

Etat de la technique des turbines à gaz

Comme le montrent les pronostics du marché, les turbines à gaz – et avec elles les centrales à cycle combiné – se trouvent actuellement au centre de l'intérêt pour la production d'énergie électrique. Les principales raisons en sont des frais d'investissement et un prix de revient bas du courant électrique, des durées de construction courtes, une disponibilité élevée et de faibles émissions. Le développement des turbines à gaz au cours des dernières décennies constitue le fondement pour répondre aux exigences actuelles et futures qu'on pose à ces machines. Avec les turbines GT24 et GT26, ABB dispose d'un concept innovateur et aussi des techniques fondamentales pour atteindre son objectif dans un avenir rapproché, à savoir un rendement thermique de 60 %, en respectant les exigences concernant les émissions.

La première turbine à gaz industrielle BBC fut mise en service en 1939 à Neuchâtel/Suisse [1,2]. Depuis lors, la turbine à gaz a trouvé de nombreuses applications, également en dehors de la production d'électricité. La question du combustible disponible le plus avantageux s'est toujours trouvée au premier plan – depuis les applications pour charges de pointe et de base, avec du fuel lourd ou léger, ou avec du gaz de haut fourneau de faible puissance calorifique [3], jusqu'à l'exploitation en charge de base avec du gaz naturel. Grâce aux efforts d'innovation incessants des ingénieurs et constructeurs, la turbine à gaz a fourni au cours des 60 dernières années la preuve de sa flexibilité en ce qui concerne le combustible.

La privatisation croissante de la fourniture d'énergie électrique, ainsi que l'ouverture du marché de l'énergie dans de nombreux pays ont causé un changement dans les affaires de centrales électriques. Plus de 30 % des nouvelles centrales sont construites par des producteurs d'électricité indépendants (les «Independent Power Producers» IPP), en concurrence avec les entreprises d'électricité.

Actuellement, pour une puissance d'environ 85 GW installée annuellement, plus de 35 % de l'électricité proviennent de turbines à gaz. Le développement de la viabilisation des réserves de gaz naturel se manifeste par une évolution inté-

ressante du prix de ce vecteur énergétique primaire propre. Pour des raisons économiques et écologiques, les turbines à gaz s'utilisent de plus en plus souvent en combinaison avec des turbines à vapeur, sous forme de centrales à cycle combiné, autant pour les grandes que pour les petites unités, ainsi que pour le couplage chaleur-électricité. **1** montre le développement des centrales à cycle combiné, en particulier en ce qui concerne le rendement thermique. La diminution des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) en cas d'utilisation de gaz naturel est impressionnante.

Les surcapacités existantes auprès des fabricants de turbines à gaz et une lutte concurrentielle âpre sur les nouveaux marchés (en Asie et en partie en Europe) ont abouti à une forte chute des prix des turbines à gaz et des centrales à cycle combiné. Au cours des 4 dernières années, les prix du marché sont tombés d'environ 50 %. Il en découle que la construction, la fabrication et le montage des turbines à gaz et de leurs composants pour centrales à cycle combiné doivent s'effectuer globalement à prix

avantageux, avec une orientation soutenue vers le client et une forte participation locale.

Exigences posées aux turbines à gaz

Les conditions du marché mentionnées ci-dessus imposent les objectifs suivants aux fabricants de turbines à gaz:

- Unités à blocs plus grands, c'est-à-dire accroissement de la puissance unitaire et de la puissance spécifique
- Augmentation de la disponibilité et de la durée de service
- Premiers investissements et frais de maintenance plus bas
- Amélioration du rendement global
- Diminution de la sollicitation de l'environnement

Tous les fabricants de turbines à gaz sont conscients de ces exigences des clients.

2 représente les turbines à gaz actuellement livrées par ABB. **3** et **4** illustrent l'amélioration de la disponibilité des turbines à gaz ABB du type GT11N, resp. de quelques centrales à cycle combiné d'ABB équipées de turbines à gaz GT13E et GT13E2.

Turbines à gaz – leurs techniques fondamentales et leurs composants

Les turbines à gaz haute température modernes d'aujourd'hui sont caractérisées par des brûleurs mixtes dans une configuration à chambre de combustion annulaire, ainsi que par des aubages directeurs réglables dans les compresseurs. Lors de la conception, de la construction et de la fabrication modernes de turbines à gaz, les aspects suivants se trouvent au premier plan pour tous les composants:

- Orientation vers les procédés de turbines à gaz et combinés
- Aérodynamique et «Computational Fluid Dynamic» (CFD)
- Conception des transmissions complexes de chaleur et du refroidissement
- Combustion propre
- Matériaux et couches de protection de haute qualité
- Intégrité mécanique des composants
- Conduite moderne du procédé, des régulations et des commandes

Dr Dilip K. Mukherjee

ABB Production d'énergie SA

- Constructions robustes et appropriées à la fabrication, disposition conviviale à la maintenance de l'installation et systèmes auxiliaires éprouvés et perfectionnés en permanence

L'assurance de la qualité lors de la conception, de la construction, de la fabrication, du montage et lors de la mise en service exige l'application de procédés de travail orientés vers la qualité dans une construction et une fabrication coordonnée. Sous ces aspects, les progrès réalisés par les fabricants de turbines à gaz sont exemplaires.

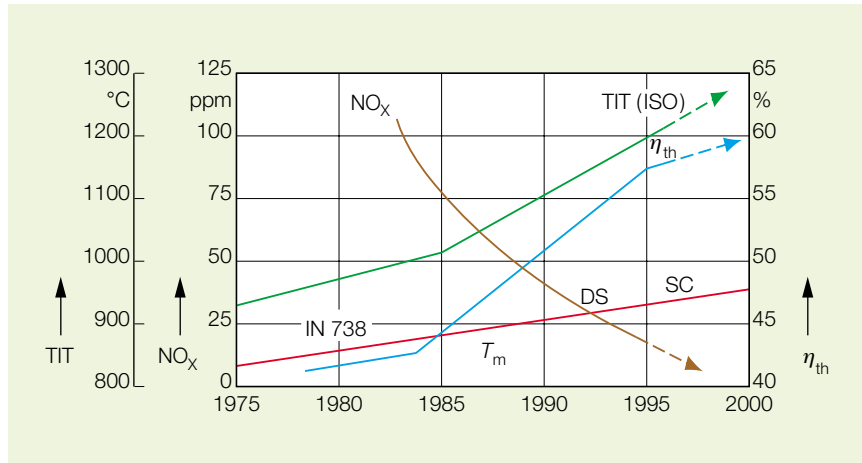
Lors de la conception et du dimensionnement des turbines à gaz, on applique des programmes d'ordinateur développés et validés systématiquement. Aujourd'hui, les essais s'effectuent autant sur des modèles que sur des pièces originales. En complément, les prototypes de turbines à gaz sont testés sur des bancs d'essai propres ou chez le client, en mettant en oeuvre d'énormes moyens métrologiques.

A la fin 1996, ABB a mis en service un nouveau centre d'essai à Birr, Suisse, afin de pouvoir tester les turbines GT26 et les autres grandes turbines à gaz tout au cours de leur perfectionnement. Cette démarche a été nécessaire, parce que les possibilités de vastes tests de prototypes diminuent chez les clients, et parce que les moyens à mettre en oeuvre deviennent de plus en plus importants. En outre, des essais de détail indispensables ne peuvent souvent pas s'exécuter chez les clients pour des raisons d'exploitation.

Le processus des turbines à gaz

L'accroissement de la puissance unitaire et du rendement s'effectue dans le processus même de la turbine à gaz et par les paramètres de celui-ci. Pour la charge de base, on admet toujours l'exploitation combinée. Dans le processus classique des turbines à gaz, l'augmentation de la puissance unitaire et du rendement s'effectue toujours par le flux de masse, la température d'admission de la turbine et par les rapports de pression correspondants.

1 illustre de manière frappante l'élévation de la température d'entrée des turbines au cours des années, les températures admissibles des matériaux,



Développement des centrales à cycle combiné en ce qui concerne la température d'entrée (TIT), le rendement thermique (ηth), les émissions de NOx (pour gaz naturel) et la température admissible des aubes (Tm)

1

TIT (ISO) Température d'entrée des turbines à gaz selon ISO

IN 738 Inconel 738 – avec coulée conventionnelle des aubes de turbines à gaz

DS Solidification orientée des aubes de turbines à gaz

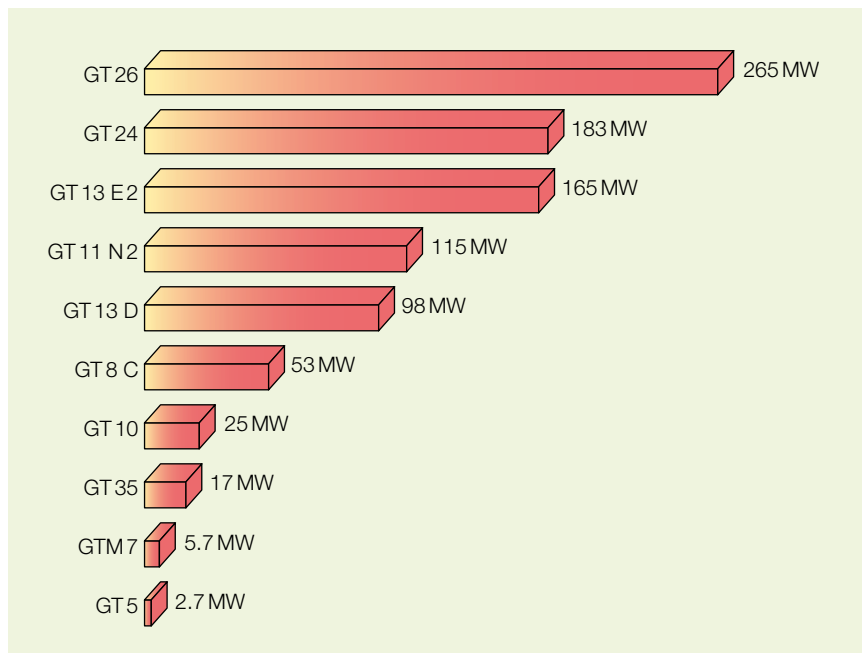
SC Technologie monocristalline

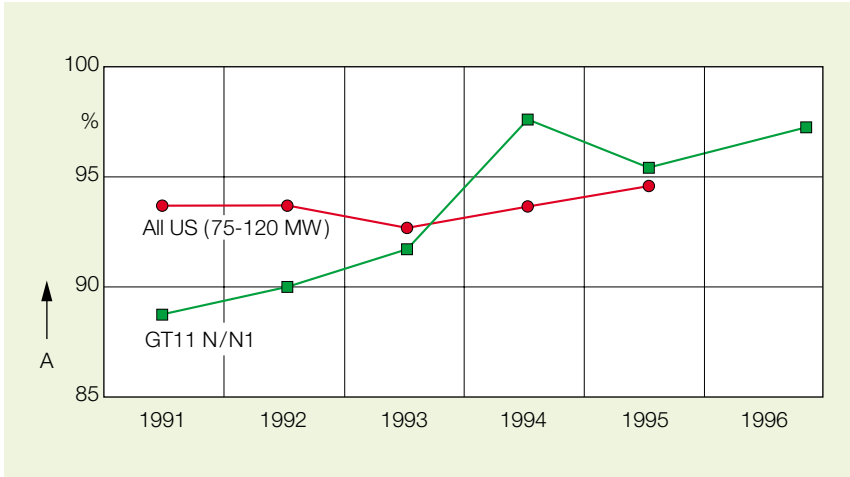
ainsi que le rendement thermique des centrales à cycle combiné. Pour atteindre un rendement thermique de 38 % par une turbine à gaz, resp. de 58 % dans une centrale à cycle combiné, une augmentation massive de la température de combustion et un refroidissement cor-

respondant des composants qui conduisent les gaz chauds sont des conditions inéluctables. La consommation accrue d'air de refroidissement implique le risque d'une émission accrue de NOx, étant donné que le facteur air diminue dans la combustion primaire. On appli-

Puissances nominales des turbines à gaz ABB

2





3 Comparaison de la disponibilité (A) des turbines à gaz du type GT11N/N1 avec des machines correspondantes des USA

que alors intégralement les progrès de l'aérodynamique, du refroidissement, des matériaux et de la dynamique des fluides assistée par ordinateur.

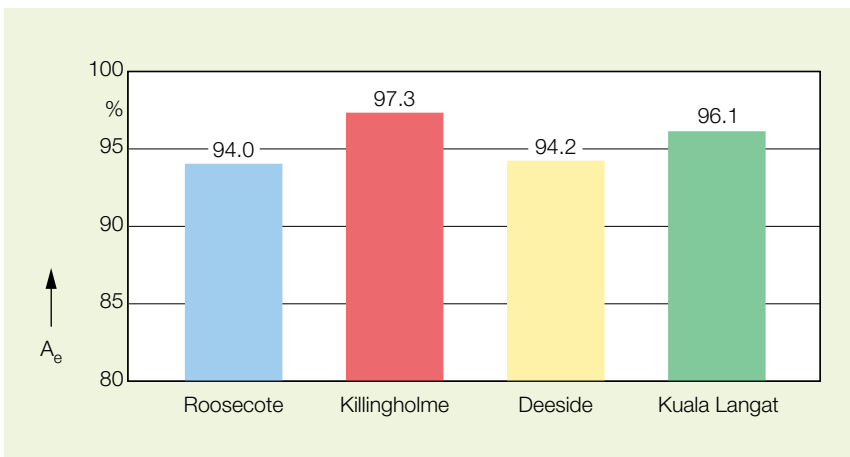
Pour les turbines à gaz GT24 et GT26, ABB applique la technique de la combustion séquentielle, afin d'atteindre un rendement thermique de 38% et de 40% dans un proche avenir, sans augmenter notablement la température d'entrée de la turbine à gaz. Les avantages suivants en découlent:

- Puissance spécifique élevée et donc flux massique de l'air bas
- Vitesses de pointe basse de l'aubage, avec les tensions mécaniques

et thermiques basses correspondantes

- Débit de vapeur/eau plus petit dans l'installation combinée
- Température d'entrée plus basse à la turbine à gaz et donc consommation d'air de refroidissement relativement plus faible
- Emissions basses de NO_x et pas de NO_x provenant de la seconde chambre de combustion séquentielle EV (SEV)
- Disponibilité élevée par l'utilisation de composants éprouvés
- Températures basses dans les cheminements des gaz chauds

4 Disponibilité équivalente (A_e) de différentes centrales à cycle combiné construites récemment par ABB et équipées de turbines à gaz des types GT13E et GT13E2. Roosecote, Killingholme et Deeside se trouvent en Grande-Bretagne, Kuala Langat en Malaisie.



5 représente la puissance spécifique et le rendement thermique des turbines à gaz actuelles d'ABB et de quelques autres producteurs [4, 5, 6, 7]. Pour permettre la comparaison des machines de 50 et de 60 Hz, toutes les données des machines sont réduites à 3600 min⁻¹.

6 montre le débit massique de l'air à l'entrée et le rapport de compression de ces turbines à gaz.

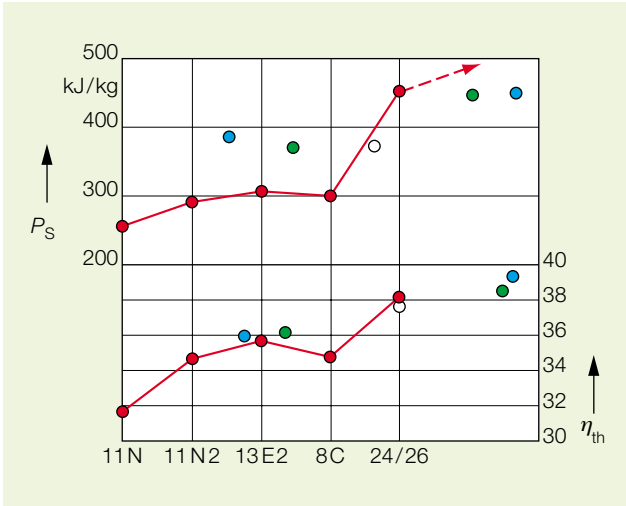
Compresseur

Dans le compresseur, le fluide de travail s'écoule en direction d'une pression plus élevée. La conversion de l'énergie dans l'aubage du compresseur est donc limitée. Cette différence par rapport à la turbine requiert un plus grand nombre d'étages dans le compresseur, afin d'éviter les décollages et les détachements de courant. Pour des compresseurs plus compacts, plus courts et avec un plus petit nombre d'étages, on a besoin de taux de compression par étage plus élevés. Des flux massiques et des rapports de compression entre étages plus élevés requièrent pourtant des vitesses périphériques et d'écoulement élevées, avec les déviations correspondantes du flux.

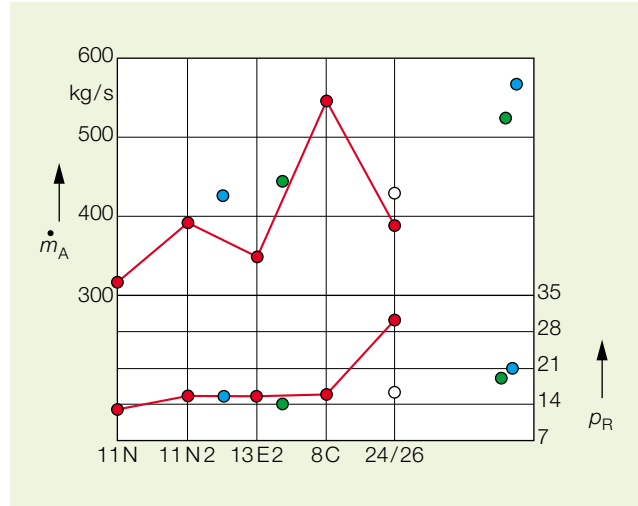
La maison BBC d'antan construisait des compresseurs industriels avec des rapports de pression élevés (jusqu'à 150 bar) en exécution axiale/radiale, avec refroidissement intermédiaire. Par contre, ABB a soigné essentiellement la technique des compresseurs haute pression pour la construction de turbines à gaz.

La technique des compresseurs GT8 [8] pour turbines à gaz transsoniques introduite au cours des années 80 par BBC atteint encore aujourd'hui des valeurs de pointe en ce qui concerne le flux massique et la charge par étages **6**. Déjà en 1983, on atteignait un rapport de pression de 16, seulement avec les 12 étages du compresseur GT8. Le rapport des pressions entre étages des turbines GT8C et GT24/26 représente aujourd'hui une valeur de pointe. Les nouvelles turbines à gaz 7G et 501G2 de la concurrence dont on parle s'approchent de ces performances.

Au cours des 60 dernières années, les profils des aubes des compresseurs ont évolué de la première génération (AVA Göttingen), en passant par les deuxième



5 Puissance spécifique (P_s) et rendement thermique (η_{th}) de différentes turbines à gaz ABB (rouge) et de quelques concurrents (bleu, vert, blanc), réduits à 3600 min^{-1}



6 Débit massique de l'air d'entrée (\dot{m}_A) et rapport de pression du compresseur (p_R) de différentes turbines à gaz d'ABB (rouge) et de quelques concurrents (bleu, vert, blanc), réduits à 3600 min^{-1}

et troisième générations (profils NACA), vers les quatrième et cinquième générations (dites à «multiple circular controlled diffusion»). Une attention accrue a été vouée à la réduction des zones margina-

les et aux fuites par jeu, ainsi qu'à la relation entre le jeu radial des aubes et la limite de pompage. Des corrections supplémentaires ont été appliquées au profil des zones marginales des aubes.

Combustion

La formation des oxydes d'azote dans la flamme peut être réduite par les mesures suivantes: durée de séjour plus courte, c'est-à-dire grand nombre de flammes,

Technologie des brûleurs ABB pour gaz naturel et fuel léger n° 2

SBK Brûleur standard
* avec injection d'eau

EV Chambre de combustion pour faibles émissions de NO_x

SA Chambre de combustion annulaire

SEV Brûleur séquentiel pour chambre de combustion basse pression

1 Générateur de tourbillon

2 Noyau du tourbillon

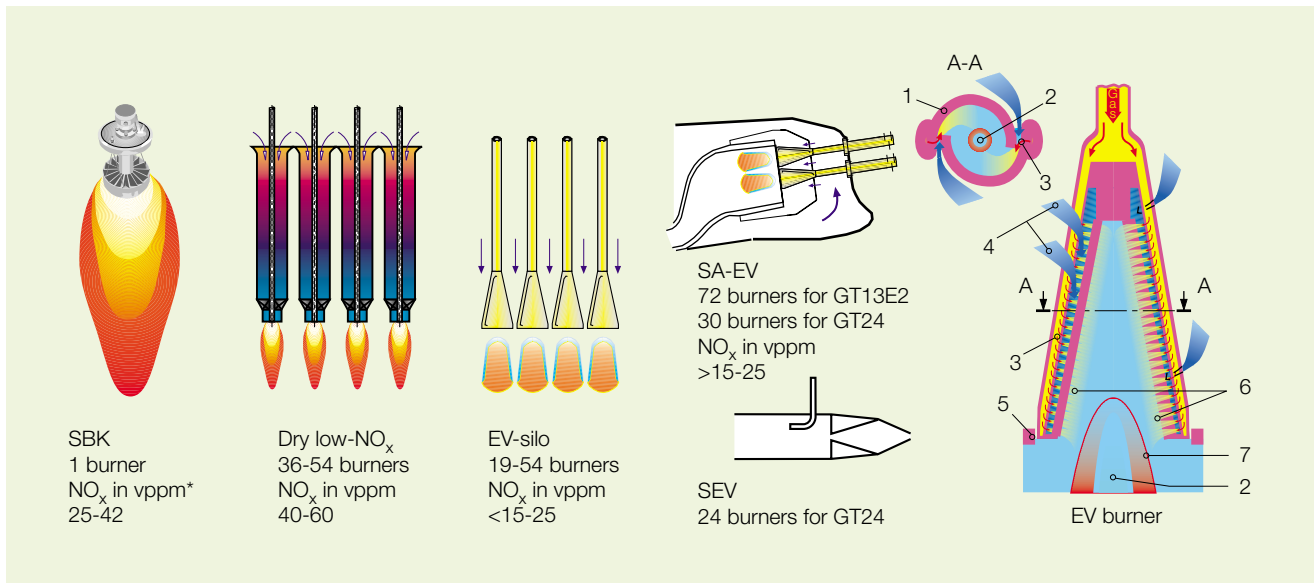
3 Injection de gaz

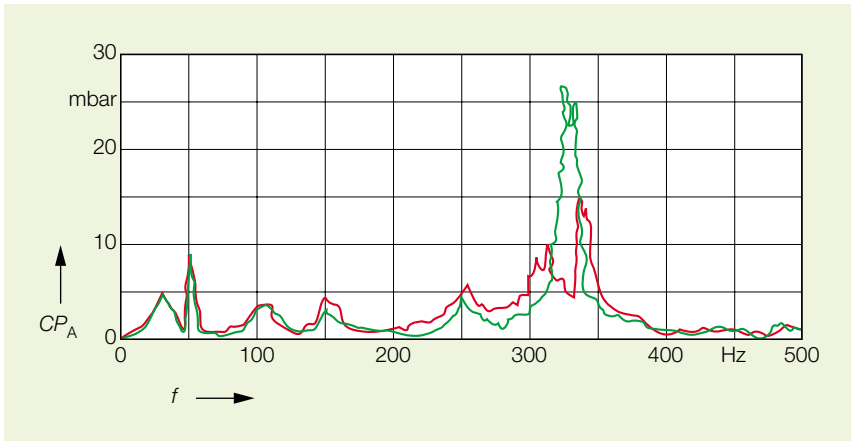
4 Air comburant

5 Niveau de la sortie du brûleur

6 Mélange de gaz et d'air comburant

7 Front de la flamme





Oscillations du gaz par autoexcitation dans des chambres de combustion fortement chargées 8

CP_A Amplitude de l'oscillation du gaz
 f Fréquence
 Vert sans amortissement
 Rouge avec amortisseurs de Helmholtz

température de flamme basse, c'est-à-dire combustion à mélange préalable («clean premix combustion»), combustion sous-stoechiométrique séquentielle, ainsi que combustion catalytique et mesures chimiques.

Le principe de la combustion à mélange préalable a été introduit avec succès dans les turbines à gaz industrielles.

7 montre la technologie des brûleurs ABB pour gaz naturel et fuel léger N° 2, le principe des brûleurs EV et SEV d'ABB [9, 10, 11], ainsi que le brûleur EV utilisé pour la turbine GT26.

Lors de la combustion de gaz naturel, les prescriptions les plus sévères sur les émissions sont remplies. Le système de combustion à mélange préalable et à faible formation de NO_x ne nécessite aucune injection de vapeur ou d'eau pour supprimer les émissions de NO_x . D'autres combustibles que le gaz naturel peuvent aussi être utilisés. Dans les installations exploitées au gaz naturel, on utilise souvent du fuel diesel comme combustible de réserve, voire par intermittence comme combustible principal. Hormis les NO_x qui se forment aux températures de combustion élevées, ce combustible propre ne produit pas d'autres substances nocives. Pour supprimer les émissions de NO_x , on injecte de l'eau ou de la vapeur. Lors du perfectionnement des brûleurs EV, ABB s'est donné pour objectif de dépasser vers le bas les émissions admissibles de NO_x en «ex-

ploitation sèche», c'est-à-dire sans injection d'eau ou de vapeur.

Le calcul du flux turbulent tridimensionnel dans les zones de combustion, en tenant compte ou non des phénomènes de réactions cinétiques, s'effectue par des méthodes analytiques. La précision de ce calcul dépend fortement des influences réciproques du brûleur et de la chambre de combustion, de la chaleur libérée et des modèles de turbulence utilisés. On est donc comme autrefois tributaire d'installations d'essai appropriées. En complément, on a besoin de mesures et d'essais sur des installations réalisées, étant donné que l'influence réciproque des brûleurs et des chambres de combustion ne peut être constatée que difficilement sous des conditions de laboratoire. La conception du système d'alimentation d'air et de combustible revêt une grande importance lors du développement des chambres de combustion. Dans les zones de combustion fortement chargées, on risque que le gaz se mette à osciller de manière inadmissiblement forte par un mécanisme d'autoexcitation.

8 représente les fréquences et les amplitudes mesurées dans une chambre de combustion à silo d'une turbine ABB, d'une part sans amortissement, et d'autre part avec un certain nombre d'amortisseurs de Helmholtz.

La combustion séquentielle utilisée pour les turbines GT24/26 15 est fondée

sur des expériences antérieures d'ABB, ainsi que sur des développements et des essais systématiques. La combustion à prémélange du brûleur SEV est autoinflammable et ne produit presque pas d'émissions de NO_x [11].

La technologie des brûleurs a également été développée pour des gaz de pouvoir calorifique moyen provenant de la gazéification du charbon ou du fuel lourd. ABB a modifié le brûleur EV, afin de réaliser une combustion sèche à faibles émissions. A cet effet, le gaz de synthèse est mélangé avec l'azote d'une installation de décomposition de l'air et mené vers les brûleurs [12]. D'autres fabricants utilisent la méthode de l'adjonction de vapeur d'eau au combustible. Des gaz de faible pouvoir calorifique (gaz de haut fourneau) peuvent également être brûlés dans les turbines à gaz ABB [3].

Turbines

Pour les turbines à gaz modernes, le calcul tridimensionnel du flux et de la conception d'aubages à faibles pertes est d'une importance primordiale. 9 montre l'aubage d'une turbine à gaz du type GT8. La forme des contours marginaux, le jeu radial et les bandes de recouvrement sont des points saillants de cette conception. Le calcul précis de la transmission de chaleur sur la surface des aubes est absolument nécessaire pour le dimensionnement du refroidissement de celles-ci.

Lors du refroidissement des aubes, il s'agit entre autres de résoudre le problème de la quantité minimale d'air de refroidissement. Le refroidissement par convection, avec des nervures transversales et des boutons sur la paroi intérieure, ainsi que le refroidissement par impact avec une perte de pression minimale font partie des acquis techniques des turbines à gaz industrielles. Déjà au début des années 70, ABB a été l'un des premiers fabricants de turbines pour centrales électriques à introduire le refroidissement des aubes. Dans le refroidissement par film, un rendement aussi élevé que possible du film de refroidissement est déterminant. Ce rendement dépend en particulier de la situation sur le côté air, c'est-à-dire de l'écoulement extérieur, de la disposition et de l'exécu-

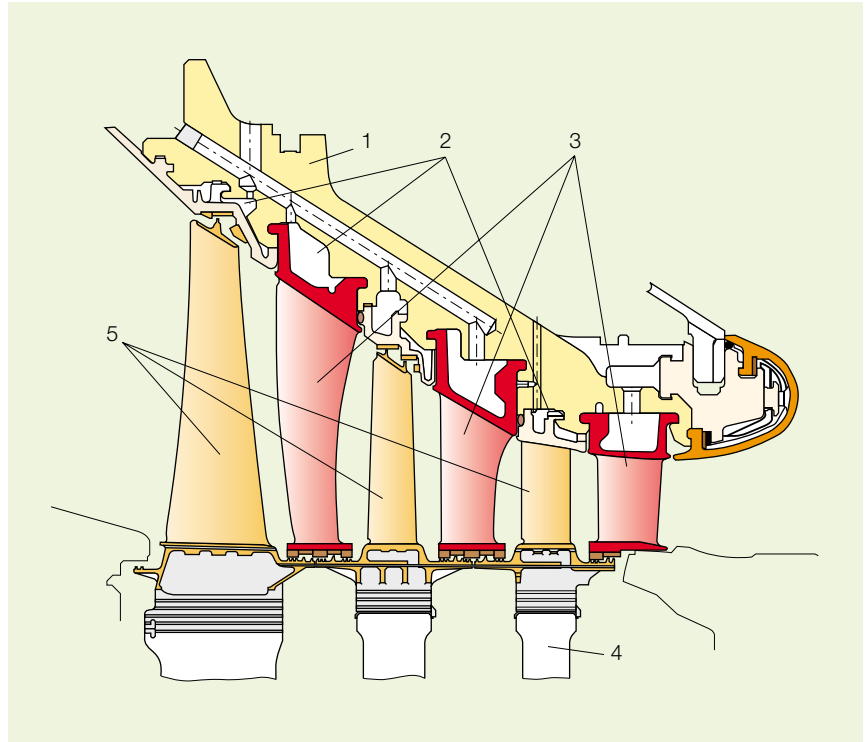
tion des trous d'échappement, ainsi que de l'angle d'échappement du film de refroidissement. Sur l'arête avant, on utilise souvent le refroidissement dit «Shower head».

Les aubes des turbines sont sujettes à des forces centrifuges considérables (aubes mobiles), ainsi qu'à des forces de flexion dues au gaz. Pour leur calcul, on a besoin de données sur la résistance au fluage sous contrainte du matériau des aubes. Celles-ci doivent être conçues de telle manière que leur fréquence propre ne coïncide pas avec un multiple de la fréquence de rotation et de celle des forces périodiques dues au gaz. Les aubes sont donc souvent recouvertes de bandes de couverture. On relie fréquemment les aubes longues des derniers étages par des boulons, de manière à améliorer l'amortissement mécanique. Les aubes refroidies présentent en outre des tensions thermiques. Celles-ci diminuent à vrai dire au cours du temps par fluage, mais les déformations dues à ce dernier peuvent aboutir à des dommages. Les tensions thermiques sous des conditions d'exploitation transitoire, par exemple au démarrage, à la mise hors service et aux changements de charge, provoquent une fatigue des matériaux appelée *Low Cycle Fatigue (LCF)*. Le dépassement d'un certain nombre de cycles peut aboutir à la formation de fissures. Sur les aubages de turbines à gaz à haute température, de telles fissures peuvent s'amplifier et provoquer une rupture brusque dite rupture de *High Cycle Fatigue (HCF)*.

Matériaux et couches de protection

Le développement des matériaux pour aubages de turbines et le perfectionnement technique des procédés de coulée ont fortement contribué à la possibilité d'augmentation de la température d'entrée des turbines. Les aubes conventionnelles fabriquées par coulée de précision en IN 738 pour les premiers étages des aubages ont été remplacées par des aubes à solidification orientée. Les aubes monocristallines en alliage au nickel CMSX-2, resp. CMSX-4 représentent la prochaine étape technologique 9.

L'amélioration de la résistance au



Aubage d'une turbine à gaz du type GT8

9

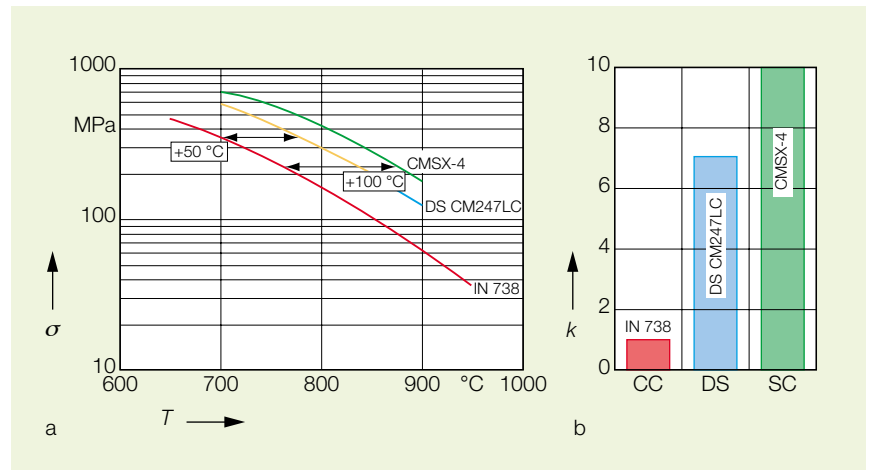
- 1 Support d'aubage
- 2 Chambre de circulation de l'air de refroidissement
- 3 Aubes fixes
- 4 Rotor
- 5 Aubes mobiles

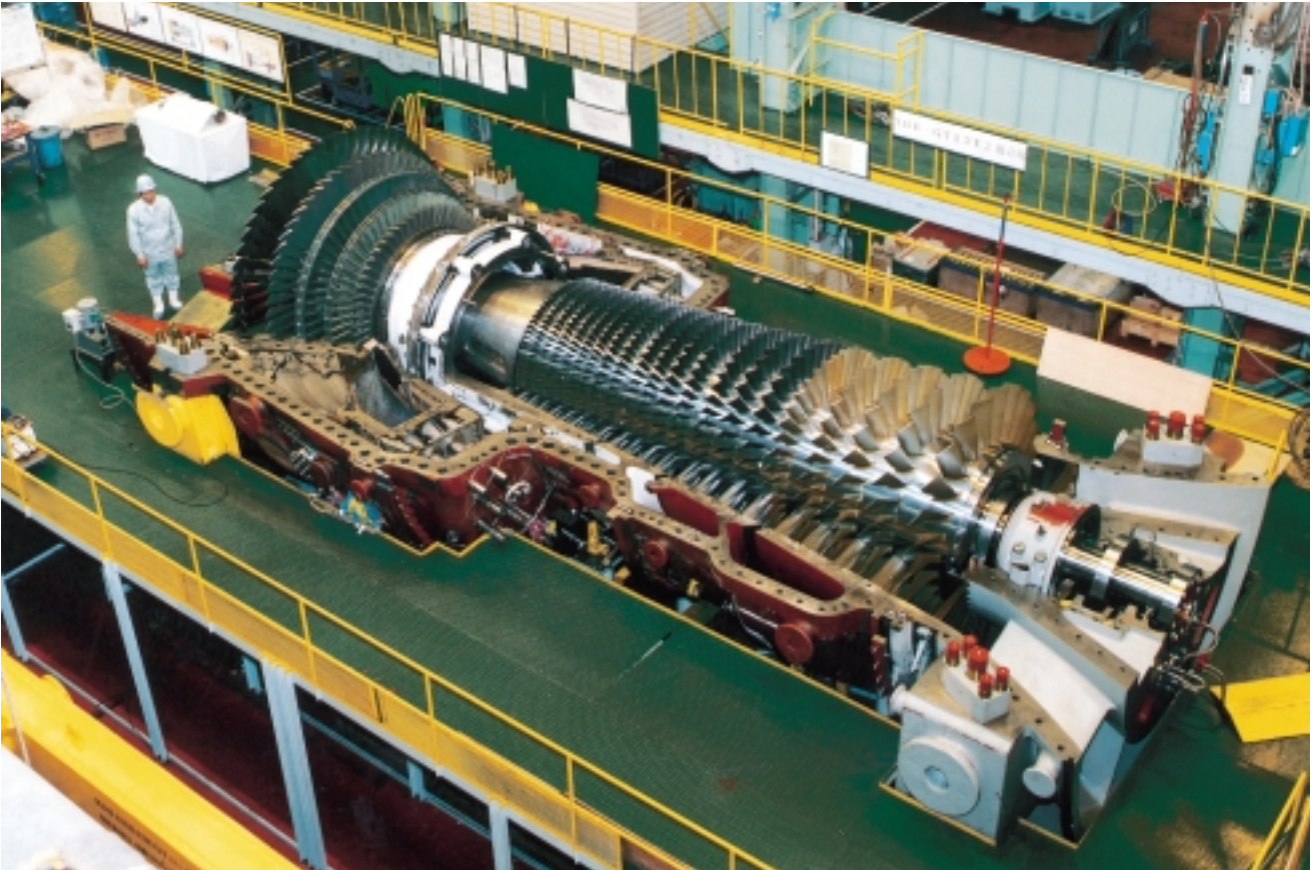
Amélioration de la résistance au fluage sous contrainte (a) et amélioration relative des sollicitations cycliques admissibles (b) des matériaux pour aubes de turbines à gaz, par rapport à l'Inconel 738

10

- σ Résistance au fluage sous contrainte
- T Température
- k Facteur d'amélioration par rapport à l'IN 738

- CC Aubes polycristallines conventionnelles
- DS Aubes à solidification orientée
- SC Aubes monocristallines





Montage d'une turbine à gaz GT13E2 dans l'usine ABB de Mannheim

11

fluage sous contrainte et aux charges alternantes, ainsi que l'augmentation de la température d'entrée des turbines sont énormes **10**. L'expérience de longue durée de tels aubages a été acquise sur des groupes propulseurs d'avions. On ne possède encore que de peu d'expérience avec les turbines à gaz industrielles équipées d'aubes DS et SC modernes. Les possibilités de réparation doivent encore être élucidées sur la base des expériences d'exploitation.

Le développement de couches de protection contre la corrosion et l'oxydation haute température, ainsi que les couches de protection thermique permettent une diminution de la quantité d'air de refroidissement, malgré l'élévation de la température des gaz chauds.

Construction des turbines à gaz

Au cours des 60 dernières années, ABB a construit plus de 1200 turbines à gaz d'une puissance totale dépassant

50000 MW. Une expérience de nombreuses années, de bonnes propriétés d'exploitation, la simplicité, une technique moderne et l'orientation vers les besoins des clients caractérisent le concept actuel d'ABB en matière de turbines à gaz et de centrales à cycle combiné. Les caractéristiques constructives des nombreux types de turbines à gaz qu'ABB a fabriqués au cours des 60 dernières années ont été décrites dans [13, 14]. Entre 1947 et 1960, BBC a construit des turbines à gaz à deux arbres avec refroidissement intermédiaire, préchauffeur à air et double alimentation en chaleur (resurchauffe). Les avantages des turbines à un arbre ont pourtant été constatés rapidement. Malgré de nombreuses variantes, les éléments fondamentaux sont restés les mêmes. Également pour les grandes turbines à gaz d'aujourd'hui (puissance >30 MW), la construction repose sur leur technique éprouvée qui se distingue en particulier par la simplicité de la construction et des travaux de révision. Un arbre soudé,

deux paliers et un concept de régulation simple en sont les principales caractéristiques. Pour les turbines à gaz plus petites, on se fonde traditionnellement sur les constructions de propulseurs aéronautiques. Depuis les années 60, les principes de construction des turbines à gaz ABB sont restés inchangés, mais leur perfectionnement s'est poursuivi sans relâche.

11 montre le montage d'une turbine GT13E2, c'est-à-dire d'une turbine à gaz dérivée du modèle GT13E1. Dans la turbine GT13E2, on a remplacé la chambre de combustion à silo par une chambre de combustion annulaire pour des raisons de coûts et de maintenance, ainsi qu'à cause de la meilleure conduite des gaz chauds. Sa construction est fondée sur la chambre de combustion de la turbine GT8. Sinon, les turbines GT1E1 et GT1E2 sont presque identiques. La seconde présente un flux massique et une température d'entrée de la turbine légèrement accrus. Cette élévation de température sans augmentation de la

température de pointe a été rendue possible par le fait que la chambre de combustion annulaire fournit un profil de température plus régulier.

L'arbre d'une turbine à gaz est un composant important. Il est soumis à des forces centrifuges énormes à des températures élevées. Le refroidissement, resp. la protection du rotor contre les gaz chauds et le réchauffement lent contrôlé lors du démarrage à froid (afin de maintenir les tensions thermiques à un bas niveau) constituent des missions importantes de la construction des rotors. Chez les autres fabricants, les conceptions des rotors varient selon les modes de construction et de fabrication. La comparaison des constructions de rotors de différents fabricants présentée dans [15] illustre les avantages des constructions soudées: vibrations réduites et absence de maintenance. Sur un rotor, les composants critiques sont le premier et le dernier disques de la turbine, resp. du compresseur. Le premier

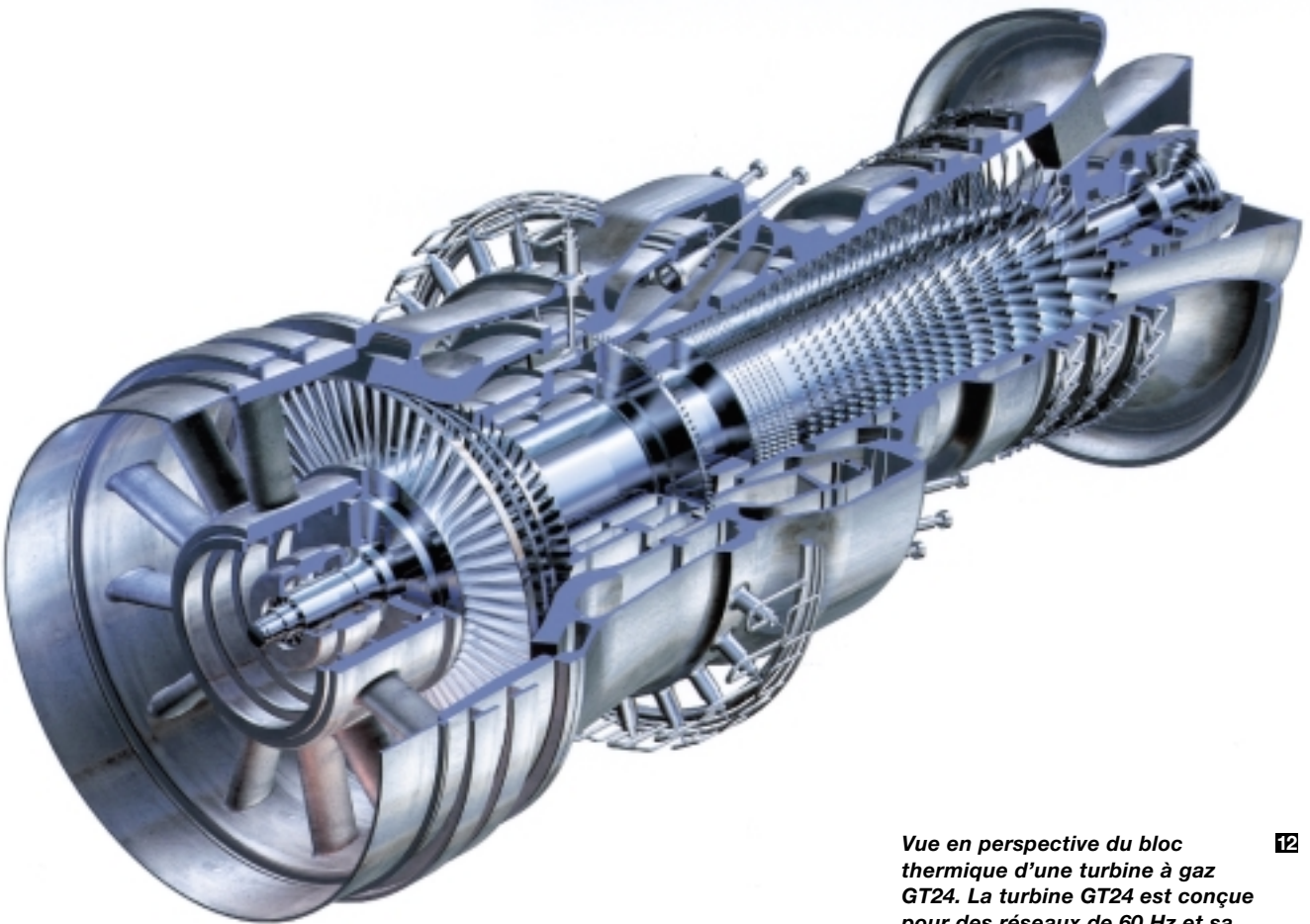
disque du compresseur et le dernier de la turbine sont soumis à des forces centrifuges élevées, tandis que le dernier disque du compresseur et le premier de la turbine sont exposés à des températures élevées. Dans la pratique, le rotor soudé s'est montré très robuste en ce qui concerne la LCF.

Dans les turbines à gaz ABB d'une puissance supérieure à 30 MW, les arbres sont généralement formés de disques forgés et soudés. Pour la preuve des propriétés mécaniques et pour la détection des défauts, les disques et l'arbre soudés sont soumis à différents essais. Les aubes mobiles du compresseur sont montées dans des rainures circumférentielles, tandis que celles de la turbine sont fixées radialement par des pieds dits en sapin et assurées axialement. Dans la zone de la turbine, l'arbre est équipé d'écrans thermiques, pour le protéger contre la haute sollicitation thermique due aux gaz chauds. Ces écrans sont refroidis avec de l'air prove-

nant du compresseur. De l'air est parfois aussi utilisé pour le refroidissement des premières aubes fixes. L'arbre est porté par deux paliers, facilement accessibles à l'arrêt, sans ouverture de la machine. La position axiale du rotor est fixée par un palier axial lisse qui se trouve dans le carter d'admission.

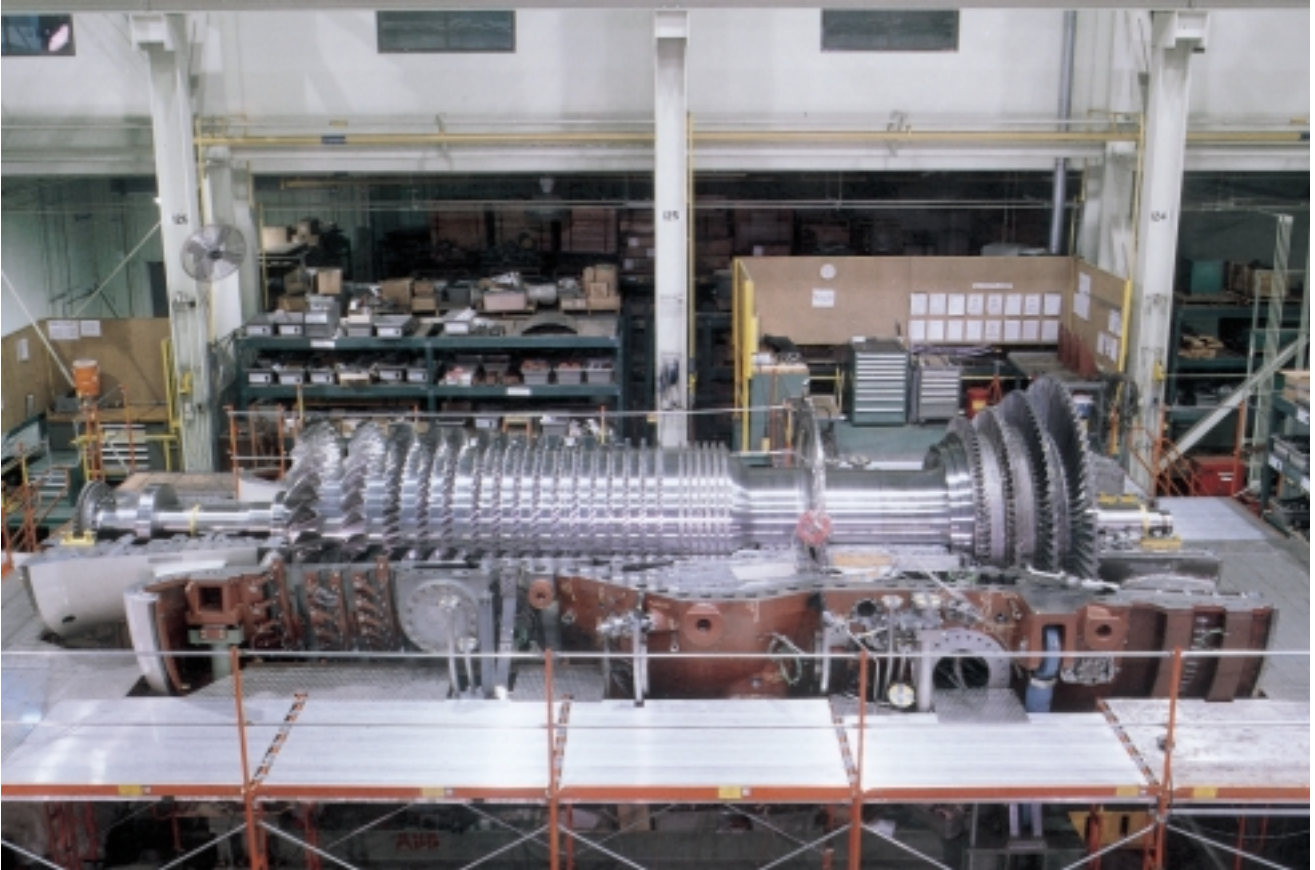
D'autres fabricants construisent des arbres en version à disques tenus mutuellement par des boulons précontraints. Le glissement mutuel des disques est alors empêché soit par une denture Hirth, soit par frottement entre les surfaces frontales des disques.

Les turbines haute température modernes s'utilisent de plus en plus souvent avec des chaudières de récupération, pour former des centrales à cycle combiné. C'est pourquoi l'alternateur est placé sur le côté froid du compresseur. Avec une telle configuration, tout le couple de la turbine est transmis à l'alternateur à travers le compresseur. Autrefois, la transmission du couple par frottement



Vue en perspective du bloc thermique d'une turbine à gaz GT24. La turbine GT24 est conçue pour des réseaux de 60 Hz et sa puissance nominale est 183 MW.

12



Montage d'une turbine à gaz GT24 dans l'usine ABB de Richmond, USA

13

entre les disques avait provoqué des difficultés. Sur la base d'une expérience de plusieurs décennies et des perfectionnements correspondants, les arbres vissés sont actuellement également en mesure de répondre aux exigences.

Caractéristiques constructives des turbines GT24/26

Les deux turbines à gaz appartiennent à une famille – GT24 pour 60 Hz et GT26 pour 50 Hz. 12 et 13 montrent la turbine GT24 en perspective et pendant l'assemblage. Presque tous les composants de la turbine GT26 sont 1,2 fois plus grands que ceux de la version GT24. Ici également, ABB applique la solution éprouvée de l'arbre soudé à deux paliers, avec chambre de combustion annulaire à brûleurs EV. Le système de combustion séquentielle est fondé sur une expérience d'exploitation de 45 ans acquise sur 27 unités. Une machine qui repose sur ce concept a été construite pour la première fois en 1978 pour une

installation d'accumulation d'air implantée à Huntorf, Allemagne.

Le carter d'admission des turbines GT 24/26 est une construction compacte à flux d'entrée optimisé. Le démontage des paliers et des capteurs de surveillance peut se faire sans démontage de l'enveloppe. Le compresseur compte 22 étages (rapport des pressions 30) avec 3 étages d'aubes directrices réglables. Il en découle une charge relativement basse des étages et un très bon comportement en charge partielle. 14 et 15 montrent les composants principaux de la partie médiane: les derniers étages du compresseur, le système de combustion séquentielle avec les étages haute pression de la turbine, ainsi que la turbine basse pression à 4 étages, puis le système des gaz d'échappement.

La construction de la chambre de combustion annulaire haute pression compacte est analogue à la version éprouvée de la turbine GT13E2. Les enveloppes intérieures et extérieures sont formées de segments refroidis par

convection. Dans la turbine GT24, les extrémités des 30 brûleurs EV fixés sur le capot sont maintenues dans le segment frontal. Les systèmes de distribution du gaz naturel et du fuel sont intégrés dans le capot.

La chambre de combustion SEV basse pression est réalisée en construction annulaire compacte. Les segments sont refroidis par convection comme dans le cas de la chambre de combustion haute pression. Par contre, les diffuseurs avant les 24 lances d'injection de combustion sont refroidis par effusion.

Les aubes 3D à courbure spatiale de la turbine 15 sont construites avec des plaques de couverture. Les aubes mobiles ont des pieds axiaux en sapin. Les aubes de l'étage haute pression, ainsi que 3 étages de la turbine basse pression sont refroidis de manière à maintenir une température modérée du métal. Des ouvertures boroscopiques simplifient l'inspection de la turbine.

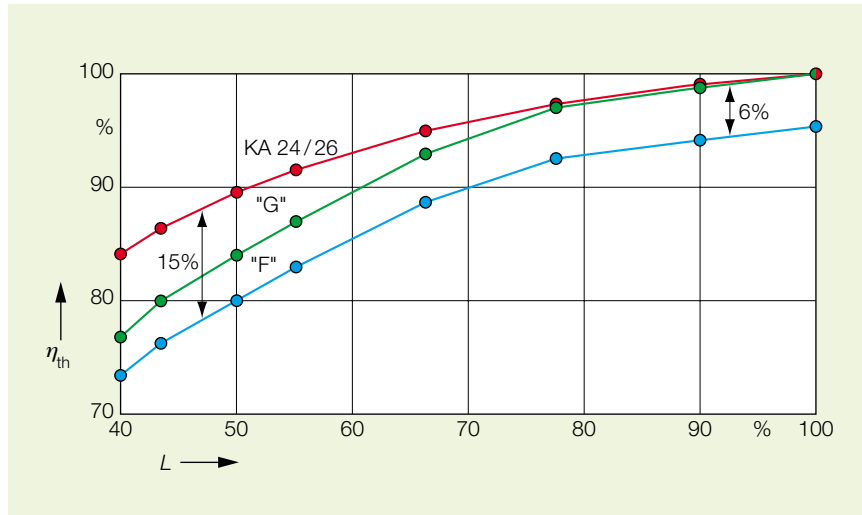
Le carter et le diffuseur des gaz d'échappement ont été construits avec

un écoulement permettant une récupération maximale de la pression. Ici également, on a utilisé une construction éprouvée avec isolation de la structure portante. Celle-ci permet un accès aisé pour les inspections. Les paliers sont déchargés par des supports élastiques.

Conduite du procédé, surveillance et protection

Au cours des dernières années, les exigences posées à la régulation des turbines à gaz se sont fortement accrues. Il s'agit en particulier de la précision des régulations aux événements transitoires, tels que les démarrages, les délestages et le soutien de la fréquence. Cette exigence est imputable aux limites devenues plus étroites de la gamme d'exploitation admissible, en particulier en ce qui concerne le rendement et la limitation des émissions. Ces restrictions sont données par les limites de température et d'extinction, par les zones de pulsation, de pompage, etc. Le dépassement des zones d'exploitation admissibles peut provoquer de grands dommages, des pertes massives d'heures d'exploitation équivalentes et une forte diminution de la disponibilité de la machine. La combustion séquentielle procure ici une plus grande flexibilité. Dans les turbines à gaz GT24/26, celle-ci est utilisée intégralement par un concept de régulation hiérarchique (adaptation de la charge par les régulateurs de combustible EV, resp. SEV, ainsi que modification du flux massique par le réglage des aubes fixes). Ce faisant, on a tenu compte optimalement des conditions physiques du procédé des turbines à gaz qui possède lui-même une structure hiérarchique. Dès le début, le développement du concept de régulation a été accompli en se fondant sur des modèles, c'est-à-dire que ce concept a été projeté et testé à l'aide d'un simulateur dynamique de turbine à gaz. Ce simulateur fait partie des acquis techniques du CACSD (Computer Aided Control System Design) qui sert à développer et à optimiser des régulateurs hautement complexes.

Un autre domaine d'application possible du simulateur de turbine à gaz est la surveillance en ligne du procédé («On Line Process Monitoring»). Les divergences entre le modèle et le procédé réel



Comportement en charge partielle d'installations à cycle combiné KA24/26 équipées de turbines à gaz GT24/26, en comparaison de turbines à gaz de la concurrence

14

η_{th} Rendement thermique relatif
L Charge

Rouge Turbines à gaz GT24/26 dans des centrales à cycle combiné KA24/26
Bleu Turbines à gaz de la classe «F» de la concurrence
Vert Turbines à gaz de la classe «G» de la concurrence

permettent de tirer des conclusions sur les modifications du procédé. Celles-ci peuvent servir à élaborer un concept de maintenance.

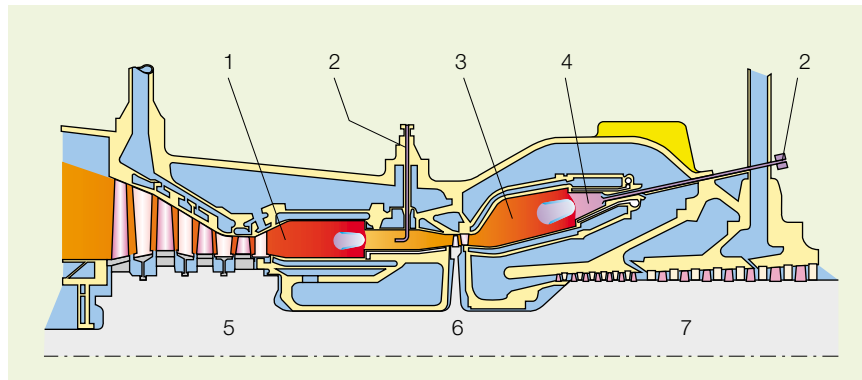
Le concept de la protection tient si possible compte de toutes les perturbations imaginables. Celles-ci peuvent être

en partie détectées par des simulations d'exploitation. Les mesures de protection servent à la sûreté de l'exploitation. De manière générale, elles perturbent pourtant la disponibilité de l'installation. Par conséquent, celle-ci doit être assurée par des redondances, des procédu-

Composants principaux de la partie médiane des turbines à gaz GT24 et GT26 avec le système de combustion séquentielle

15

- 1 Chambre de combustion SEV
- 2 Injection du combustible
- 3 Chambre de combustion EV
- 4 Brûleur EV
- 5 Turbine basse pression
- 6 Turbine haute pression
- 7 Compresseur



res de contrôle automatiques, ainsi que par des composants fiables et robustes. Les principales actions de protection sont les délestages de protection (décharge en 2 minutes sur la marche à vide) et le déclenchement d'urgence («Trip» de turbine à gaz). Ce dernier doit si possible être évité à cause des sollicitations élevées de la machine.

Perspectives

En raison du développement positif du marché qui se dessine pour les prochaines décennies, la technique des turbines à gaz peut évoluer à grands pas [4, 5, 16, 17]. L'augmentation de la puissance unitaire, le respect des prescriptions concernant les émissions et une construction robuste se trouvent au centre de l'attention. Avec la combustion séquentielle et par la poursuite des perfectionnements de la technologie fondamentale, le but d'ABB, à savoir un rendement thermique de 60 % sans diminution de la disponibilité de la centrale, sera atteint dans un proche avenir.

Les technologies fondamentales sont perfectionnées par tous les fabricants. Le refroidissement à la vapeur des turbines à gaz, dans un procédé fermé à cycle combiné, a déjà été breveté par ABB en 1982 et doit être introduit soigneusement. Des problèmes, tels que les incrustations et l'obturation des alésages fins de refroidissement, le démarrage avec de l'air de refroidissement et la mutation subséquente sur de la vapeur, les changements de charge, les mises hors service, etc., doivent être résolus à l'échelle industrielle pour permettre l'exploitation commerciale. Dans le domaine des matériaux, des couches de protection, du CFD, etc., des effets de synergie pourraient certainement s'obtenir par la collaboration des fabricants de turbines à gaz dans différentes instances. Le processus de combustion et la construction des chambres de combustion constituent des technologies fondamentales, d'autant plus que la flexibilité en matière de combustible sera demandée de plus en plus souvent.

Dans le domaine de la technique des turbines à gaz, ABB est sur la bonne voie par l'introduction de la combustion séquentielle et des rapports de pression élevés des turbines GT24/26, ainsi que

par les brûleurs pour combustibles de pouvoir calorifique moyen pour les versions GT11N2 et GT13E2.

Bibliographie

- [1] Meyer, A.: Die Gleichdruck-Gasturbine, ihre Geschichte, ihr heutiger Stand und ihre Aussichten für die nahe Zukunft. *Revue Brown Boveri* 26 (1939) 6, 127-140.
- [2] Stodola, A.: Leistungsversuche an einer Gleichdruck-Gasturbine der A.-G. Brown, Boveri & Cie. in Baden. *Revue Brown Boveri* 27 (1940) 4, 79-83.
- [3] Mukherjee, D.: Combustibles non conventionnels pour turbines à gaz. *Revue ABB* 9/95, 29-37.
- [4] Farmer, R.: Steam-cooled 501G rated 230 MW with 2600 °F rotor inlet temperature. *Gas Turbine World*. Nov./déc. 1994, 22-27.
- [5] Corman, J. C.; Paul, T. C.: Power Systems for the 21st Century. «H», *Gas Turbine Combined Cycles*, GER-3935.
- [6] Siemens unveils 240 MW V94.3 Gas Turbine. *Modern Power Systems – Staff Report*. Mars 1995.
- [7] Dörr, H.: Die neue Generation der leistungstarken Gasturbinen für den Einsatz in GuD/Kombi-Kraftwerken in Einwellenanordnung. *BWK*, vol. 48 (1996) 1/2, 47-51.
- [8] Farkas, F.: The Development of a Multi-Stage, Heavy-Duty Transonic Compressor for Industrial Gas Turbines. *ASME* 86-GT-91.
- [9] Sattelmayer, Th. et al.: Second Generation Low-Emission Combustors for ABB Gas Turbines: Burner Development and Tests at Atmospheric Pressure. *Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*. Bruxelles, Belgique. 11-14 juin 1990. Publication N° 90-GT-162.
- [10] Aigner, A. et al.: Second Generation Low-Emission Combustors for ABB Gas Turbines: Tests under Full-Engine Conditions. *Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*. Bruxelles, Belgique. 11-14 juin 1990. Publication N° 90-GT-308.
- [11] Joos, F. et al.: The SEV Combustor: An Innovative Concept Leading to Single Digit NO_x Emission Levels. *Power Gen. '95 Asia*, 27-29 sept. 1995, Singapour.
- [12] Döbbeling, K. et al.: Low NO_x Premixed Combustion of MBTU Fuels using

the ABB Double-Cone Burner (EV Burner). *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*. La Haye, Pays-Bas, 13-16 juin 1994.

- [13] Endres, W.: Les quarante ans des turbines à gaz Brown Boveri. *Revue Brown Boveri* 66 (1979) 2, 61-67.
- [14] Endres, W.: Les turbines à gaz types 9, 11 et 13, leur développement et les résultats d'exploitation. *Revue Brown Boveri* 64 (1977) 1, 5-11.
- [15] Endres, W.: Rotor Design for Large Industrial Gas Turbines. *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*. Cologne, Allemagne, 1-4 juin 1992.
- [16] Corman, J. C.: Gas Turbine Power Generation – Status & Environmental Considerations. *ASME* 95-CTP-29.
- [17] Matsuzaki, H. et al.: Development of Advanced Gas Turbines. *ASME IGTI Conference*. Birmingham, 1996.

Adresse de l'auteur

Dr Dilip K. Mukherjee
 ABB Production d'énergie SA
 Case postale
 CH-5401 Baden/Suisse
 Télécopie: +41 (0) 56 205 28 88