

# Rendement plus élevé par une technique de turbines à vapeur moderne

**Au cours des dernières années, les progrès réalisés en technologie des matériaux, le développement rapide des programmes de calcul et des profils d'aubages, ainsi que des procédés de fabrication modernes ont permis de réaliser une amélioration continue du rendement des turbines à vapeur. Ce faisant, les turbines à vapeur ABB atteignent aujourd'hui des rendements de plus de 45%. Ces turbines sont conçues et dimensionnées pour des puissances atteignant 1000 MW, une vapeur vive de 250-300 bar à 580 °C, ainsi que pour une température de resurchauffe de 600 °C. Elles peuvent être adaptées sans difficultés aux besoins spécifiques des exploitants de centrales thermiques. Le maintien de principes de construction éprouvés offre la garantie d'une fiabilité et d'une disponibilité élevées.**

Le rendement des centrales énergétiques peut être amélioré par une élévation des paramètres de la vapeur vive et de resurchauffe, ainsi que par l'utilisation de géométries performantes à faibles pertes pour les aubages des turbines.

Le premier objectif, à savoir l'élévation des paramètres de la vapeur, s'atteint principalement par le choix approprié des matériaux qui entrent en contact avec la vapeur vive ou de resurchauffe, en conservant les concepts de construction éprouvés. Dans le cadre d'un programme communautaire, on a développé des aciers qui fournissent un comportement de fluage sous contrainte fortement amélioré à des températures atteignant 600 °C. Ces aciers se prêtent particulièrement à la fabrication de composants importants.

En même temps, on a réussi à améliorer décisivement le rendement de la turbine par l'optimisation des profils et de la géométrie des aubes. A cet effet, on a choisi une approche combinée du problème. On a d'une part recherché les possibilités d'optimisation théorique par des études numériques appliquées à la dynamique des fluides. D'autre part, on a confirmé les solutions trouvées par des études expérimentales effectuées sur des modèles réduits et en grandeur nature.

tales effectuées sur des modèles réduits et en grandeur nature.

## Caractéristiques constructives des turbines à vapeur ABB modernes

Des concepts de construction progressistes et quelques caractéristiques constructives spéciales participent fortement au fait que les turbines ABB se prêtent particulièrement bien à l'utilisation sous des conditions de vapeur extrêmes.

A titre d'exemple, sur toutes les turbines, l'alimentation de la vapeur est conçue sous forme de spirale. De cette manière, on obtient un écoulement de vapeur à faibles pertes dans la zone d'admission et un flux de masse optimal vers le premier étage d'aubes radiales-axiales. Le concept du premier étage d'aubes radiales permet une réduction de la zone d'admission, ce qui se répercute favorablement sur la longueur to-

tales du turbogroupe. En complément, on réduit la sollicitation thermique de l'arbre dans cette zone.

Par la construction à deux cylindres, il est possible de répartir la différence de pression et de température sur deux enveloppes, ce qui fournit une épaisseur de paroi optimale pour le cylindre extérieur et une disposition idéale des brides. Les deux enveloppes sont réalisées simplement sous forme de cylindres.

Le cylindre intérieur de la turbine haute pression (HP) est subdivisé axialement et tenu par des bagues frettées. Une telle liaison fournit un cylindre intérieur à symétrie de révolution. Celui-ci est fixé axialement au niveau de l'admission de la vapeur, à la hauteur du joint de séparation du cylindre extérieur.

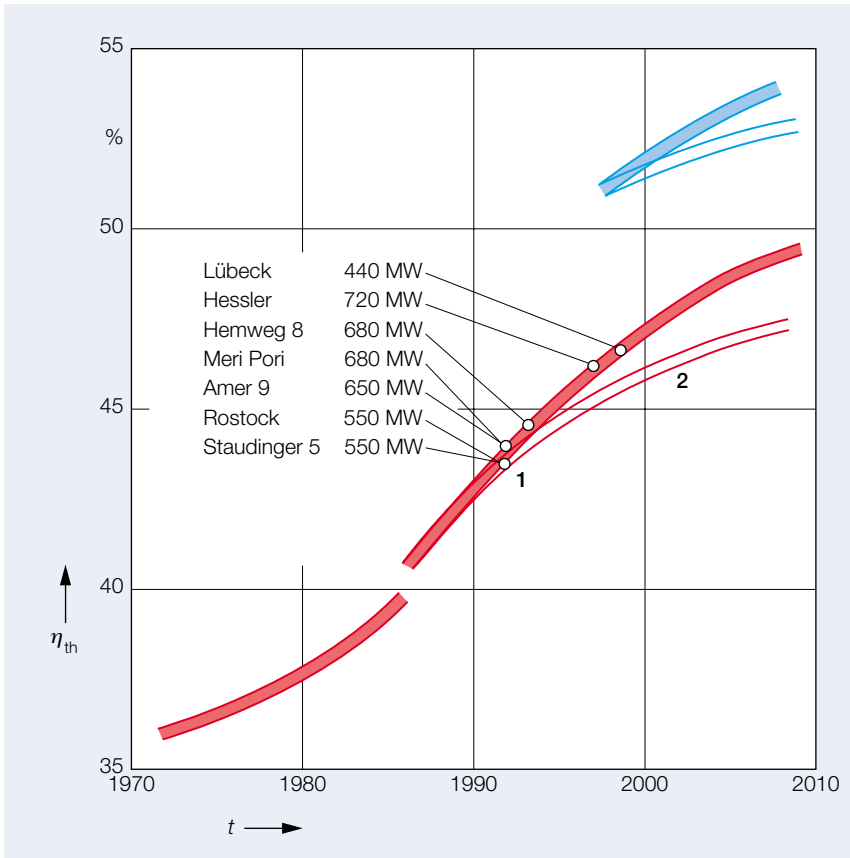
Les rotors des turbines sont portés chaque fois par un seul palier entre les différentes turbines partielles, ainsi qu'entre la dernière turbine basse pression (BP) et l'alternateur. Le nombre réduit de paliers fournit une construction plus courte avec des vitesses de rotation critiques et des charges de paliers définies univoquement.

Conformément à une technique appliquée depuis plus de 60 ans, les rotors des turbines sont constitués de pièces forgées assemblées par soudage. A l'heure actuelle, plus de 4000 arbres de turbines de ce type sont en service. L'avantage de cette conception réside dans le fait qu'on n'utilise que des pièces forgées relativement petites et légères, et donc faciles à réaliser et à contrôler. Les sollicitations thermiques restent faibles et les contraintes sont réparties régulièrement. Ce faisant, on assure une bonne flexibilité thermique au démarrage, à l'arrêt et lors des changements de charge.

Les aubes mobiles et les aubes fixes des parties haute et moyenne pression sont fabriquées en une seule pièce, c'est-à-dire que le pied de l'aube et la bande de recouvrement sont fraisés dans la masse. On obtient ainsi une exécution très robuste, également appropriée au travail en deux équipes. Cette construction se distingue par sa fiabilité élevée et par la rapidité et la simplicité du montage et du démontage. Au montage, les aubes sont pré-tendues élastiquement, de manière à réduire au minimum leur vibration en exploitation.

**Dr Brendon Scarlin**

ABB Production d'énergie SA



**Augmentation du rendement de centrales thermiques à charbon avec procédé de vapeur haute température, rapporté au pouvoir calorifique inférieur** 1

$\eta_{th}$  Rendement thermique, y compris les installations de désulfuration et dénitrification

Rouge Procédé à vapeur haute température

Bleu Installation à cycle combiné avec turbine à gaz (gaz naturel) et procédé de vapeur à haute température

- 1 Nouvelle génération d'installations mises en service à une date récente. Paramètres de la vapeur: 250 bar/540°C/560°C en resurchauffe
- 2 Procédé haute température; matériaux utilisés: St 10TS, fonte d'acier 10T. Paramètres de la vapeur: 270 bar/580°C/600°C en resurchauffe

**Possibilités d'amélioration du rendement**

L'augmentation du rendement est d'environ 0,5% par 10°C d'élévation de température de la vapeur vive (VV) et de la resurchauffe (RS) et de 0,2% par 10 bar d'augmentation de pression de la vapeur. D'autres mesures, telles que l'utilisation d'aubages de haute performances (HPB), fournissent également des améliorations supplémentaires.

L'illustration 1 montre les améliorations de rendement qui ont été réalisées au cours des dernières années dans quelques centrales à vapeur européennes modernes

à charbon. On peut y constater une croissance remarquable d'environ 0,5% par année [1, 2].

La figure 2 illustre le schéma et le bilan thermique d'une centrale électrique à charbon équipée d'une turbine à vapeur haute pression et qui fournit un rendement d'installation net de 46%.

Les possibilités du procédé à vapeur surcritique avec un préchauffage à 9 étages utilisent optimalement la température finale de l'eau d'alimentation d'env. 300°C. Ceci s'obtient par un point de soutirage dans le secteur de l'aubage de la turbine HP – un concept déjà appliqué avec suc-

cès dans de nombreuses installations à 8 préchauffeurs.

Les paramètres de vapeur élevés sont essentiellement rendus possibles par le choix de matériaux nouvellement développés pour les pièces en contact avec la vapeur vive et de resurchauffe. Par contre, la construction ayant fait ses preuves par le passé des turbines et des chaudières est restée inchangée.

**Développement de matériaux pour des composants de turbines hautement sollicités**

Lors de la prochaine étape vers des centrales thermiques à vapeur plus efficaces, il a fallu trouver des aciers ferritiques de forgeage et de coulée à résistance au fluage sous contrainte plus élevée pour la fabrication des principaux composants.

Parmi les composants essentiels sollicités par des conditions de vapeur plus élevées, mentionnons:

- les rotors HP et MP forgés
- les bâtis coulés de soupapes et les cylindres de turbines
- les conduites de vapeur vive

Les nouveaux aciers ferritiques devaient donc posséder de meilleures propriétés mécaniques, avec une usabilité analogue ou simplifiée (par ex. par coulée, forgeage, pliage et soudage). Il s'agissait par exemple d'obtenir la même résistance au fluage sous contrainte à 600°C qu'autrefois à 565°C.

Bien que les conditions qui régissent dans la microstructure d'acier à haute résistance au fluage sous contrainte soient bien connues, les propriétés effectives des matériaux ne peuvent être déterminées que par des essais d'endurance. La mission difficile des ingénieurs en matériaux consistait donc à développer de nouveaux aciers ferritiques pour les composants critiques. Ces aciers devaient présenter une résistance au fluage sous contrainte plus élevée, afin d'assurer la sûreté de l'exploitation lors de l'utilisation de vapeur de température et de pression plus élevées. Ces travaux ont été accomplis dans le cadre d'un programme de développement de matériaux, auquel plusieurs fabricants de turbines à vapeur, ateliers de forge et de coulées, ainsi que plusieurs entreprises d'électricité et instituts de recherche avaient prêté leur concours [3-5].

Après l'examen critique des types d'acier existants avec 9–12% de Cr, des développements les plus récents dans le domaine de fabrication d'acier en Europe et des travaux de développement dans d'autres parties du monde, quelques alliages ont été sélectionnés à titre de candidats possibles. Des coulées d'essai ont été élaborées avec les types d'aciers retenus. Ces échantillons ont ensuite été soumis à différents traitements thermiques, afin d'optimiser leurs propriétés.

Les alliages les plus prometteurs ont été choisis pour acquérir de l'expérience

en fabrication de composants de grandeur nature. Dans le cadre de ce programme, on a fabriqué jusqu'ici trois pièces forgées pour rotor et un bâti de soupape. Ces pièces ont été soumises à un essai destructif approfondi, d'une part pour constater des ségrégations et des modifications des propriétés à l'intérieur des pièces et de la microstructure, et d'autre part pour déterminer leur comportement à long terme. Dans un tel cas, des essais d'endurance de jusqu'à 100 000 heures sont d'importance majeure. Ces essais permettent d'éviter les incertitudes

qui se produisent inmanquablement lors de l'extrapolation des résultats d'essais de courte durée. Une telle procédure est particulièrement importante en cas d'aciers alliés très complexes.

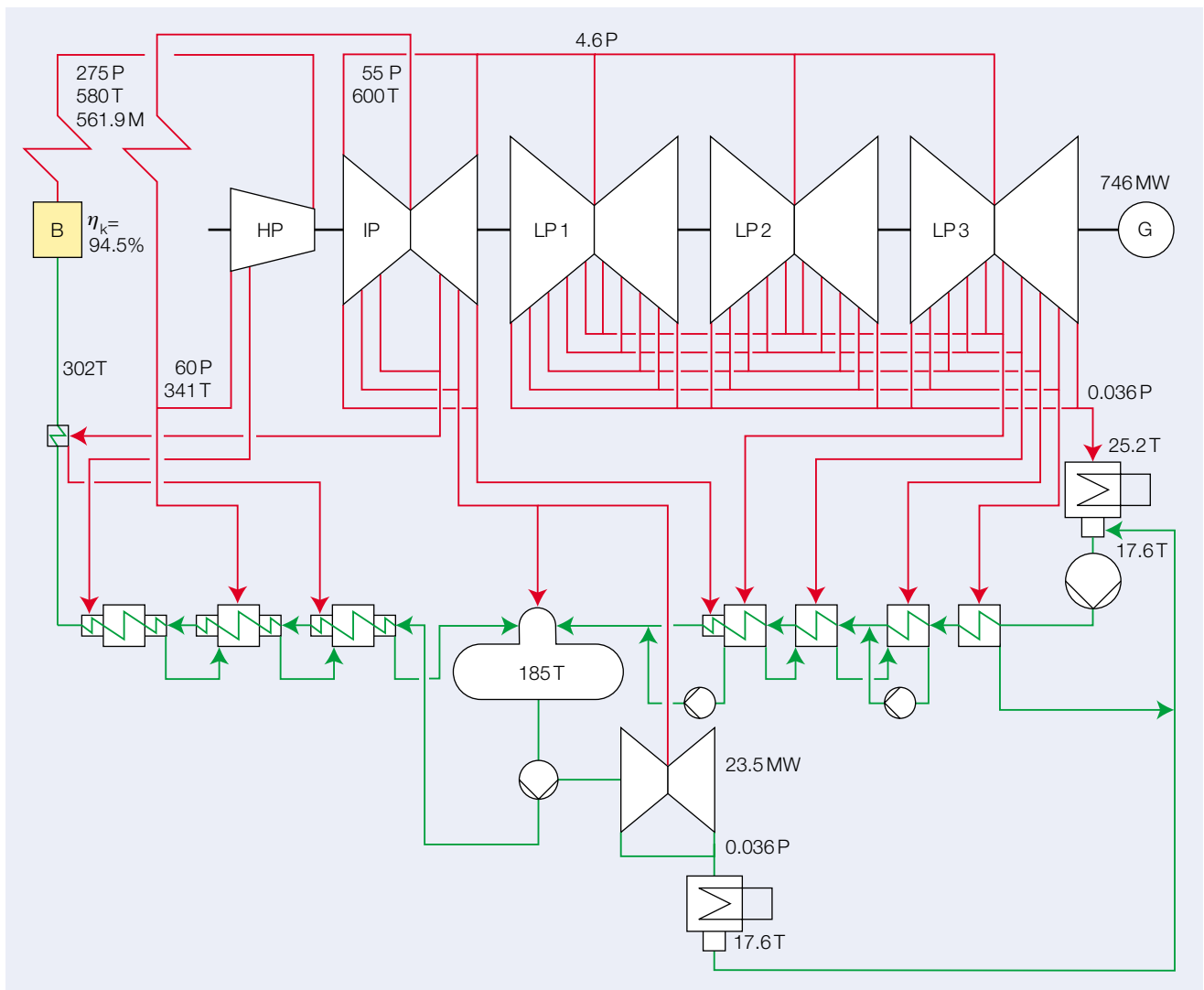
Le but du programme de recherche consistait à développer des aciers pour des pièces coulées et forgées avec les propriétés suivantes:

- Résistance au fluage sous contrainte d'env. 100MPa pendant 100 000 heures à 600°C
- Trempe à coeur jusqu'à un diamètre d'au moins 1,2m pour des pièces for-

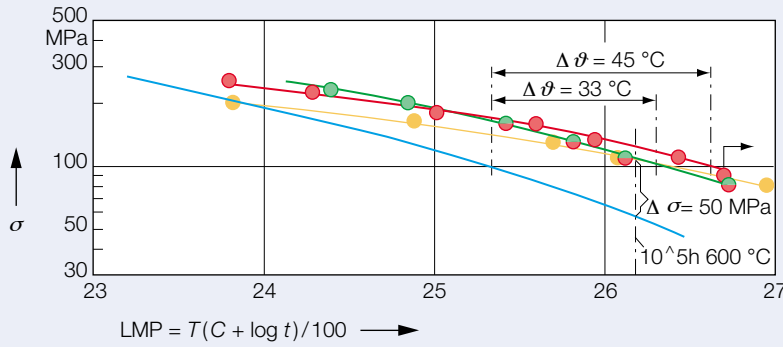
**Schéma et bilan thermique d'une centrale thermique à charbon, équipée de turbines à vapeur haute température**



Combustible	Houille avec un pouvoir calorifique inférieur de 29 300 kJ/kg	B	Chaudière	P	Pression en bar
Puissance nette totale	712 MW	HP	Turbine haute pression	T	Température en °C
Rendement thermique net $\eta_{th}$	46,0%	IP	Turbine moyenne pression	M	Débit massique en kg/s
		LP	Turbine basse pression	$\eta_k$	Rendement de la chaudière
		G	Alternateur		



St	C	Cr	Mo	W	V	Nb	N	B	Rp. 0.2 RT
X 21 Cr Mo V 121	0.23	12	1.0	—	0.30	—	—	—	min. 600 MPa
X 12 Cr Mo V Nb N 101	0.12	10	1.5	—	0.20	0.06	0.05	—	~ 600 MPa
X 12 Cr Mo W V Nb N1011	0.12	10	1.0	1.0	0.20	0.06	0.05	—	~ 700 MPa
X 18 Cr Mo V Nb B 91	0.18	9.3	1.5	—	0.27	0.06	—	0.01	~ 650 MPa



**Résistance au fluage sous contrainte des aciers de forgeage améliorés avec 10% Cr, en comparaison de l'acier de forgeage usuel du commerce avec 12% CrMoV** 3

St	Acier	T	Température en °C
Rp 0,2 RT	Limite d'allongement de 0,2% à température ambiante	C	Constante
σ	Résistance au fluage sous contrainte	t	Temps en h
LMP	Paramètre de Larson-Miller	Δθ	Différence de température en °C

gées et jusqu'à une épaisseur de paroi de 500mm pour les pièces coulées

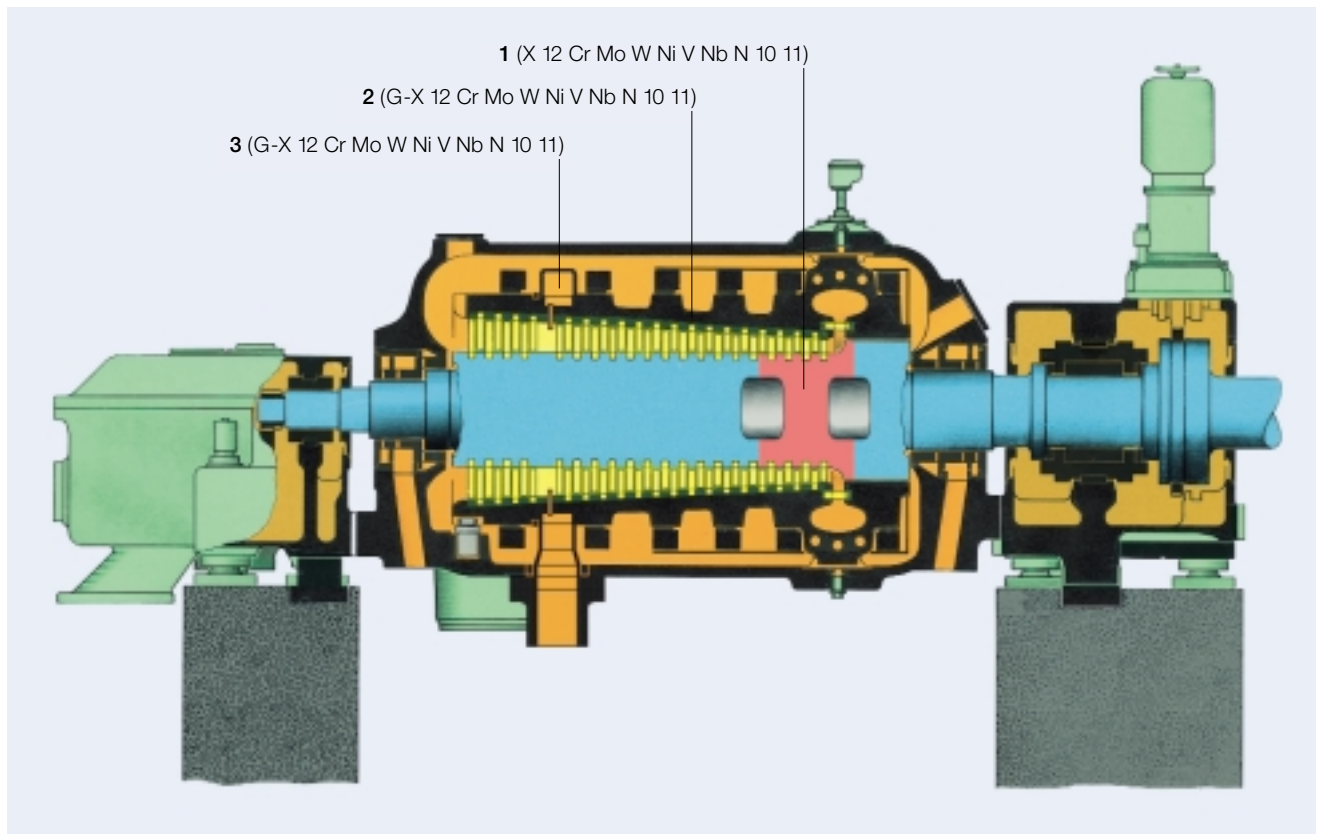
- Bonnes aptitudes de coulée et de soudage

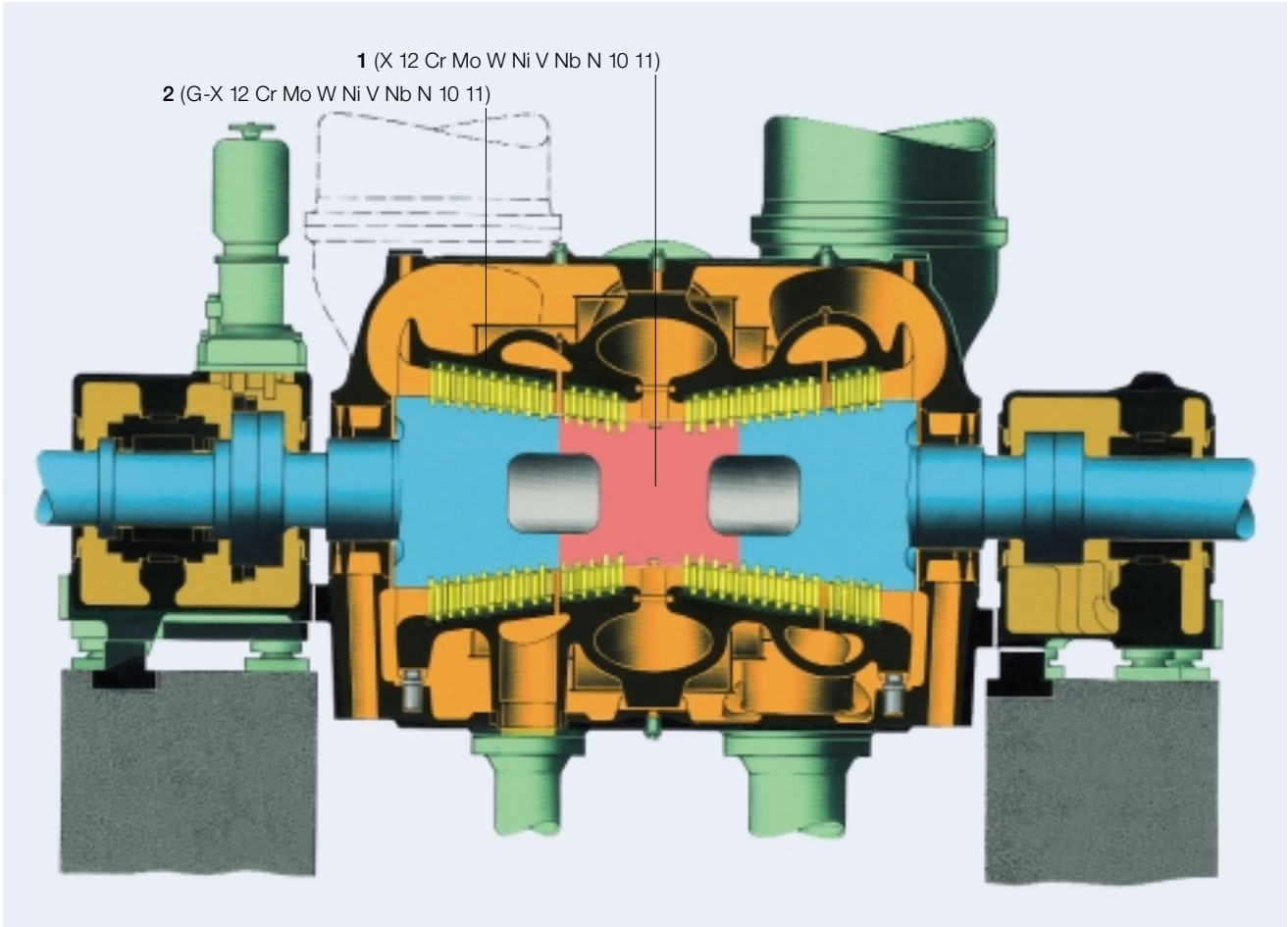
La figure 3 montre la comparaison de la résistance au fluage sous contrainte des aciers de forgeage améliorés avec 10% de Cr et des aciers usuels avec 12% de Cr selon la fiche technique SEW 555 (norme allemande). Les résultats disponibles à ce jour des essais d'endurance à des températures de 550 à 650°C et d'une durée de plus de 60000 heures témoignent d'une amélioration considérable de la résistance au fluage sous contrainte à 600°C et une durée d'essai de 100000 heures. Actuellement, ABB utilise ces aciers alliés au tungstène et au molybdène pour toutes les turbines à vapeur surcritique.

Dans la première phase du programme de développement pour pièces coulées, on a examiné deux variantes, l'une d'elles avec 1% de molybdène (Mo) et l'autre avec 1% de tungstène (W) en complé-

**Coupe longitudinale d'une turbine haute pression avec indication des matériaux utilisés. Cette turbine n'a pas de recharge par soudage de métal d'apport. Elle travaille sans vapeur de refroidissement.** 4

- 1 Entrée du rotor HP
- 2 Cylindre intérieur HP
- 3 Soutirage HP





**Coupe longitudinale d'une turbine moyenne pression avec indication des matériaux utilisés. Elle travaille sans vapeur de refroidissement.**

5

1 Entrée du rotor MP

2 Cylindre intérieur MP

ment. La résistance au fluage sous contrainte la plus élevée a été obtenue par la variante à 1% de W. Jusqu'à ce jour, la durée d'essai la plus longue a atteint env. 50000 heures. En se fondant sur les résultats disponibles actuellement, on peut prévoir une résistance au fluage sous contrainte d'env. 100 MPa à 600 °C pendant 100000 heures.

ABB a intégré ce type d'acier dans son système de normes internes et prescrit son utilisation pour les turbines à vapeur surcritique. Pour les turbines à vapeur à haute température actuellement commandées, le bâti de soupape ainsi que les cylindres HP et MP intérieurs et extérieurs sont fabriqués avec cet acier.

Le nouvel acier T91/P91 (X10 CrMo VNb 91) prévu pour les tuyaux et les conduites a été développé par l'Oak

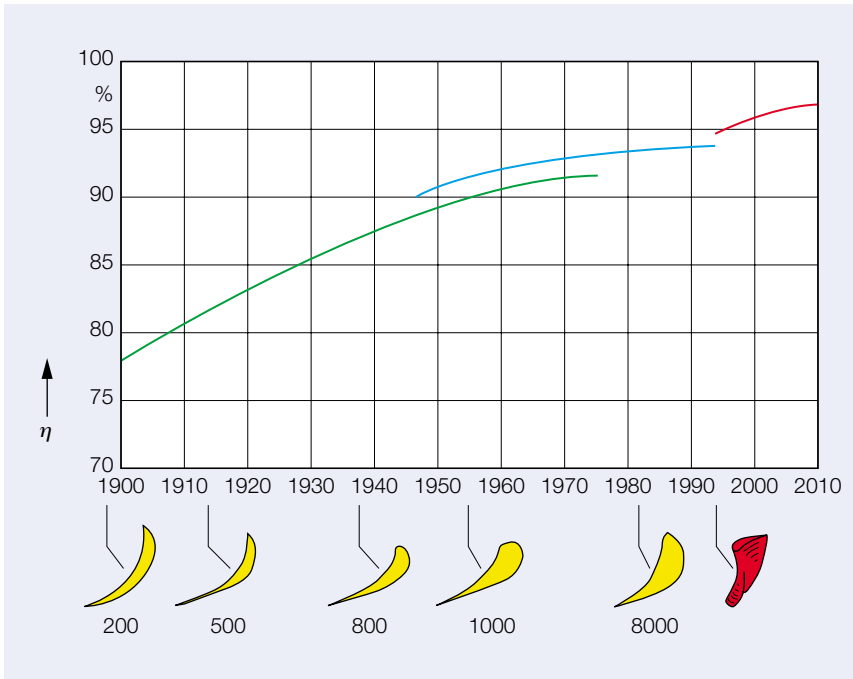
Ridge National Laboratory, USA. Aux USA, il s'utilise de manière standard (Code ASME). Pour déterminer des valeurs d'endurance à des fins de dimensionnement, on a procédé à des essais d'endurance de longue durée. Dans les programmes d'essai européens, des durées d'essai de plus de 70000 heures ont été enregistrés. Sur la base de ces résultats, on a obtenu des résistances au fluage sous contrainte à 100000 heures nettement supérieures à celles de l'acier X20 CrMoV 12 1. Par rapport à ce type, une élévation de température de presque 30°C est devenue possible. Des essais de grande envergure ont montré que les tuyaux fabriqués en acier T91/P91 peuvent se plier facilement à froid et à chaud et qu'ils sont aisément soudables.

### Principes de construction éprouvés

L'illustration 4 montre toutes les caractéristiques constructives principales de la turbine HP à haute température. Les principes de construction éprouvés de cette série peuvent être repris sans aucune modification. Seuls le cylindre intérieur, le bâti de soupape et la partie centrale du rotor sont fabriqués avec les nouveaux aciers à 10% de Cr.

Etant donné que la vapeur s'expande et se refroidit en direction de l'extrémité arrière des rotors, on y utilise un type d'acier faiblement allié à 1% CrMoV. Vu que cet acier présente de bonnes propriétés d'utilisation, on peut renoncer à une protection par recharge par soudage des fusées d'arbres sollicitées en flexion et en torsion. Les composants fabriqués avec des aciers



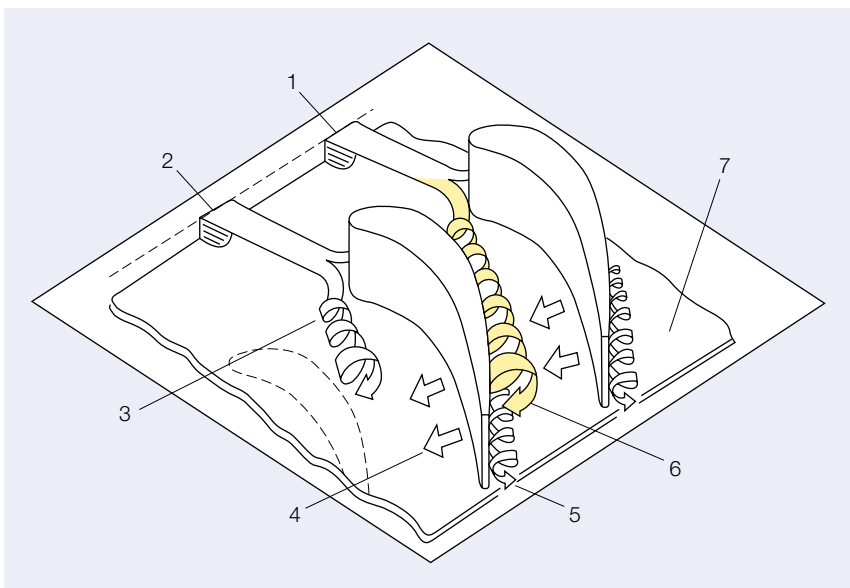


**Evolution du rendement de l'aubage des séries 200... 8000**

Vert Sans bande de recouvrement  
 Bleu Avec bande de recouvrement  
 Rouge Aubes de haut rendement

**Modèle schématique de l'écoulement de vapeur secondaire près de la paroi latérale d'un étage d'aubes de turbine**

- 1 Surface du flux
- 2 Couche limite à l'entrée
- 3 Tourbillon en fer à cheval du côté intrados (se transforme en tourbillon du canal)
- 4 Écoulement secondaire sur la paroi latérale
- 5 Tourbillon en fer à cheval du côté aspiration (extrados)
- 6 Tourbillon du canal
- 7 Paroi latérale



hautement et faiblement alliés sont soudés mutuellement par des procédés de soudage et des matériaux d'apport usuels. Les températures et les sollicitations de service des cordons de soudure ne dépassent pas les valeurs habituelles.

Les autres avantages des rotors soudés s'énumèrent comme suit:

- Essais non destructifs simples et précis
- Vaste choix de fournisseurs pour les pièces forgées
- Propriétés mécaniques régulières et ténacité élevée

La symétrie de révolution du cylindre intérieur à liaison par bagues de frettage présente un avantage en exploitation sous charge moyenne. Par la régularité de l'épaisseurs des parois, on évite les sollicitations thermiques inadmissiblement élevées et donc les déformations plastiques. Vu que les bagues de frettage sont placées dans l'échappement de la turbine HP, elles présentent toujours une température plus basse que le cylindre intérieur, de sorte que la force de frettage reste conservée pour toutes les conditions d'exploitation. Par conséquent, la différence de température due aux variations de charge et pendant le démarrage de cette exécution de turbines ne diffère pas de celle des exécutions à température plus basse.

Les diffuseurs qui mènent la vapeur des soupapes d'admission dans la turbine HP sont thermiquement mobiles et équipés d'éléments d'étanchéité à piston. Ceux-ci sont refroidis par de la vapeur d'échappement HP, de sorte qu'aucun composant du cylindre extérieur n'est soumis à la température de la vapeur vive. Le soutirage HP requis par le procédé peut se faire avec des moyens très modestes. Ce concept de soutirage a déjà été réalisé sur de nombreuses installations.

La turbine MP travaille avec une température d'entrée de 600°C. Malgré la température de resurchauffe élevée, on peut conserver le concept de construction sans modifications.

L'illustration 5 montre les changements de matériaux. Seuls le cylindre intérieur, le carter des soupapes et la partie moyenne du rotor sont fabriqués avec les nouveaux aciers à 10% de Cr. Les boulons qui assemblent les deux moitiés du cylindre MP n'atteignent que la température de la vapeur d'échappement de la turbine MP. Vu

que celle-ci ne dépasse pas 500°C, ils peuvent être fabriqués avec l'acier usuel.

Les turbines BP travaillent sous des conditions de vapeur inchangées.

### Aubage de haut rendement – objectifs et concept général

Dans le but d'augmenter le rendement des turbines, les aubages fixes et mobiles font l'objet de perfectionnements constants. Une condition limite importante réside dans la conservation de la géométrie du pied et de la bande de recouvrement des aubes de la série 8000 actuelle et dans le respect de la distance axiale entre les étages des aubes. Ce faisant, les turbines ABB peuvent être rééquipées plus facilement avec des aubes de haut rendement, au cas où un exploitant désire accroître de cette manière le rendement de sa turbine.

Les améliorations de rendement s'obtiennent par l'utilisation d'aubes à profils optimisés qui diminuent le taux de consommation (heat rate), en réduisant au minimum les pertes d'écoulement. De nouvelles techniques de fabrication et d'usinage des aubes aident à éviter les augmentations de coûts. Elles permettent également d'assurer une qualité élevée lors du fraisage dans la masse des aubes à pied et à bande de recouvrement intégrés. Le concept du développement se fonde sur les calculs d'écoulement dynamique des fluides, sur des essais systématiques de taux de consommation exécutés sur une turbine expérimentale, ainsi que sur les essais d'aptitude effectués à l'échelle industrielle dans des centrales thermiques.

La forme des aubes de la série antérieure (série 8000) représente l'aboutissement de travaux de développement de longue haleine **6**. Depuis le début du siècle, de nouveaux profils ont été constamment développés et utilisés **[6]**. Lorsque la série 8000 fut introduite en 1980, le profil des aubes avait contribué globalement à une simplification de la construction, à une fabrication plus économique, à une rigidité mécanique accrue et à un rendement plus élevé. Ses caractéristiques s'énumèrent comme suit:

- Insensibilité aux variations de l'angle d'attaque
- Profil de décélération optimisé
- Faible épaisseur des bords de fuite



**Aube à rendement élevé avec vrillage et courbure qui permettent de tenir compte de la répartition irrégulière de l'écoulement et de la pression sur la hauteur de l'aube. **8****

### Développement de profils 3D

Les faits suivants ont rendu possible le développement d'un concept généralisé de profils d'aube:

- Introduction de programmes de calcul performants pour l'analyse numérique des écoulements 3D visqueux et compressibles
- Développement parallèle de techniques CIM (Computer Integrated Manufacturing) modernes

Par la mise en œuvre de programmes de calcul modernes, on a réussi à mieux comprendre les phénomènes physiques et à accélérer le processus de développement expérimental usuel. En outre, les méthodes de calcul de la dynamique des fluides **[7, 8]** ont été perfectionnées par des travaux de grande envergure, afin de pouvoir déterminer l'écoulement de la vapeur dans le centre du filet et à proximité des parois du canal. Le modèle classique des écoule-

ments secondaires **[9]** est esquissé dans **7**. L'influence réciproque des tourbillons provoque une réduction massive de l'énergie cinétique. Elle est donc particulièrement nocive.

Les pertes de rendement, qui sont imputables à l'écoulement secondaire sur la paroi frontale, à la forme du profil et au jeu à la tête des aubes, ont été subdivisées approximativement selon ces critères. Tandis que les pertes dues à la forme du profil sont identiques dans les turbines HP, MP et BP, les pertes dues à la paroi frontale et au jeu des aubes sont les plus grandes pour les aubes courtes de la turbine HP. Tandis que les aubes antérieures présentaient une forme prismatique (avec des faces droites et parallèles), les calculs de dynamique des fluides ont montré que des perfectionnements supplémentaires du rendement sont possibles en prévoyant davantage de degrés de liberté pour la forme des aubes. Des profils d'aubes variables, avec des vrillages et des courbures **8**, permettent en effet de tenir compte de la répartition irrégulière du flux et de la pression sur la hauteur de l'aube. L'illustration **9** en montre un exemple typique. Pour cette raison, la stratégie suivante a été appliquée:

*Aubes fixes:*

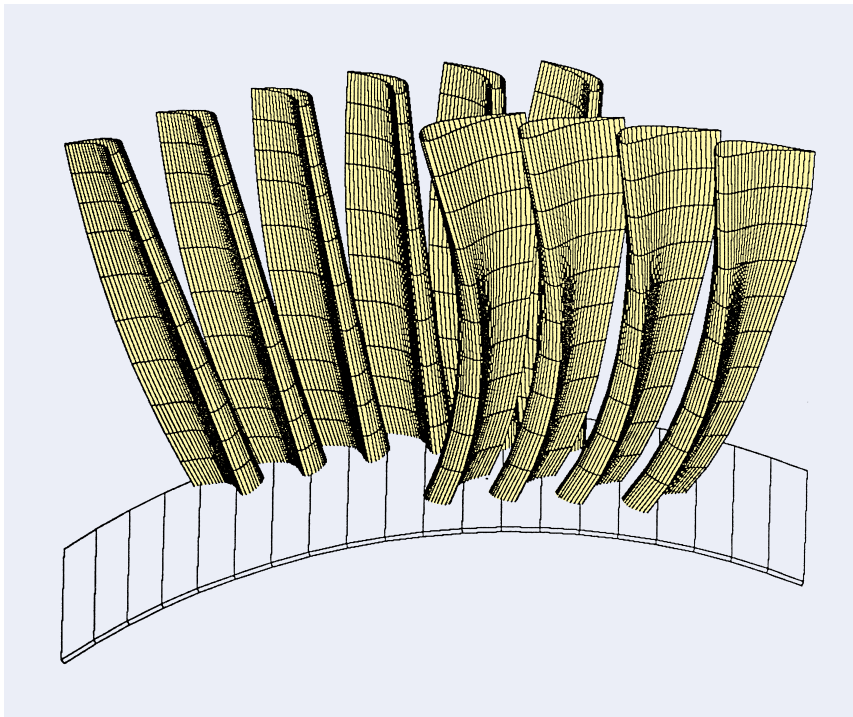
- Section de profil variable
- Profil vrillé et tordu

*Aubes mobiles:*

- Section variable du profil
- Vrillage en sens inverse, pas de courbure

### Réduction des pertes de fuite

Dans les aubages à réaction, le degré de réaction (diminution relative de la perte de pression dans l'étage) est en moyenne de 50%. Il varie pourtant entre environ 40% au pied de l'aube et 60% à la pointe de celle-ci. Cette répartition montre clairement que 60% de la chute de pression de l'étage se présentent aux bandes de recouvrement des aubes prismatiques (cylindriques) fixes et mobiles et qu'elles sont responsables des pertes de fuite élevées. Une répartition inverse plus favorable du degré de réaction (c'est-à-dire 60% au moyen et 40% à l'extrémité de l'aube) s'obtient par l'augmentation, resp. par la diminution du taux de vrillage des profils des aubes fixes et mobiles. De cette façon, on diminue aussi les pertes de fuite des aubes.



**Représentation par ordinateur d'une partie d'un étage d'aubes à rendement élevé**

9

**Diminution des pertes dues aux parois frontales**

Les pertes par frottement qui se produisent dans les zones des parois latérales du canal de l'aubage sont accentuées par les flux secondaires [10]. Ce fait se traduit par une concentration des pertes de l'écoulement dans la zone de la paroi fron-

tale. L'interaction des écoulements accentuées de fuite qui pénètrent de nouveau dans le canal contribue également de manière notable à la formation des pertes. L'écoulement secondaire est la conséquence inéluctable de la déviation du flux de vapeur dans l'aubage. On peut toutefois atténuer les répercussions des pertes

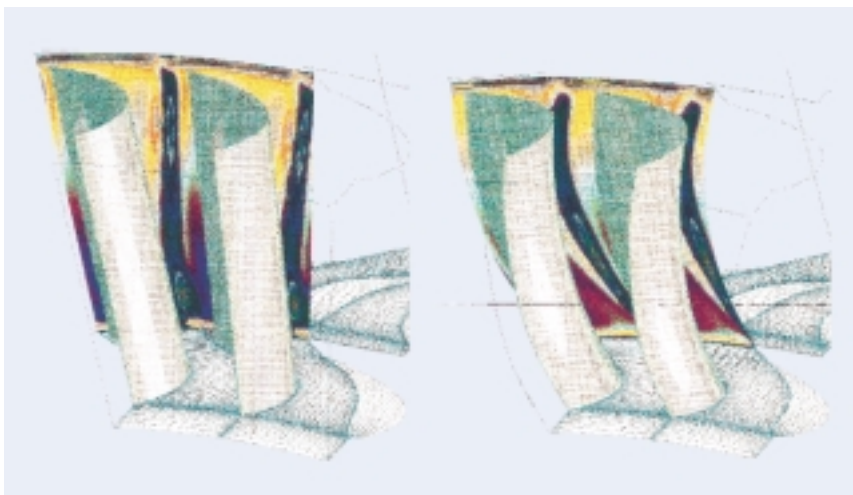
aux parois frontales par un choix judicieux de la section locale du profil et de la forme des aubes. Une possibilité connue réside dans l'inflexion des aubes en direction de la périphérie [11]. En appliquant cette méthode au pied et à la pointe de l'aube, on obtient une forme d'aube incurvée. En raison des sollicitations mécaniques, cette procédure ne peut être réalisée que pour les aubes fixes. L'optimisation 3D de ce type de profil est extrêmement complexe. L'influence du vrillage de l'aube sur son inclinaison, principalement dans la zone de la paroi frontale, requiert une harmonisation subtile de ces deux paramètres avec la forme de l'aube.

Des travaux de développement antérieurs effectués avec succès sur une turbine mono-étage avec «contrôle des tourbillons» [12] reposaient sur l'idée de la décharge de l'extrémité des aubes, en raison de la possibilité de réduire le travail spécifique de l'aubage, par une combinaison judicieuse de la réduction de la courbure et de l'inclinaison de l'aube. Toutefois, les conditions qui règnent dans une turbine multi-étage conduisent forcément à une répartition radiale régulière du travail de l'étage, indépendante du contrôle des tourbillons.

Comme illustré par 10, le tourbillon du canal qui fait partie de l'écoulement secondaire se présente sous une forme allongée radialement derrière l'aubage. Ce phénomène a pour conséquence une diminution des pertes d'énergie et de la sur-, resp. de la sous-rotation connues de l'écoulement de la vapeur provoquée par le tourbillon du canal.

**Influence de la répartition de l'angle d'échappement et de l'inclinaison des aubes sur le tourbillon du canal (calcul théorique)**

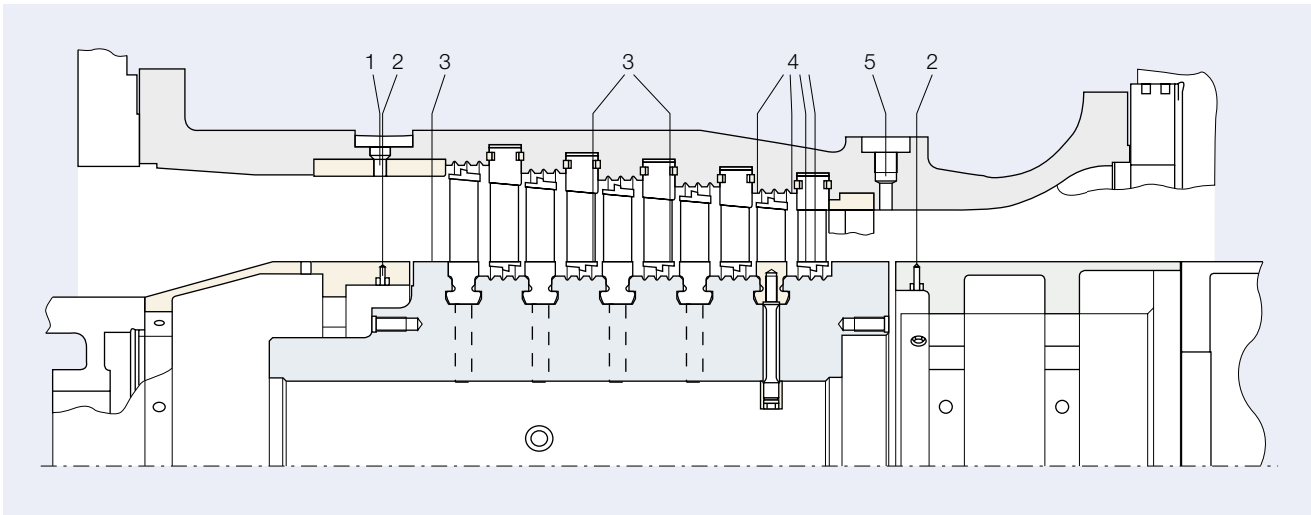
10



**Modèle de turbine expérimentale pour le soutien du processus de développement**

Dans le processus de développement, une turbine expérimentale joue un rôle important, parce qu'elle sert à valider les programmes de calcul et à quantifier le comportement en fonctionnement de l'aubage. Le banc d'essai doit permettre de mesurer le comportement d'un étage de turbine sous des conditions limites représentatives, c'est-à-dire celles de l'écoulement naturel d'une turbine multi-étage. De telles conditions peuvent être réalisées le mieux par un dispositif d'essai à plusieurs étages





Vue en coupe de la turbine sur le banc d'essai

11

- 1 Capteurs stationnaires
- 2 Pression statique

- 3 Capteurs
- 4 Pression d'étage, tous les étages

- 5 Endoscope

analogues (de même construction) **11**. Les résultats obtenus sur ce banc d'essai travaillant avec de l'air sont ensuite convertis pour l'application dans des centrales à turbines à vapeur, où des mesures effectuées sur site permettent de compléter les données acquises précédemment.

Par ailleurs, une mesure détaillée du champ de l'écoulement est nécessaire pour la confirmation du programme de calcul. Cette mesure s'effectue avec des sondes aérodynamiques placées en différents endroits et à l'aide de nombreux points de mesures statiques disposés aux limites du canal d'écoulement.

Des conditions d'écoulement représentatives à proximité des parois frontales sont très importantes pour l'optimisation numérique et pour l'appréciation expérimentale des profils d'aubes prototypes. La simulation numérique s'effectue avec des équations Navier-Stokes 3D. Celle-ci doit tenir compte des perturbations causées par les pertes de fuite et par les influences cumulées des étages de même construction.

**Des procédés de fabrication modernes constituent une importante condition préalable**

Pour exploiter complètement le profit des performances accrues des profils d'aubages 3D, on doit absolument disposer de procédés

de fabrication modernes et économiques. Ceux-ci doivent permettre la réalisation des libertés de conception à un prix abordable. Les turbines à vapeur ABB sont construites selon les désirs des clients et possèdent une géométrie d'écoulement optimisée, de sorte qu'à l'intérieur du cadre des applications données, de nombreuses variantes d'aubes fixes et mobiles sont possibles.

La technique CIM requiert une spécification complète de toute la géométrie de l'aubage sous forme de surface continue, y compris les pentes et les courbes locales, ainsi que des attributs supplémentaires pour les tolérances des cotes et des états des surfaces. Cette spécification est élaborée automatiquement à l'aide des paramètres du prototype pour les séries d'aubes optimisées.

La fabrication des aubes s'effectue dans des cellules d'usinage modernes, de haute précision et entièrement automatiques. Toute la documentation de fabrication, telle que les plans de production et les programmes de commande numériques, est élaborée en même temps. Ce faisant, le niveau de qualité élevé demandé par le marché peut être garanti.

**Rendement global plus élevé**

L'illustration **12** montre les rendements atteints par des centrales thermiques à charbon. Le rendement de 46,0% obtenu par

une resurchauffe simple (resp. de 46,7% avec une resurchauffe double) représente une augmentation considérable. Ce gain est imputable à différents facteurs:

- Augmentation du rendement de la chaudière
- Introduction d'un aubage à performances élevées
- Diminution des pertes de fuite
- Augmentation du rendement du procédé par l'utilisation d'une turbine d'entraînement pour l'eau d'alimentation
- élévation de la pression et de la température de la vapeur vive et de resurchauffe
- Optimisation du condenseur et amélioration de sa pression
- élévation de la température finale de l'eau d'alimentation
- Utilisation de 9 préchauffeurs pour l'eau d'alimentation

**Conclusions**

Au cours des dernières années, le rendement des centrales à turbines à vapeur a pu être accru considérablement. De nos jours, des conduites tubulaires, des pièces forgées et des types de fonte d'acier sont livrables avec des propriétés fortement améliorées par rapport à autrefois. Les principes de construction éprouvés des turbines ABB ont été conservés, tout en

profitant de l'amélioration du comportement en température des aciers nouvellement développés.

Conjointement aux améliorations réalisées par l'optimisation des profils et de la géométrie des aubages, ABB peut offrir aujourd'hui des installations de turbines à vapeur qui répondent aux exigences du marché. Par exemple avec

- des puissances de 400 à 1000 MW,
- de la vapeur vive de 250 à 300 bar à 580 °C,
- une température de resurchauffe de 600 °C, à savoir avec une amélioration relative du taux de consommation d'au moins 7-8 %.

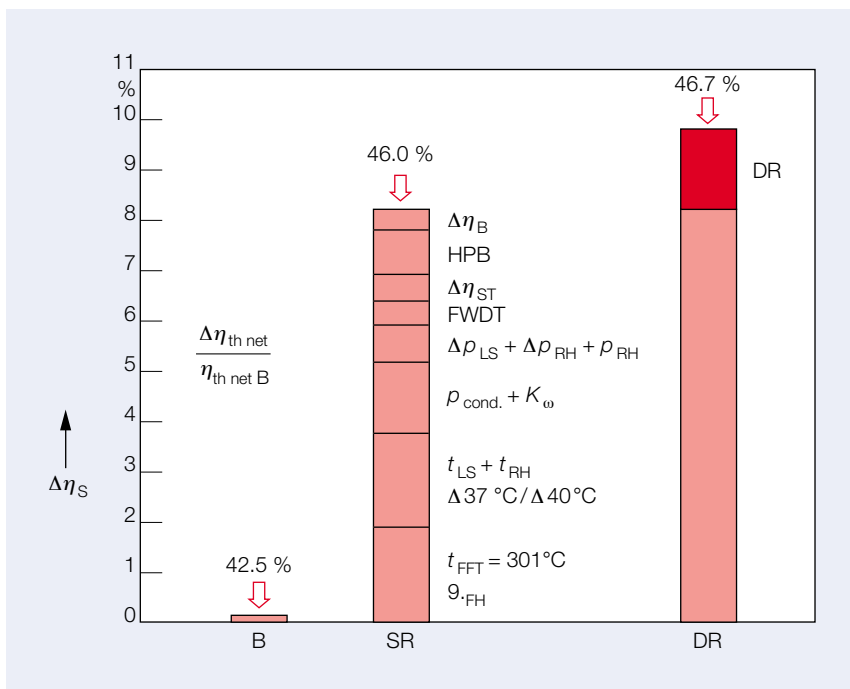
**Possibilités d'accroissement du rendement de centrales thermiques à vapeur à charbon**

$\eta_{th}$	Rendement thermique
$\Delta\eta_S$	Amélioration du rendement
B	Base
SR	Resurchauffe simple
DR	Resurchauffe double
$\Delta\eta_B$	Amélioration du rendement de la chaudière
HPB	Introduction de l'aubage à rendement élevé
$\Delta\eta_{ST}$	Diminution de la perte de fuite
FWDT	Introduction d'une turbine d'entraînement pour l'eau d'alimentation
$\Delta p_{LS} + \Delta p_{RH} + p_{RH}$	Pression accrue de la vapeur vive et de la vapeur de resurchauffe
$p_{cond.} + K_w$	Optimisation du condenseur et diminution de la pression du condenseur
$t_{LS} + t_{RH}$	Augmentation de la température de la vapeur vive et de resurchauffe
$t_{FFT}$	Augmentation de la température de l'eau d'alimentation finale à 301 °C
$9_{FH}$	Utilisation de 9 préchauffeurs de l'eau d'alimentation

**Bibliographie**

[1] Kjaer, S.; Henriksen, N.; Moelbak, T.: The Advanced Coal-Fired Power Station. Background, Status and Future. UNIPEDE Conference, 1-3 Sept. 1993, Hambourg.  
 [2] Kotschenreuther, H.; Häuser, U.; Weirich, P. H.: Future Economic Coal-Fired Electricity Generation 83 (1993) 2, p. 2.  
 [3] Berger, C.; Scarlin, R. B.; Mayer, K. H.; Thornton, D. V.; Beech, S. M.: Steam Turbine Materials: High Temperature Forgings. COST501 Conference; Materials for Advanced Power Engineering 1994, 3-6 Octobre 1994, Liège, Belgique.

[4] Scarlin, R. B.; Berger, C.; Mayer, K. H.; Thornton, D. V.; Beech, S. M.: Steam Turbine Materials: High Temperature Casting. COST501 Conference; comme ci-dessus.  
 [5] Franklin, C. J.; Henry, C.: Material Developments and Requirements for Advanced Boilers. COST501 Conference; comme ci-dessus.  
 [6] Teufelberg, A.: Choix d'un profil d'aube optimal pour étages de turbines à vapeur. Revue Brown Boveri 63 (1976) 2, 123-128.  
 [7] Novak, O.; Schäfer, O.; Schönung, B.; Steiger, U.: Aerodynamic Analysis of Advanced Blading for Steam Turbines. EPRI, Jan. 1992, Orlando.  
 [8] Schäfer, O.; Frühauf, H. H.; Bauer, B.; Googolz, M.: Application of a Navier-Stokes Analysis to Flows through Plane Cascades. ASME Paper No. 85-GT-56, 1985.  
 [9] Langston, L. S. et al.: Three-Dimensional Flow within a Turbine Cascade Passage. ASME, J. Eng. for Power, Jan. 1977.  
 [10] Sieverding, C. H.: Recent Progress in the Understanding of Basic Aspects of Secondary Flow in Turbine Blade Passages. Trans. of ASME, April 1985.  
 [11] Morgan, S.: Secondary Flows and Endwall Boundary Layers in Axial Turbomachinery. VKI, LS, 1984-05.  
 [12] Dorman, E. E.; Welna, H.; Lindlauf, R. W.: The Application of Controlled Vortex Aerodynamics to Advanced Axial Flow Turbines. ASME Paper No. 68-GT-4, 1968.



**Adresse de l'auteur**

Dr Brendon Scarlin  
 ABB Production d'énergie SA  
 CH-5401 Baden/Suisse  
 Téléfax: +41 (0) 56 205 56 05