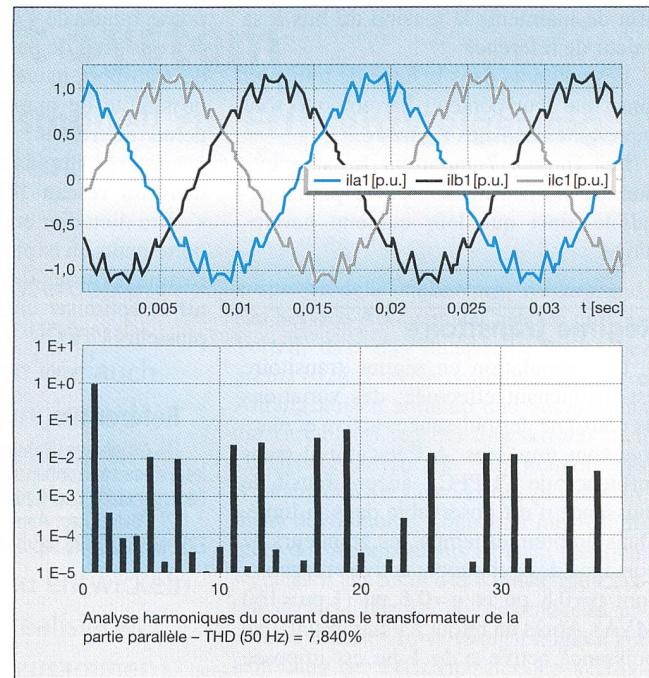


Fig. 7 Analyse harmonique du courant dans le transformateur parallèle

Une étude du comportement de l'UPFC trois niveaux a également été faite dans [7].

### Simulateur Simsen

Le logiciel Simsen [8,9] qui a été utilisé pour cette étude est un simulateur numérique modulaire pour systèmes énergétiques en développement depuis dix ans au laboratoire d'électromécanique et des machines électriques (LEME) du département d'électricité de l'EPFL. De plus amples informations concernant ce logiciel de simulation peuvent être trouvées à l'adresse suivante:

<http://simsen.epfl.ch>.

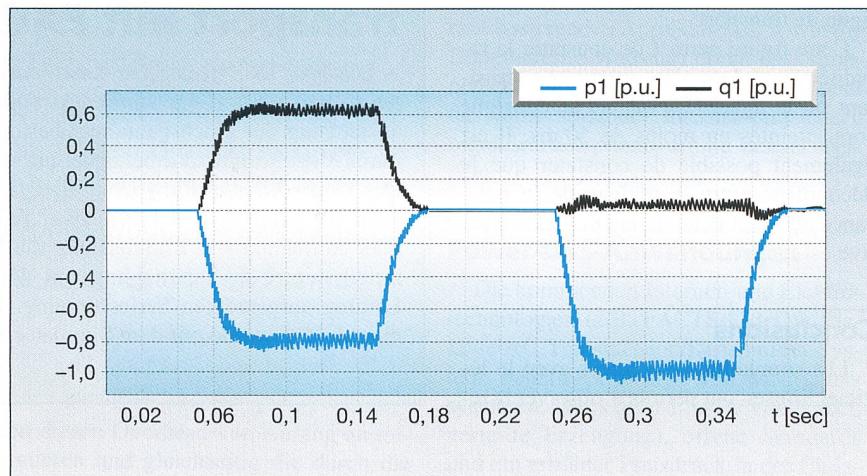


Fig. 8 Puissances actives et réactives dans la ligne

### Résultats

Les simulations effectuées ont permis d'illustrer le comportement de l'UPFC trois niveaux en régime permanent et transitoire.

Les grandeurs nominales sont les suivantes: tension de la ligne de transport: 400 kV, fréquence: 50 Hz, puissance de l'UPFC: 160 MVA, tension continue du circuit intermédiaire: 6 kV.

### Régime permanent

Un flux de puissance active de 160 MW est imposé dans la ligne de transport.

Dans le même temps, la partie parallèle doit fournir une puissance réactive

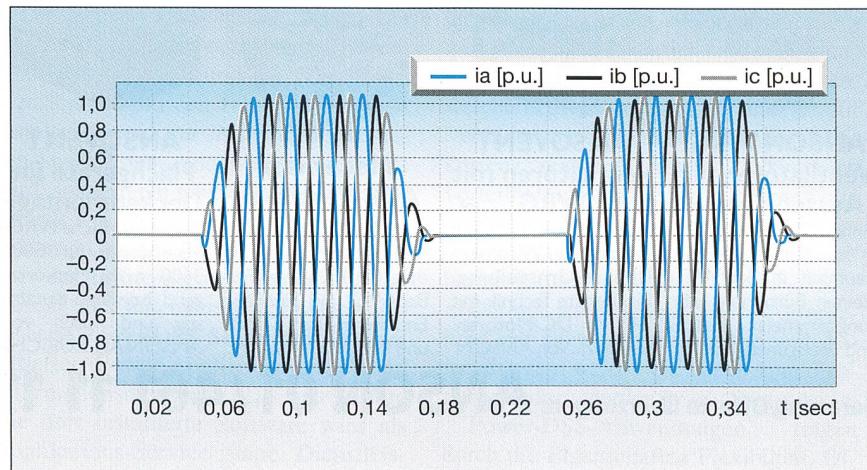


Fig. 9 Courants dans la ligne

## Transport de l'énergie

afin de maintenir la tension du bus à sa valeur de référence.

Les courants dans la ligne de transport ainsi que leur contenu harmonique sont représentés dans les figures 6.

Les figures 7 montrent les courants dans le transformateur de la partie parallèle ainsi que leur contenu harmonique.

### Régime transitoire

Une simulation en régime transitoire est maintenant effectuée: des variations de consigne des puissances active et réactive sont imposées. A l'état initial (sans influence de l'UPFC), aucun transit de puissance n'est observable dans la ligne. Dans un premier temps, les grandeurs de consigne des puissances active et réactive sont  $p=0,8$  pu et  $q=0,6$  pu (1 pu = 160 MVA). Après un retour à l'état initial, une puissance active  $p$  de 1 pu est imposée alors que la puissance réactive  $q=0$ . La fin de la simulation est un retour à l'état initial.

La figure 8 représente la mesure des puissances actives et réactives dans la ligne de transport.

Cette figure permet de constater la rapidité du réglage des puissances transistant sur la ligne. Les valeurs de consigne sont atteintes en moins de 50 ms. Il est également possible de constater que le découplage entre le réglage de la puissance active et celui de la puissance réactive est réalisé.

### Conclusions

Les simulations effectuées avec le logiciel Simsen ont permis d'observer la ré-

ponse rapide de l'UPFC à des variations de consignes de puissance dans une ligne de transport haute tension ainsi que la possibilité de maintenir la tension à un nœud du réseau. Une étape ultérieure consistera à implémenter plusieurs UPFC dans un réseau HT plus complexe. Il s'agira d'étudier et de simuler leurs comportements en exploitation normale ou en régime perturbé; il faudra également définir et optimiser un réglage simultané de plusieurs UPFC.

[3] FACTS Application Task Force of the FACTS Working Group 15.05.15. FACTS Applications, IEEE Transmission and Distribution Committee.

[4] H. Bühlert: Réglage de systèmes d'électronique de puissance, Vol. 1.

[5] H. Bühlert: Réglage de systèmes d'électronique de puissance, Vol. 3.

[6] Scheuer Gerald: Diss. ETH Nr. 12389, Investigation of the 3-level Voltage Source Inverter for flexible AC-Transmission Systems exemplified on a Static Var Compensator.

[7] Erb Thomas: Diss. ETH Nr. 13141, Untersuchung des Verhaltens des UPFC im Normalbetrieb und bei Netztörungen.

[8] Sapin A., Simond J.-J.: Simsen, un simulateur numérique modulaire pour systèmes énergétiques, Bulletin SEV/VSE 23/93

[9] Simond J.-J., Sapin A., Kawkabani B., Schafer D., Tu Xuan M., Willy B.: Optimized design of variable speed-drives based on numerical simulation, EPE 97, Trondheim.

### Références

[1] Grünbaum, Noroozian, Thorvaldsson: FACTS – les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique. Revue ABB 5/1999.

[2] Povh Dusan: Application of FACTS to Systems, EPSOM 98, Zürich, September 23–25, 1998.

## Lastflussregelung beim Energie-transport mit FACTS

Die FACTS-Systeme zur Lastflussregelung (Flexible AC Transmission Systems) beruhen auf Leistungselektronik. Sie erlauben eine bessere Kapazitätsausnutzung der Hochspannungsübertragungsleitungen und tragen dazu bei, die durch die Strommarktliberalisierung entstehenden Bedürfnisse zu befriedigen. Der Unified Power Flow Controller (UPFC), eine Geräteanordnung aus der Familie der FACTS, besteht aus zwei Teilen: der Parallelteil kann durch Erzeugen oder Aufnahme von Blindleistung die Spannung des Netzbusses halten, der Seriienteil steuert die Übertragung von Wirk- und Blindleistung mit Hilfe einer Leitung aufgeprägten Seriespannung. Das statische und dynamische Verhalten eines UPFC wurde mit dem Simulator Simsen überprüft.

## Von ANSON die Ventilatoren mit Wärmerückgewinnung (WRG) und Frischluftzufuhr:



**ANSON WRG**  
Ventilatoren für  
Aussenwand –

Einbau 230 V 50–1200 m<sup>3</sup>/h. Für tadellose Raumluft in Bad/WC, kleinen Büros und Sitzungszimmern. Rasch und preisgünstig von:



**ANSOVENT**  
Ventilatoren mit  
WRG

mit automatischer  
Sommer/Winter-  
Bypass-Umstellung.  
Modernste Technik mit  
24 V DC-Motoren.  
400 m<sup>3</sup>/h. Von ANSON.



**Modernste**  
**ABB Ventilato-  
ren mit WRG**

4 Rohrabschlüsse 80 mm Ø. 400 m<sup>3</sup>/h. Für Bad/WC und Küchen-Entlüftung im STVE und EFH. Von ANSON.



**ANSOVENT**  
Flachgeräte für  
Deckenmontage

Besonders flache WRG-Ventilatoren für 500–3600 m<sup>3</sup>/h. Hervorragend bewährt. Kurzfristig und rasch von ANSON AG ZÜRICH.



**Grosse WRG**  
Ventilatoren

modernster Bauart von 3000–10000 m<sup>3</sup>/h für Läden, Restaurants, Fabrikräume. Wir haben Erfahrung und liefern rasch und preisgünstig.



**WRG Ventilato-  
ren energiespa-  
rend betreiben**

mit modernsten Steuerungen von **ANSON**. Manuell oder zeit- und temperaturabhängig. Wir sind Spezialisten.

Beratung/Offerte überzeugen: **ANSON 01/461 11 11**

