Les techniques de combustion propre du charbon pour des tranches neuves ou existantes

par L. JACQUET (*)

Présentation

Le charbon domine la production d'électricité dans le monde avec près de 40 % de l'énergie produite annuellement.

L'importance du charbon par rapport aux autres sources d'énergie (hydraulique, nucléaire...) devrait se maintenir à l'avenir.

Cette utilisation massive du charbon devra être faite, de plus en plus, en harmonie avec notre environnement : il s'agit d'un objectif majeur à atteindre.

Déjà, il est pratiquement exclu de continuer à construire de nouvelles centrales à charbon pulvérisé « classiques » non dépolluées ; de nombreuses études et réalisations sont en cours pour mettre au point de nouvelles filières de combustion « propre » du charbon.

Cet objectif doit concerner les tranches existantes : en fonction de leur état, de leur utilisation et des conditions locales, différentes techniques peuvent être mises en œuvre, avec des performances de dépollution plus ou moins élevées. Une telle adaptation se doit de rechercher l'optimum technico-économique en s'appuyant sur la notion de meilleure technique disponible à un coût économiquement acceptable.

Après un rappel des réglementations européennes et françaises applicables aux rejets à l'atmosphère des grandes installations de combustion, les différentes techniques de dépollution ou filières de combustion propre, envisageables pour les tranches existantes ou les tranches neuves, sont présentées, avec leurs principes de fonctionnement et leurs performances.

(*) Communication présentée au Séminaire franco-polonais « Le charbon et ses perspectives », CEFIC, 23-25 novembre 1992 publiée avec l'autorisation de l'auteur.

Pour chaque cas, l'approche d'EDF est détaillée, en explicitant, d'une part, les bases de la stratégie élaborée par EDF pour la mise à niveau d'un point de vue environnement de son parc de tranches thermiques à charbon, et d'autre part les différents projets de chaudières à lit fluidisé circulant ou d'installation de gazéification auxquels EDF participe.

1. Les réglementations européenne et française

La réglementation applicable aux tranches existantes est différente de celle applicable aux tranches neuves : celle-ci est définie dans l'arrêté ministériel du 27 juin 1990, qui transcrit en droit français les dispositions de la directive européenne n° 88/609.

Pour une installation neuve de puissance thermique P brûlant du charbon, les valeurs limites sont les suivantes :

P	Poussières	SO ₂	NO _x
P ≥ 500 MW	50	400	
300 MW ≤ P ≤ 500 MW	100	(2400-P)	650
P < 100 MW	100	Arrêté préfectoral	

Les concentrations sont exprimées en mg/Nm³ rapportées à une teneur en O₂ dans les fumées sèches de 6 %.

Pour les installations existantes, cette directive européenne n° 88/609 a fixé, pour chaque État membre, des plafonds et des objectifs de réduction par rapport aux rejets de l'année 1980.

Pour la France, ces objectifs de réduction sont fixés :

- pour le SO₂, à 40 % en 1993 ; 60 % en 1998 ; 70 % en 2003 ;
- pour les NO_x, à 20 % en 1993 ; 40 % en 1998.

Ces objectifs n'ont pas été transcrits dans la réglementation française mais ils constituent une référence autour de laquelle on peut essayer de se situer.

A l'heure actuelle, les prescriptions à respecter par les installations thermiques EDF, portent pour ce qui concerne SO₂, NO_x, HCl et les poussières :

- sur les flux (annuels, journaliers, ...);
- sur les concentrations dans les gaz de combustion rejetés;
- sur les mesures nécessaires au contrôle de l'installation et à la surveillance de ses effets sur l'environnement.

2. Les techniques de dépollution envisageables pour les tranches existantes

En fonction des performances de dépollution visées, différentes solutions peuvent être considérées pour réduire les émissions de SO₂ ou de NO_x :

- les mesures dites primaires agissent au niveau de la combustion et du foyer de la chaudière;
- les mesures dites secondaires traitent les fumées en aval de la chaudière.

Dans de telles solutions, la chaudière existante est conservée. Des « rétrofiting » avec remplacement de la chaudière sont bien sûr envisageables, qui doivent dans ce cas mettre en œuvre de nouvelles filières de combustion propre du charbon.

S'agissant des poussières, la diminution des émissions passe par une amélioration des performances du dépoussiéreur existant.

Une première solution pour réduire les émissions de SO₂ ou de poussières passe par l'utilisation, si c'est possible, de combustible moins soufré et moins cendreux.

La réduction des émissions de SO₂

La désulfuration dite « primaire » consiste en l'injection de chaux ou de calcaire dans le foyer

de la chaudière, en principe au-dessus de la zone des brûleurs : ceci permet de transformer une partie du SO₂ formé lors de la combustion en sulfate de calcium (vu la température à laquelle s'effectue la réaction, il ne devrait pas y avoir formation de sulfite).

Une amélioration du rendement de désulfuration ainsi obtenu est envisageable, par une action en aval du réchauffeur d'air : injection d'eau pour réactiver l'adsorbant n'ayant pas réagi et injection de chaux éteinte.

S'agissant de la désulfuration aval, ou secondaire, différents procédés existent :

- les procédés à rejet, dans lesquels le soufre est capté et maintenu dans un produit qui sera stocké ou valorisé comme co-produit (gypse);

- les procédés à récupération, dans lesquels le réactif est régénéré, après avoir absorbé le SO₂, afin de libérer le soufre sous forme de soufre élémentaire, d'acide sulfurique ou de dioxyde de soufre.

La deuxième famille est peu utilisée en centrale thermique.

Pour la première famille, dite à rejets, les réactions sont effectuées par voie humide ou par voie sèche :

Désulfuration secondaire humide : le réactif est introduit sous forme de solvant liquide, dans une tour de lavage située en aval et donne lieu à formation de gypse, qui peut être valorisé.

Désulfuration secondaire sèche : le réactif est introduit sous forme d'une poudre finement broyée ou par atomisation d'une boue. Ce procédé est à réserver aux faibles teneurs en soufre et donne lieu à un mélange de sulfates-sulfites dont les conséquences en terme de stockage ou de valorisation sont à approfondir.

Le tableau ci-après présente les performances de ces différents procédés, en précisant des concentrations en sortie, données pour un charbon à 1 % de soufre (soit une émission de SO₂ d'environ 1 950 mg/Nm³ à 6 % O₂).

Procédé de SO _x	Rendement escompté %	Teneur en SO ₂ atteinte mg/Nm ³ à 6% O ₂
Primaire		
- Injection dans le foyer	30 à 50	1365 à 975
- Injection dans le foyer + complément aval RA	70 à 80	585 à 390*
Secondaire		
- Sec	> 85	< 300
- Humide	> 90	< 200

La réduction des émissions de NO_x

La dénitrification dite « primaire » permet de limiter la production de NO_x : elle consiste à modifier les conditions de combustion en la retardant et en créant ponctuellement des zones plus ou moins réductrices qui défavorisent la formation de NO_x. Les modifications sont effectuées au niveau du foyer et peuvent comprendre : brûleurs bas NO_x (LBN), injection étagée d'air secondaire (OFA), recyclage partiel des fumées aux brûleurs.

La dénitrification dite « secondaire » vise à réduire les émissions de NO_x formés lors de la combustion. Les différents procédés secondaires utilisés sont les suivants :

- la réduction catalytique sélective utilisant l'action de l'ammoniac en présence d'un catalyseur : c'est la méthode la plus utilisée ;
- la réduction sélective non catalytique, basée sur la réaction directe de l'ammoniac ou de l'urée avec NO et NO₂ à haute température ;
- les procédés combinés de SO_x/de NO_x, peu répandus à ce jour en centrale thermique.

Il est important de noter que les émissions de NO_x sont très liées aux conditions de combustion, et donc au type de chauffe.

A titre indicatif, les émissions « naturelles » relevées sur les tranches d'EDF sont les suivantes :

- chauffe frontale 1 000 à 1 300 mg/Nm³ (6 % O₂) ;
- chauffe tangentielle 660 à 1 100 mg/Nm³ (6 % O₂) ;
- chauffe en voûte 1 300 à 1 400 mg/Nm³ (6 % O₂).

Les performances que doivent permettre d'atteindre les procédés de NO_x présentés ci-avant sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Application de ces techniques de dépollution

Elle est à effectuer au cas par cas, en fonction des critères suivants :

- contexte local ;
- les limitations à respecter ;
- l'âge des tranches ;
- leur durée de vie résiduelle ;
- leur état ;

- les coûts de rénovation ;
- les coûts de prolongation de durée de vie ;
- les contraintes d'implantation ;
- l'incidence sur les équipements existants (dépollueurs, cheminée, évacuation des cendres, ...) ;
- les caractéristiques des sous-produits.

3. Les adaptations envisagées par EDF sur ses tranches charbon pour préserver l'environnement

Rappelons d'abord que la structure même du parc EDF de production d'électricité (75 % nucléaire-15 % hydraulique) situe le taux d'émission de polluants rapportés à la production totale française d'électricité parmi les plus faibles.

Au cours de la dernière décennie, le développement du parc nucléaire et la réduction de l'utilisation des moyens de production thermiques classiques ont eu pour effet de diminuer les quantités de gaz polluants rejetés.

Cette situation se modifie avec le rééquilibrage progressif de l'ensemble du parc de production d'électricité : le parc de tranches à charbon va retrouver un fonctionnement soutenu, conduisant à un accroissement des rejets de polluants atmosphériques.

Pour faire face à cette évolution, EDF a engagé un certain nombre d'actions pour permettre la mise en œuvre d'un programme d'adaptation de différentes tranches.

Le principe retenu pour ce programme est de maximiser la réduction de la quantité d'émission de polluants par rapport aux dépenses d'investissement consenties et aux surcoûts d'exploitation entraînés, tenant compte de la durée de vie des équipements et de leur potentiel d'utilisation.

L'objectif est de réduire, par rapport aux émissions relevées en 1980, d'un facteur supérieur à 3 pour les émissions de SO₂ et d'un facteur supérieur à 2 pour les émissions de NO_x.

La structure du parc à charbon d'EDF

Il comporte 28 tranches pour une puissance globale de 8 200 MWe, se répartissent comme suit :

Procédé de NO _x	NO _x espérés (mg/Nm ³ à 6% O ₂)
Primaire tangentielle	400 à 600
Primaire frontale	550 à 900
Injection d'urée	200 à 300
Réduction catalytique sélective	< 200

Puissance MWe	250	600
Chauffe frontale	12	1
Chauffe tangentielle	9	4
Chauffe en voûte	2	

Les actions engagées par EDF

Les 3 dernières tranches 600 MWe mises en service par EDF en 1983 et 1984 sont appelées à avoir un fonctionnement proche de la base : ces tranches seront équipées d'installation de désulfuration secondaire, de type humide au calcaire gypse. Les mises en service sont prévues en 1996 et 1997.

Des expérimentations des procédés primaires de SO_x et de NO_x sont en cours sur différentes tranches de types différents (de façon à couvrir la diversité du parc), dont les résultats seront disponibles en 1993-1994. Le but de ces essais est de :

- valider les performances attendues ;
- mettre au point et optimiser les modes d'exploitation ;
- préciser les solutions à développer pour le devenir des cendres en résultant.

Le tableau ci-dessous fait le bilan des actions engagées.

4. Les filières de combustion propre

Outre les chaudières classiques de combustion bas NO_x et de traitement aval des fumées (désulfuration, dénitrification type SCR, dépoussiérage), filière éprouvée, les nouvelles techniques de combustion propre du charbon que l'on peut considérer aujourd'hui sont :

- les chaudières à lit fluidisé circulant (LFC) ;
- les lits fluidisés sous pression (PFBC) ;
- la gazéification du charbon intégrée à un cycle combiné (IGCC).

Les chaudières à lit fluidisé circulant atmosphérique

Dans cette technique, une masse importante de particules solides (généralement des cendres) est mise en suspension dans un foyer par un fort débit d'air. Cette masse chaude en mouvement, où sont injectées des particules de charbon et de calcaire, est continuellement entraînée vers l'extérieur du foyer et doit être séparée des fumées par un séparateur cyclone afin d'être recyclée. Cette recirculation dans le foyer permet

Centrale	MWe	Type de chauffe	Combustibles	Procédé testé	Polluant visé	Réduction prévue %
BLENOD	250	tangent.	charbon	Brûleursbas NOx+OFA	NOx	40-50
VITRY	250	frontale	charbon	Brûleursbas NOx+OFA	NOx	30-45
LAMAXE	250	tangent.	charbon	Injection de CaCO ₃ dans le foyer+injection second. de chaux éteinte	SO ₂	70-80
LOIRE/RHONE	250	frontale	charbon	Injection de CaCO ₃ dans le foyer	SO ₂	50
PORCHEVILLE	600	tangent.	FO	Brûleursbas NOx+OFA	NOx	>50
LEHAVRE	250	tangent.	charbon	désulfuration des fumées	SO ₂	>90
CORDEMAIS	250	tangent.	charbon	désulfuration des fumées	SO ₂	>90

- (1) Les actions primaires sur chaudières à chauffe tangentielle sont menées avec le Constructeur STEIN INDUSTRIE.
 (2) Les actions primaires relatives aux chaudières à chauffe frontale le sont avec BABCOCK ENTREPRISE.

une combustion satisfaisante du charbon, malgré la température relativement basse qui est maintenue à 850 °C afin de favoriser la captation du dioxyde de soufre (SO₂) par le calcaire et pour la formation des oxydes d'azote. Les cendres extraites périodiquement du foyer sont pulvérulentes et en quantité plus importante que pour les chaudières classiques à charbon pulvérisé.

Les lits fluidisés sous pression

Dans ce système, le charbon est brûlé sous pression (15 à 20 bars) dans une chaudière à lit fluidisé. Les gaz de combustion chauds et sous pression sont dépoussiérés en sortie du foyer, par une série de cyclones, puis envoyés directement dans une turbine à gaz de détente qui produit environ 20 % de la puissance. La chaudière et le lit fluidisé proprement dit sont refroidis par des tubes parcourus par de l'eau qui, après vaporisation et surchauffe, alimente de façon classique une turbine à vapeur entraînant un alternateur. Le rendement attendu pour ce type de centrale est de 40 à 42 %, mais cette technique pose de difficiles problèmes liés à la bonne tenue des surfaces d'échange dans le foyer et au dépoussiérage à chaud des gaz, qui risquent d'éroder les aubages de la turbine. Les performances vis-à-vis de l'environnement sont comparables à celles des lits fluidisés atmosphériques.

La gazéification du charbon intégrée à un cycle combiné

Dans cette filière, un gaz, produit par la gazéification sous pression du charbon (à l'air ou à l'oxygène), est refroidi puis épuré très soigneusement afin de servir comme combustible dans une turbine à gaz dont les fumées à haute température permettent de générer de la vapeur pour alimenter une turbine à condensation classique. Ce cycle combiné, alimenté par du gaz de synthèse à la particularité d'utiliser au maximum la chaleur récupérée au cours du refroidissement du gazogène et pendant le traitement du gaz. Tout ceci concourt au très bon rendement de l'ensemble, qui atteint environ 45 %. Cette technique a aussi le grand avantage, malgré sa complexité, de réduire très fortement les émissions de polluants gazeux et de limiter la quantité de rejets solides (cendres fondues + soufre pur commercialisable), mais son coût reste encore très élevé.

5. Les projets de combustion propre auxquels participe EDF

EDF suit de façon continue ces différentes techniques de combustion propre du charbon.

La technique du LFC est très prometteuse et atteint aujourd'hui, avec le projet de Gardanne, le niveau 250-300 MWe.

Les tranches neuves dont EDF pourrait avoir besoin au-delà de 2000 auront une puissance de 600 MWe. C'est avec cet objectif qu'EDF a engagé, depuis plusieurs années maintenant, un programme d'études, de recherche et de développement axé sur l'extrapolation de la filière LFC vers les grandes puissances.

Outre des études sur maquette physique ou modèles numériques, ce programme inclut la participation à différents projets industriels, croissant en taille, avec une implication de plus en plus forte d'EDF :

- CARLING 4 : LFC de 125 MWe
- TERUEL : LFC de 175 MWe
- GARDANNE 4 : LFC de 250 MWe

Il est intéressant de noter que ces 3 projets caractérisent bien le processus d'accroissement en taille des LFC.

Pour compléter cette approche des filières de combustion propre du charbon, EDF a décidé de participer de façon importante au projet de gazéification de PUERTOLLANO en Espagne.

Le projet de CARLING

EDF participe à la réalisation de la chaudière LFC 125 MWe de CARLING, en collaboration avec les Charbonnages de France. Cette chaudière LFC remplace la chaudière à charbon pulvérisé, la salle des machines étant conservée. La tranche équipée de sa nouvelle chaudière a été couplée en juillet 1990.

Outre le suivi technique approfondi pendant la réalisation, des essais approfondis d'évaluation de la filière LFC sont menés par EDF jusqu'en 1992-1993.

Les objectifs de ces essais visent à :

- la connaissance des performances d'émission de polluants et l'analyse des paramètres d'influence ;
- la connaissance du procédé et la validation de modèles ;
- l'évaluation des performances dynamiques et de la souplesse du procédé ;
- l'aide à la conception pour les futurs projets LFC ;
- l'aide à l'exploitation.

La préparation de ces essais est engagée depuis 1988 et a conduit à l'installation en 1990 et 1991 d'une instrumentation et de moyens d'essais spécifiques :

- sondes non refroidies de prélèvement de gaz et particules en différents points du process (foyer, amont-aval cyclones, amont-aval filtre à manches) ;

- capteurs de flux thermiques en parois du foyer ;
- acquisition d'environ 250 mesures normales d'exploitation ;
- environ 300 capteurs (température, pression, débit) installés spécifiquement ;
- soit un total d'environ 650 mesures qui peuvent être acquises suivant une période d'acquisition réglable et traitées en partie en temps réel (système basé sur un matériel HP 9000 utilisant le logiciel d'acquisition PATTERN développé par EDF).

Un développement de métrologie fine adaptée au LFC est aussi engagé : elle concerne les mesures de concentration, taille, vitesse et températures des particules, ainsi que concentration en oxygène, température, voire vitesse de gaz.

Deux campagnes d'essai ont pu être menées à ce jour, une troisième étant prévue pour novembre 1992.

Le projet de TERUEL

Il s'agit d'une tranche neuve installée dans la centrale de Teruel appartenant à la Compagnie Espagnole d'Électricité, avec qui EDF s'est associée pour la réalisation de cette tranche équipée d'une chaudière LFC de 175 MWe.

Destiné à brûler un charbon très pauvre et très soufré, ce projet en est actuellement au stade de l'obtention des autorisations vis-à-vis de la réglementation espagnole sur l'environnement.

Le projet de GARDANNE

La centrale de Provence à Gardanne est située dans le sud de la France : elle comprend 2 tranches en activité, de puissance respective 250 et 600 MWe. Le projet consiste à remplacer la chaudière existante de la tranche 250 MWe par une chaudière LFC, le reste des installations de la tranche, notamment la salle des machines, étant conservé. Il s'agit de la chaudière LFC la plus puissante à ce jour.

Cette chaudière se caractérise principalement par :

- un foyer LFC à 2 grilles de fluidisation ;
- 4 cycles réfractorisés ;
- 4 lits extérieurs ;
- 2 refroidisseurs de cendres ;
- une chaudière à convection.

Il est prévu d'associer à cette chaudière LFC un ensemble TAC-chaudière de récupération pour former un cycle mixte (dans un schéma à faible intégration, chaque composant pouvant fonctionner seul).

Le combustible de base est le charbon de Gardanne, qui se caractérise par une teneur en soufre importante (plus de 4 %), une teneur en cendres contenant, à peu près 60 % de chaux, et par un pouvoir calorifique faible.

Un combustible complémentaire est envisagé : il s'agit de brai pétrolier, qui se caractérise notamment par sa viscosité importante et une teneur élevée en soufre ; le dimensionnement correspondant à ce combustible est limitée à 50 % de la charge thermique maximale.

Les performances principales visées sont les suivantes :

- puissance nominale en cycle simple : 250 MWe
- puissance nominale en cycle mixte : 303 MWe
- émission de SO₂ < 400 mg/Nm³
- émission de NO_x < 250 mg/Nm³
- émission de poussières < 50 mg/Nm³

Le contrat de la chaudière LFC proprement dite a été passé à STEIN-INDUSTRIE en novembre 1992.

La mise en service de cette installation est prévue pour novembre 1995, le délai global de réalisation, y compris les études, étant de 39,5 mois.

Gazéification : le projet de PUERTOLLANO

La centrale est de type IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), c'est-à-dire constituée par un cycle combiné d'une puissance électrique brute de 330 MWe capable d'un rendement au moins égal à 45 % (sur PCI) associé à une unité de gazéification de charbon.

Elle sera implantée sur le site de PUERTOLLANO (Espagne) situé à 200 km environ au sud de Madrid à proximité d'une mine de charbon.

Ce projet est élaboré par le consortium ELCOGAS qui regroupe plusieurs producteurs électriques européens : ENDESA, EDF HIBERDROLA, SEVILLANA, EDP...

Principales caractéristiques techniques :

- puissance électrique brute 337 MWe
- puissance électrique nette 305 MWe
- rendement sur PCI 45 %

(charbon de PUERTOLLANO : pouvoir calorifique = 5 400 kcal/kg 22 % cendres, 4 % soufre, 0,5 % chlore)

- rejets gazeux :

- SO₂ (15 % O₂) = < 10 mg/Nm³
- NO_x (15 % O₂) = < 60 mg/Nm³
- CO₂ = inférieur à 80 % d'une

tranche électrogène thermique classique

- consommation : 100 t/h de charbon.

Planning

- ouverture chantier : avril 1993 ;
- essais en cycle combiné en gaz naturel : juillet 1993 ;
- essais en cycle combiné en gaz de synthèse : septembre 1996.

Les essais prévoient un programme de démonstration sur 3 ans (1996-1999) pendant lequel une dizaine de charbons internationaux seront utilisés.

La centrale pourra également utiliser un mélange de charbon et de coke de pétrole.

Un dispositif d'injection de calcaire est prévu pour permettre l'utilisation de charbon à haute température de fusion des cendres.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, nous ont aidé dans la préparation du présent ouvrage : Leszek WITCZAK pour les traductions, l'équipe du Ceffic avec Agnieszka osuch ET MAREK CZYZYCKI pour l'organisation, la maquette et la PAO, Henri PIATIER et Ewa NIEMIROWICZ du CIFOPE pour leur relecture minutieuse.

Première annonce

19^e RÉUNION SCIENTIFIQUE de l'Association des Épidémiologistes de Langue Française

« RISQUES LIÉS À L'ENVIRONNEMENT »

École Nationale de la Santé Publique

Rennes – 28-30 Septembre 1994

Deuxième annonce

Des renseignements supplémentaires, ainsi que la fiche d'inscription et des formulaires pour les résumés, seront inclus dans la deuxième annonce prévue au mois de mars 1994. La date limite pour soumettre un résumé sera le 14 mai 1994.

Si vous souhaitez recevoir les informations ultérieures, vous adresser au secrétariat du Congrès :

Congrès ADELFF

École Nationale de la Santé Publique – Saint-Maurice,
14, rue du Val d'Osne – 94415 SAINT-AURICE CEDEX

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Responsable : Sylvaine CORDIER

COMITÉ D'ORGANISATION

Responsables : William DAB et Marie-Thérèse ADAM

PROGRAMME SCIENTIFIQUE PRÉLIMINAIRE

La réunion sera organisée sous forme de trois séances plénières et de séances parallèles en communication orales ou en posters.

Les sujets suivants seront traités en séance plénière :

- Priorités de recherche et priorités de santé publique.
- Méthodes et applications de l'évaluation des risques.
- Surveillance en santé environnementale.

Les séances parallèles seront organisées en fonction des communications soumises sur des thèmes spécifiques portant sur :

Les aspects méthodologiques :

ex. : modélisation, analyse de clusters, relations dose-effet, mesures des expositions, recherche d'indicateurs précoces d'effets sur la santé, évaluation des risques...

Les aspects thématiques :

- pollution atmosphérique ;
- déchets ;
- risques hydriques et alimentaires ;
- métaux lourds ;
- risques infectieux ;
- risques allergiques ;
- radiations ionisantes et non-ionisantes ;
- pollutions intérieures ;
- milieu urbain, milieu rural et santé ;
- changements climatiques planétaires...

La pratique de l'épidémiologie :

- stratégies d'investigation ;
- réseaux sentinelles ;
- évaluation des systèmes de surveillance...