

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES
COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DU CHARBON ET DE L'ACIER

RECUEILS DE RECHERCHES CHARBON

ÉTUDE SUR LA COMBUSTION DU CHARBON
RAPPORT DE SYNTHÈSE 1962-1970
CERCHAR

Utilisation du charbon

Recueil
N°
38

LUXEMBOURG 1971

CECA 610

Aux termes de l'article 55, alinéa 2, c, du traité instituant la Communauté européenne du charbon et de l'acier, la Haute Autorité encourage la recherche intéressant le charbon et l'acier, notamment en accordant des aides financières. La présente brochure rend compte de l'exécution et des résultats de l'un de ces projets de recherche.

En conséquence du traité de fusion du 8 avril 1965, la Commission unique des Communautés européennes exerce les pouvoirs et les compétences dévolus à l'ex-Haute Autorité.

ÉTUDE SUR LA COMBUSTION DU CHARBON

Rapport de synthèse des recherches effectuées par le Centre d'études et de recherches
des Charbonnages de France (CERCHAR) avec l'aide financière
de la CECA entre 1962 et 1970

Luxembourg 1971

SOMMAIRE

I — Introduction.	5
II — Recherches sur la combustion en couche fixe.	6
1. Étude de la formation des mâchefers en pot-foyer expérimental.	6
1.1. Généralités.	6
1.2. Appareillage utilisé.	6
1.3. Conduite des essais.	6
1.4. Résultats.	7
1.5. Résumé et conclusions.	8
2. Étude de l'inflammation et de la combustion des charbons calibrés sur grille.	9
2.1. Généralités.	9
2.2. Appareillage utilisé.	9
2.3. Essais en ambiance « froide ».	10
2.3.1. Conduite des essais.	10
2.3.2. Résultats.	10
2.3.3. Résumé et conclusions.	11
2.4. Essais avec parois chaudes radiantes.	12
2.4.1. Conduite des essais.	12
2.4.2. Résultats des essais principaux.	13
2.4.3. Résultats des essais complémentaires.	14
2.4.4. Résumé et conclusions.	14
III — Recherches sur la combustion du charbon pulvérisé.	15
1. Études de laboratoire.	15
1.1. Généralités.	15
1.2. Comparaison de l'aptitude à l'inflammation de différents charbons.	15
1.2.1. Appareillage et mode opératoire.	15
1.2.2. Résultats.	16
1.3. Étude de l'inflammation en chauffe rapide.	16
1.3.1. Généralités	16
1.3.2. Four à chauffage brusque par contact.	17
1.3.2.1. Description.	17
1.3.2.2. Utilisation du four comme inflammateur.	17
1.3.2.3. Utilisation comme pyrolyseur à chauffage rapide.	18
1.3.3. Four à chauffage brusque par rayonnement.	19
1.3.3.1. Description.	19
1.3.3.2. Résultats.	19
1.4. Résumé et conclusions.	20

2.	Études sur modèles mathématiques.	21
2.1.	Généralités.	21
2.2.	Principe du calcul.	21
2.3.	Modèle de référence.	22
2.4.	Étude de l'influence des principaux paramètres.	22
2.5.	Résumé et conclusions.	24
3.	Études sur modèles réduits (Maquettes).	24
3.1.	Généralités.	24
3.2.	Étude sur les chaudières à flammes tangentielles.	24
3.2.1.	But de l'étude.	24
3.2.2.	Principe de la méthode utilisée.	25
3.2.3.	Étude et choix de la structure des brûleurs.	25
3.2.4.	Essais industriels des brûleurs sélectionnés.	26
3.2.5.	Étude sur modèle de l'ensemble des trois étages de brûleurs.	26
3.2.6.	Essais industriels avec injections d'air par les grandes façades du foyer.	27
3.2.7.	Résumé et conclusions.	27
3.3.	Étude sur un modèle réduit de four à ciment.	27
3.3.1.	But de l'étude.	27
3.3.2.	Description de l'installation expérimentale.	28
3.3.3.	Essais préliminaires pour le choix des critères de similitude.	28
3.3.4.	Étude de l'influence de la vitesse à la tuyère.	29
3.3.5.	Conclusions.	29
4.	Études en four-pilote de brûleurs à turbulence	29
4.1.	Généralités.	29
4.2.	Description du four pilote et de ses annexes.	30
4.3.	Études et essais préliminaires.	30
4.4.	Première étude complète d'une flamme de référence.	31
4.5.	Étude complète d'une série de flammes types.	31
4.5.1.	Sélection des flammes types au moyen des essais « à blanc »	31
4.5.2.	Étude complète de six flammes types	32
4.6.	Étude de prototypes industriels.	34
4.6.1.	Prototype pour charbons maigres.	34
4.6.2.	Prototype pour charbons flambants.	34
4.7.	Résumé et conclusions.	35
	Bibliographie	37
	Tableaux	38
	Figures	44

RECHERCHES SUR LA COMBUSTION DU CHARBON

Rapport de synthèse des recherches effectuées par le Cerchar, avec l'aide financière de la Haute Autorité de la CECA, entre le 1^{er} janvier 1962 et le 31 mars 1970

I — Introduction

L'utilisation du charbon comme combustible répond à une grande variété de besoins: chauffage domestique, production de vapeur, chauffage de fours industriels divers, production d'énergie électrique. D'autre part, le terme « charbon » recouvre une variété non moins grande de produits commerciaux qui diffèrent par leur nature ou « rang » (matières volatiles, pouvoir agglutinant ou cokéfiant), leur taux de cendres, leur granulométrie.

Pour répondre à cette double diversité, il n'est pas étonnant que les constructeurs de foyers aient dû faire appel à des solutions techniques d'une grande variété (19).

Cependant, quelle que soit l'application considérée, on peut assigner à la recherche du progrès technique en matière de combustion des objectifs généraux communs:

- l'économie énergétique, par la réduction des pertes thermiques et l'amélioration du rendement;
- l'économie d'exploitation par la réduction du coût du matériel et la recherche d'une plus grande automaticité dans la conduite des appareils, procurant une économie de main-d'œuvre;
- une plus grande « polyvalence » des foyers, c'est-à-dire la possibilité de les adapter facilement à une gamme de charbons commerciaux aussi large que possible, afin de permettre une certaine souplesse d'approvisionnement.

C'est en gardant à l'esprit ces objectifs généraux, de caractère pratique, que le Cerchar poursuit depuis plus de vingt ans, en liaison étroite avec les constructeurs de foyers à charbon et les utilisateurs, des recherches sur la combustion du charbon. De caractère à la fois scientifique et technique, ces re-

cherches ont pour but immédiat de fournir aux constructeurs les connaissances de base qui leur sont les plus utiles pour améliorer la conception des foyers et en rendre la conduite plus rationnelle.

Le présent rapport expose l'ensemble des études effectuées par cet organisme entre le 1^{er} janvier 1962 et le 31 mars 1970, avec l'aide financière de la Haute Autorité de la CECA.

Dans le vaste domaine des foyers à grille, on s'est surtout attaché à préciser les conditions à réaliser pour assurer dans les meilleures conditions la combustion de différentes catégories de charbons, tant dans les petits foyers automatiques de chauffage que sur les grilles mécaniques industrielles. Une étude particulière de la scorification des résidus minéraux a également été effectuée, en raison de l'importance de ce phénomène pour le bon fonctionnement des petits foyers automatiques.

Mais la part la plus importante des recherches effectuées par le Cerchar au cours des dix dernières années a porté sur la combustion du charbon pulvérisé; les objectifs pratiques visés étaient au nombre de quatre:

- donner aux exploitants les moyens de mieux sélectionner les charbons ou mélanges de charbons destinés à un type de foyer déterminé;
- améliorer l'efficacité de la combustion, notamment dans le cas des charbons à faible indice de matières volatiles, afin de réduire les pertes par imbrûlés solides et d'accroître le rendement thermique des foyers;
- réduire le coût des installations par la réduction du volume des chambres de combustion (cas des chaudières utilisant des charbons à faible indice de matières volatiles), ou par l'accroissement de la production unitaire (cas des fours à ciment);

- accroître la « polyvalence » des chaudières de centrales thermiques par le développement de brûleurs nouveaux adaptés aux charbons à faible indice de matières volatiles (brûleurs d'angle pour chaudières à flammes tangentielles, brûleurs à turbulence pour chaudières à brûleurs en façade).

II — Recherches sur la combustion en couche fixe

1. Étude de la formation des mâchefers en pot-foyer expérimental (1) (2)

1.1. Généralités

Les foyers mécaniques de chauffage au charbon se sont beaucoup développés en Europe au cours des 15 années qui ont suivi la guerre, en raison des avantages de confort et d'économie thermique qu'ils présentent, comparés aux foyers manuels. En contrepartie, ces foyers sont très sensibles à la façon dont les matières minérales se comportent au cours de la combustion et exigent des qualités de charbon bien déterminées; on peut à cet égard classer les foyers automatiques à charbon en deux grandes catégories:

- les foyers à décrassage discontinu (à l'outil ou par poussoir) dans lesquels il est nécessaire d'obtenir des mâchefers très denses, de faible volume et néanmoins perméables à l'air;
- les foyers à décrassage continu, où il convient au contraire d'éviter une scorification trop poussée des matières minérales, afin d'empêcher l'adhérence des mâchefers aux barreaux de grille.

Les phénomènes de scorification qui jouent un rôle si important dans ce type de foyer sont complexes et encore mal connus. A priori, ils dépendent de la température atteinte dans la couche de charbon en combustion, laquelle dépend à son tour de la nature du charbon, de sa granulométrie, de l'épaisseur de la couche et du débit d'air soufflé.

Le but de l'étude entreprise par le Cerchar a été de préciser l'influence de ces différents paramètres dans le cas pratique très important des combustibles non agglutinants (anthracites, maigre, flambant sec, coke).

1.2. Appareillage utilisé (figure 1)

Il comprend essentiellement un pot de combustion cylindrique (pot-foyer) de 30 cm de diamètre intérieur dont la paroi est garnie d'un revêtement en

béton réfractaire de 6 cm d'épaisseur. Le fond du pot est occupé par une grille formée d'une spirale en acier réfractaire. L'air est soufflé par une buse de distribution d'air comportant un dispositif assurant une répartition uniforme sous toute la surface de la grille.

Dans la paroi cylindrique du pot sont aménagés des orifices à différentes hauteurs pour prélèvement de gaz; au-dessus du pot une arche refroidie de hauteur réglable supporte une série de cannes pyrométriques à thermo-couples qui peuvent pénétrer verticalement dans la couche à différentes profondeurs. Le débit d'air soufflé est mesuré à l'aide d'un diaphragme normalisé et la pression d'air sous grille est enregistrée.

1.3. Conduite des essais

Les essais sont conduits de façon discontinue; une charge de charbon est mise en place sur la grille et répartie uniformément sur une hauteur déterminée à l'avance. Cette charge est enflammée par du petit bois et le débit d'air est fixé à sa valeur de réglage. Au fur et à mesure de l'avancement de la combustion, on maintient l'épaisseur de la couche constante en ajoutant fréquemment de petites charges de charbon. L'essai est poursuivi jusqu'à ce que les résidus minéraux occupent un volume suffisant pour se prêter à des mesures de volume et de cohésion mécanique satisfaisantes; il est interrompu avant que la présence de ces résidus ait pu avoir des répercussions défavorables sur la combustion. En pratique, l'expérience a conduit à adopter des durées d'essai de l'ordre de 7 à 8 heures pour une couche de 10 cm.

Les variables qui définissent les conditions d'un essai sont la nature du combustible, sa granulométrie, l'épaisseur de la couche et le débit d'air soufflé.

Dans une première série d'essais, on a maintenu constantes la granulométrie (6-10 mm), l'épaisseur de couche (10 cm) et on a étudié l'influence de la nature du combustible et du débit d'air sur le phénomène de scorification.

Les combustibles utilisés pour cette première série d'essais sont indiqués dans le tableau 1 qui précise leurs principales caractéristiques. On voit que cette première série d'essais se caractérise par de grandes différences dans les caractéristiques de fusibilité des cendres.

Au cours d'essais complémentaires, on a examiné l'influence de l'épaisseur de couche, de la granulométrie, et on a également étudié des mélanges en proportions variables de deux types de charbons maigres, l'un à cendres peu fusibles, l'autre à cendres fusibles.

Au cours de chaque essai, on enregistrait l'évolution de la pression sous grille et l'évolution des températures atteintes à différents niveaux dans la couche. Une fois l'essai terminé, on mesurait le volume apparent des résidus.

De l'ensemble des mesures effectuées, on retenait comme résultats caractéristiques les éléments suivants:

- le *volume spécifique apparent des résidus* exprimé en dm^3/kg ; cet élément caractérise assez bien les propriétés mécaniques des mâchefers et est en bonne corrélation avec sa résistance au bris et sa cohésion; nous l'avons retenu pour caractériser le *degré de scorification* des matières minérales;
- la *température maximale* atteinte dans la couche;
- un indice dit « *indice de perméabilité* » représentant l'accroissement relatif de la perte de charge par kg de charbon brûlé et par point de teneur en cendres. Cet indice a pour expression:

$$I_p = 100 \cdot \frac{P_2 - P_1}{P_1} \cdot \frac{1}{10k}$$

formule dans laquelle:

P_2 désigne la pression sous grille après combustion de 5 kg de combustible,

P_1 désigne la pression sous grille après combustion de 15 kg de combustible,

k désigne la teneur en cendres.

Il est à noter que cet indice croît lorsque la perméabilité du mâchefer diminue.

1.4. Résultats

Un premier résultat de caractère général donné par la comparaison des différents charbons est qu'il n'existe pas de corrélation entre le degré de scorification défini par le volume apparent des mâchefers et la perméabilité à l'air de ces mâchefers. D'une façon générale, lorsque le débit d'air augmente, l'indice de perméabilité d'abord nul commence à croître pour une certaine valeur du débit d'air, passe par un maximum puis décroît selon une courbe en forme de cloche. D'un charbon à l'autre, on constate que non seulement les valeurs des maxima obtenus sont très différentes, mais aussi que le débit d'air à partir duquel l'indice de perméabilité décroche de la valeur nulle correspond à des degrés de scorification très variables d'un charbon à l'autre.

D'une façon générale, on observe que l'indice augmente d'autant plus fortement que la scorification a lieu pour des débits d'air plus faibles. On a également noté que le maximum de l'indice (point de perméabilité minimum), très variable d'un charbon à l'autre, se situe dans l'ensemble dans une gamme assez étroite de débits d'air, comprise entre 420 et 480 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$.

Il semble que la perméabilité du mâchefer résulte de la conjonction de deux phénomènes: scorification d'une part, poussée mécanique de l'air soufflé sous la couche d'autre part. Quand la scorification survient très tôt, c'est-à-dire pour de faibles débits d'air et de faibles pressions sous grille, la poussée de l'air n'est pas capable de s'opposer à l'obstruction partielle des interstices de la couche par les cendres en fusion; si au contraire la scorification se manifeste plus tard à un moment où les débits et pressions d'air sont élevés, la poussée dynamique du fluide est suffisante pour s'opposer à l'obstruction des interstices et maintenir des canaux libres pour le passage de l'air. Ce même effet de la poussée de l'air explique que dans tous les cas, à partir d'une certaine valeur du débit d'air, l'indice de perméabilité a tendance à décroître.

L'influence sur la scorification de la structure des matières minérales dispersées au sein des grains de charbon n'a pu être mise en évidence de façon précise; on a cependant observé que les combustibles dans lesquels les matières minérales sont dispersées de façon très homogène (cokes) ont tendance à donner une scorification plus franche et des mâchefers moins perméables que les combustibles dans lesquels les matières minérales sont présentes sous forme d'inclusions schisteuses hétérogènes.

Pour comparer les résultats des essais de scorification en pot-foyer aux essais de fusibilité en laboratoire, on a tracé une série de graphiques sur lesquels sont portées pour les différents charbons:

- les températures maximales en couche atteintes pour différents degrés de scorification (respectivement: 1,4; 2 et 2,6 dm^3/kg).
- les températures repères de 3 profils types de la montre servant à caractériser la fusibilité dans la méthode SNCF (respectivement: début de fusion, point de fusibilité, point d'étalement) (figure 2 correspondant à l'essai de fusibilité en atmosphère réductrice et figure 3 à l'essai de fusibilité en atmosphère oxydante).

On voit que les plages de scorification et les plages de « fusibilité » en atmosphère oxydante se superposent assez bien, tandis que la concordance est moins bonne entre plages de scorification et plages de « fusibilité » en atmosphère réductrice. Dans ce dernier cas, on observe un décalage croissant pour

les charbons à cendres fusibles. En d'autres termes, les différences entre charbons sont plus accusées par l'essai de fusibilité en atmosphère réductrice que par l'essai de scorification en pot-foyer. Ces observations conduisent à penser que l'atmosphère régnant dans la couche là où la scorification est la plus active a un caractère nettement oxydant.

En pratique, on peut en conclure que l'essai de fusibilité en laboratoire donne une première indication valable de l'aptitude à la scorification des matières minérales en fonction du niveau des températures atteintes au cours de la combustion.

Or, la comparaison des températures maximales en couche obtenues avec les différents combustibles montre que, pour un même débit d'air ou pour une même allure spécifique de combustion (même quantité de charbon brûlée par m² de surface de grille et par heure), ces températures varient de façon très sensibles d'un charbon à l'autre. Ces différences sont liées à la nature plus ou moins réductrice des réactions de gazéification ou encore à ce qu'on peut appeler « réactivité » du combustible.

Plus un combustible est réactif, c'est-à-dire plus sa combustion prend un caractère réducteur, plus basses sont les températures relevées au sein de la plus couche.

Pour caractériser la réactivité, on a retenu un critère dénommé « *pouvoir gazéificateur de l'air* » qui exprime la quantité de combustible gazéifiée dans les conditions des essais (granulométrie 6-10 mm, épaisseur de couche 10 cm par kg d'air).

La comparaison des pouvoirs gazéificateurs observés et des températures maximales en couche confirme que, par exemple à débit d'air égal, les combustibles donnent des températures maximales en couche d'autant plus basses que leur pouvoir gazéificateur est élevé.

L'influence de la granulométrie a été étudiée sur un même charbon sous 3 classements granulométriques: braisettes 10-20 mm, grains 6-10 mm, petits grains 3-6 mm.

A débit d'air égal les températures relevées dans les 3 cas présentaient des différences peu significatives; les mâchefers obtenus étaient d'autant moins denses et plus friables que la granulométrie était plus petite. On pense que la réduction de l'épaisseur de la zone à haute température qui, au sein de la couche, accompagne la réduction du calibre peut être la cause de cette évolution défavorable de la scorification lorsque le calibre diminue.

L'influence de la hauteur de couche a été étudiée sur le maigre M2 en grains 6-10 mm. On a constaté que la réduction de l'épaisseur de couche s'accompagne d'une diminution de la température

maximale d'abord modérée quand l'épaisseur est réduite de 10 à 6 cm, puis plus franche lorsqu'on opère une nouvelle réduction à 4 cm. On en conclut qu'une bonne scorification est d'autant plus difficile à obtenir que l'épaisseur de couche est faible.

Au cours d'essais complémentaires, on a étudié le comportement de mélanges préparés à partir de grains maigres de même calibre (6-10 mm), l'un à cendres fusibles (maigre M7), l'autre à cendres peu fusibles (maigre M6). Les résultats obtenus montrent qu'au point de vue scorification les mélanges obtenus avaient un comportement intermédiaire entre ceux des constituants avec toutefois une tendance à se rapprocher assez vite du constituant le plus fusible dès que la proportion de celui-ci augmente.

1.5. Résumé et conclusions

Les essais en pot-foyer ont montré que pour caractériser valablement les phénomènes de scorification intervenant au cours de la combustion d'une couche de charbon en grains, il faut au moins deux paramètres, l'un repérant le *degré de scorification*, l'autre traduisant l'influence du résidu scorifié sur la *perméabilité à l'air* de la couche en combustion.

En adoptant pour exprimer le degré de scorification le volume spécifique apparent des résidus (dm³/kg), on constate que les températures maximales en couche obtenues avec différents charbons pour un même degré de scorification évoluent dans l'ensemble dans le même sens que les températures de fusibilité déterminées en laboratoire. On peut donc considérer que l'essai de fusibilité en laboratoire caractérise assez correctement le paramètre « nature des matières minérales ».

Mais quand différents charbons sont brûlés dans les mêmes conditions de granulométrie, d'épaisseur de couche et d'allure, les températures maximales observées dans la couche peuvent présenter d'un charbon à l'autre des écarts importants; dans l'ensemble, ces températures sont d'autant plus élevées que le charbon est moins réactif. Aussi, entre des charbons dont les cendres présentent en laboratoire des caractéristiques de fusibilité comparables, la scorification des matières minérales au cours de la combustion sera d'autant plus aisée, toutes choses par ailleurs égales, que le combustible est moins réactif.

La perméabilité à l'air des mâchefers est une propriété que l'essai de fusibilité en laboratoire ne permet absolument pas de prévoir. Elle n'est pas directement liée au degré de scorification tel que nous l'avons caractérisé au moyen du volume spécifique apparent; pour une part très importante, elle dépend

de la poussée mécanique de l'air soufflé sous la masse de résidus en fusion. Plus cette poussée est forte, c'est-à-dire plus la scorification nécessite une température élevée, donc une allure de combustion vive, plus il y a de chances d'obtenir un mâchefer de bonne perméabilité. C'est pourquoi on observe que les charbons à cendres peu fusibles donnent toujours des mâchefers perméables quel que soit le degré de scorification obtenu. Au contraire, les charbons à cendres aisément fusibles ont tendance à donner des mâchefers peu perméables à l'air.

L'intérêt pratique de l'essai en pot-foyer sur le test de laboratoire apparaît finalement double:

- il respecte beaucoup mieux les conditions de scorification réelles et laisse jouer librement tous les facteurs qui influencent le phénomène (réactivité du charbon, mode de dispersion des matières minérales, granulométrie, etc.);
- il permet d'apprécier certaines propriétés des mâchefers très importantes en pratique, comme leur perméabilité à l'air.

2. Étude de l'inflammation et de la combustion des charbons calibrés sur grille

Dans la plupart des foyers mécaniques conçus pour brûler des charbons calibrés, le combustible frais est d'abord disposé en couche mince à l'une des extrémités d'une grille horizontale ou faiblement inclinée, puis soumis à un déplacement lent jusqu'à l'autre extrémité de cette grille; au cours de ce déplacement, il est enflammé, puis gazéifié par de l'air soufflé à travers la grille. Le résidu minéral laissé par cette gazéification se déverse directement dans un cendrier d'où il peut être évacué à intervalles de temps plus ou moins réguliers.

Le déplacement de la couche de charbon perpendiculairement au flux d'air soufflé est assuré, soit en rendant mobiles certains éléments de la grille support (grille à chaîne, grille à barreaux oscillants), soit en exerçant périodiquement, au pied du talus de chargement, une poussée parallèle au plan de grille, au moyen par exemple d'un poussoir.

2.1. Généralités

Il existe de nombreux types de foyers mécaniques à combustion en couche mince qu'on peut classer en deux grandes catégories:

- les petits foyers destinés principalement au chauffage, où la chambre de combustion ne comporte que des parois « froides » (généralement moins de 100 °C) et dans lesquels la vitesse de propagation du charbon est lente (quelques dm/h);

- les foyers industriels dans lesquels l'inflammation est facilitée par la présence de parois ou voûtes radiantes « chaudes », en matériaux réfractaires permettant une vitesse de progression transversale relativement élevée (plusieurs mètres à l'heure).

L'étude effectuée par le Cerchar a eu pour but de préciser les conditions d'inflammation et de combustion de différentes catégories de charbon dans les foyers appliquant la combustion sur grille sous ces deux variantes. L'intérêt pratique de cette étude était double:

- d'une part, fournir aux constructeurs des données techniques de base pour la conception et le réglage des grilles en fonction de la nature du charbon à brûler;
- d'autre part, aider l'exploitant d'une chaudière à grille et les services commerciaux des Houillères à choisir le combustible convenant le mieux aux caractéristiques d'une grille donnée.

2.2. Appareillage utilisé (3)

L'étude a été poursuivie dans un foyer expérimental à grille fixe dans lequel le mouvement relatif du charbon par rapport à l'air a été restitué en déplaçant à vitesse uniforme la chambre de combustion et la zone de soufflage d'air.

Ceci a été réalisé de la façon suivante (figure 6):

La grille, de 2,5 m de longueur et de 0,50 m de largeur, est constituée de barreaux en fonte supportés par un bâti métallique; les rives sont garnies d'éléments réfractaires de 10 cm de hauteur. Sous la grille est disposée une série de 4 caissons de distribution d'air; les deux premiers, à gauche de la figure, dits « caissons de préparation », servent à l'allumage de la couche de charbon disposée sur toute la longueur de la grille. Le caisson suivant, dit « caisson de mesure », de 1 m de longueur, présente la particularité d'être divisé en 14 compartiments identiques ayant chacun une alimentation en air indépendante. C'est dans la partie de la grille à l'aplomb de ce caisson que sont effectuées les mesures, analyses et observations.

En bout de grille, à gauche, on trouve le caisson finisseur, dont le rôle est de permettre à la combustion de se poursuivre très au-delà de la zone de mesures.

L'alimentation en air des différents caissons et en particulier du caisson de mesure est réalisée de façon à assurer la constance du flux gazeux ($m^3/m^2 \cdot h$) en tout point de la grille alimentée en air.

Pour l'étude de l'inflammation et de la combustion en « chambre chaude », l'installation a été complétée par une voûte mobile suspendue à un chariot porté par des roulettes reposant sur des rails. Le chariot, refroidi par circulation d'eau, est garni intérieurement d'éléments réfractaires présentant une inertie thermique importante. Le rebord inférieur de l'élément avant de la voûte (à gauche sur la figure 6) est constitué par une boîte métallique plate à circulation d'eau formant « arche froide ».

La progression de l'inflammation est suivie au moyen de 3 séries équidistantes de 3 thermo-couples disposés à différentes profondeurs dans la couche de charbon; pour suivre l'évolution de la pression sous grille, la pression d'air est enregistrée dans chacun des 14 compartiments du caisson de mesure. Des thermo-couples sont disposés sur la face interne des éléments réfractaires de la voûte afin de connaître les températures des parois radiantes.

Dans une des faces latérales de la voûte mobile est aménagé un orifice par lequel on peut effectuer des prélèvements de gaz pour analyse.

2.3. Essais en ambiance « froide » (3)

2.3.1. Conduite des essais

Pour les essais en ambiance « froide », correspondant au cas des petits foyers de chauffage à parois « froides » et à faible vitesse de progression du charbon, la grille expérimentale a été utilisée sans voûte d'allumage (figure 7). Le charbon est disposé uniformément sur toute la longueur de la grille expérimentale; dès le début de l'essai, l'ensemble des caissons de préparation, du caisson de mesure et du caisson finisseur est alimenté en air réparti uniformément sous la grille. La couche de charbon est enflammée au moyen de petit bois à l'aplomb des caissons de préparation et l'inflammation se propage ensuite de proche en proche vers l'autre extrémité, suivant un front continu mobile. C'est le mécanisme de « l'inflammation libre ». Les paramètres dont elle dépend sont:

- la nature du charbon, son humidité, sa granulométrie;
- l'épaisseur de la couche;
- le débit d'air soufflé (en kg/m^2 de surface de grille et par heure).

On a étudié 3 charbons considérés comme représentatifs des catégories commerciales généralement utilisées dans les petites chaudières mécaniques à grille.

Les caractéristiques de ces charbons sont données dans le tableau 2 (3 premières colonnes).

Pour chaque charbon, 3 granulométries ont été étudiées (3-6 mm; 6-10 mm; 10-20 mm), ainsi que 2 épaisseurs de couche (10 cm et 6 cm).

On a fait varier les débits d'air entre 500 et 2 000 $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$. Les charbons stockés à l'abri des intempéries n'avaient qu'une faible humidité superficielle. Pour définir le déroulement des phénomènes d'inflammation et de combustion, on a retenu les *éléments caractéristiques* suivants:

- vitesse de déplacement du front d'inflammation V_i (m/h);
- durée totale de la combustion T_c (h);
- longueur du lit en combustion L_c (m); liée par la relation simple $L_c = V_i T_c$;
- pertes par imbrûlés solides i , exprimées en % d'équivalent-charbon recueilli sous forme d'imbrûlés en fin de combustion;
- l'allure de combustion spécifique π_c en $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$;
- la courbe d'évolution de la pression sous grille;
- la courbe d'évolution de la composition des gaz de combustion.

A partir des éléments précédents, on peut calculer l'excès d'air moyen et le pouvoir gazéificateur moyen de l'air exprimé en quantité de charbon sec gazéifié par kg d'air.

2.3.2. Résultats

La figure 8 représente quelques profils de la couche en combustion et du front d'inflammation observés avec les différents charbons. Dans le cas du maigre, la couche présente un talus de pente faible, inférieure au talus d'éboulement. Dans le cas du flambant non agglutinant au contraire, et surtout aux fortes allures, la combustion provoque une réduction d'épaisseur si rapide qu'une partie du charbon non encore enflammée s'écoule par gravité dans la zone de feu.

La vitesse de propagation horizontale du front d'inflammation augmente avec le débit d'air en tendant vers une valeur limite aux débits d'air élevés; cette vitesse est peu influencée par l'épaisseur de couche (figure 9). Elle croît légèrement quand on passe des 10-20 aux 6-10 et aux 3-6 mm. L'influence de la nature du charbon est par contre beaucoup plus nette (tableau 3); c'est le charbon maigre, c'est-à-dire le moins réactif, qui donne les vitesses de propagation les plus élevées, et le flambant non agglutinant, très réactif, avec lequel on observe les vitesses de propagation les plus faibles.

La durée de la combustion et la longueur de la zone en combustion décroissent quand le débit

d'air augmente en tendant vers une limite. Ces grandeurs augmentent avec l'épaisseur de couche, mais moins vite que proportionnellement, et varient peu avec le calibre. Avec les petits grains 3-6 mm, un début de fluidisation apparaît dès que le débit d'air dépasse $1\ 000\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$.

Les pertes par imbrûlés solides sont négligeables avec le charbon flambant non agglutinant, mais sensibles avec le charbon maigre. Dans ce dernier cas, on observe qu'elles varient assez peu avec le débit d'air mais qu'elles croissent avec le calibre et avec la réduction de l'épaisseur de couche (tableau 4).

L'allure de combustion spécifique croît avec les débits d'air, mais tend à plafonner autour des valeurs suivantes:

- pour les maigres 6-10 mm en couche de 10 cm: $140\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ pour un débit d'air de $1\ 800\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$;
- pour le flambant non agglutinant en calibre 6-10 mm, l'allure maximale n'est pas encore atteinte pour un débit de $2\ 000\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ et sa valeur est alors de l'ordre de $180\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$.

L'analyse des gaz prélevés au ras de la surface supérieure de la couche montre que sur la plus grande partie de la zone enflammée la combustion a un caractère plus ou moins réducteur (figure 10 a); on ne trouve d'oxygène libre qu'au voisinage du front d'inflammation et, à l'autre extrémité, en fin de combustion. Globalement la combustion est plus réductrice avec le flambant qu'avec le maigre, et plus réductrice pour les couches de 10 cm que pour les couches de 6 cm.

L'évolution de la *pression sous grille* est très caractéristique de la nature du charbon; avec le maigre qui donne un talus de combustion 3 à 4 fois plus long que l'épaisseur de couche, on observe que la pression sous grille augmente fortement une fois obtenue l'inflammation complète et peut atteindre dans la région médiane où la combustion est réductrice 3 à 4 fois la valeur initiale (sous-couche non encore enflammée). Par contre, dans le cas du flambant non agglutinant, la faible longueur de la zone en combustion et la forte pente du talus qui en résulte provoquent une réduction progressive de la pression quand on s'éloigne de la zone d'inflammation.

Les essais en inflammation libre représentent un cas idéal où rien ne vient entraver la propagation transversale de l'inflammation. Ils correspondent au cas limite pour lequel l'allure de combustion maximale est réalisée avec un débit d'air et une épaisseur de couche donnés. Dans la pratique, la vitesse transversale de progression du charbon est prédéterminée à une valeur inférieure à la vitesse de propagation de l'inflammation libre, afin d'éviter que le feu « décroche ».

Au cours d'essais complémentaires, on a examiné l'influence sur la combustion d'une limitation volontaire de la vitesse d'inflammation. A cet effet, l'air a été admis successivement dans les différents compartiments du caisson de mesure à une cadence telle que la progression du « front de soufflage » gardait une vitesse moyenne inférieure à la vitesse limite correspondant à l'inflammation libre.

Les essais effectués sur du charbon maigre en grains 6-10 mm avec épaisseur de couche de 10 cm à différents débits d'air ont montré que l'inflammation ainsi « retardée » modifie peu les caractéristiques de la combustion ultérieure: durée de combustion, allure spécifique, perte par imbrûlés solides.

Il en résulte que la longueur de la zone en combustion peut se déduire de celle observée en inflammation libre (relation générale $L = VT$).

2.3.3. Résumé et conclusions

Les résultats des essais en ambiance froide ont conduit aux conclusions pratiques suivantes:

Dans l'ensemble, l'influence du calibre sur la propagation de l'inflammation et de la combustion du charbon en couche apparaît relativement secondaire; il est toutefois déconseillé d'utiliser un calibre trop petit à cause des risques de fluidisation qui limitent l'allure de combustion. Dans les foyers à chambre froide où on utilise principalement des combustibles non agglutinants, il faudrait s'en tenir aux grains 6-10 mm et aux braisettes 10-20 mm.

Les deux paramètres qui jouent les rôles les plus importants sur l'inflammation et la combustion sont la nature du combustible et l'épaisseur de couche.

Les charbons maigres donnent lieu à des vitesses de propagation de l'inflammation relativement élevées ($0,6\text{ m/h}$ entre $1\ 500$ et $2\ 000\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ d'air soufflé) et des durées de combustion relativement longues; la zone de combustion prend le profil d'un talus à faible pente dont la longueur dépend de l'épaisseur de couche. Dans la partie moyenne de la zone en combustion, la pression sous grille atteint des valeurs élevées, triples ou quadruples de la pression initiale, en raison de l'expansion thermique des gaz dont l'effet n'est que partiellement compensé par la réduction de l'épaisseur de couche. Ce phénomène a une grande importance pratique en raison des déséquilibres qu'il provoque dans la répartition de l'air lorsque — et c'est généralement le cas en pratique — celui-ci est distribué par un caisson unique; l'air soufflé a tendance à passer de préférence dans les zones extrêmes de faible résistance où les conditions de gazéification sont médiocres et il tend à

manquer dans la partie centrale la plus active là où il serait le mieux utilisé. Cette répartition défectueuse conduit non seulement à un gaspillage d'air, mais également à un surdimensionnement des grilles. Pour éviter cet inconvénient une solution consiste à prévoir pour les foyers à grains maigres des grilles opposant au passage de l'air une résistance très supérieure à celle de la couche de charbon, de façon à atténuer les fluctuations locales de la résistance totale de la grille et de la couche en combustion.

Dans le cas des *charbons flambants non agglutinants*, les vitesses de propagation de l'inflammation sont nettement plus faibles qu'avec les maigres (de l'ordre de 0,30-0,35 m/h) et les durées de combustion beaucoup plus courtes; la zone de combustion prend l'aspect d'un talus à forte pente dont la longueur reste comprise entre 10 et 20 cm. Dans ce cas, l'effet sur la pression sous grille de la diminution de l'épaisseur de couche l'emporte sur celui de l'expansion thermique; la pression sous grille diminue au fur et à mesure de l'avancement de la combustion. En pratique, pour brûler correctement ce type de charbon, il convient d'éviter le passage préférentiel de l'air en fin de combustion; ceci peut être réalisé soit par un caissonnage permettant un meilleur réglage de la répartition de l'air, soit par l'utilisation d'une grille dont la résistance au passage de l'air irait en croissant dans le sens longitudinal.

2.4. Essais avec parois chaudes radiantés (3)

2.4.1. Conduite des essais

Pour l'étude de l'inflammation et de la combustion en « chambre chaude », on a utilisé la voûte montée sur chariot précédemment décrite (figure 6).

Cette voûte est d'abord mise en température au-dessus du foyer auxiliaire représenté à droite de la grille, puis déplacée à l'aplomb des caissons de préparation alimentés en air. Une fois réalisée l'inflammation de la couche disposée sur ces caissons, la voûte est déplacée lentement en direction du caisson de mesure; au fur et à mesure de la progression de la voûte, l'air est admis successivement dans les différents compartiments du caisson de mesure de façon telle que le « front de soufflage de l'air » suive le rebord intérieur de l'élément formant « arche froide ». En agissant sur la commande automatique de l'alimentation en air des compartiments, il est possible de décaler plus ou moins la position moyenne du front de soufflage d'air par rapport à ce rebord inférieur; on peut de cette façon faire varier le délai d'inflammation, temps pendant lequel la surface supérieure de la couche de charbon est soumise au rayonnement des parois chaudes sans être refroidie par l'air soufflé.

La voûte progressant au-dessus de la couche de charbon, les grains disposés à la surface sont soumis au rayonnement des parois qui les échauffent et s'enflamment au contact de l'air traversant la couche; une fois réalisée en surface, l'inflammation se propage en profondeur avec une vitesse sensiblement constante, à contre-courant de l'air soufflé, jusqu'à atteindre le plan de grille. La combustion se poursuit ensuite dans toute l'épaisseur de la couche en provoquant la réduction progressive de son épaisseur. Suivant la nature du charbon et les conditions de l'essai, le phénomène présente différents aspects dont les plus caractéristiques sont illustrés par la figure 11.

On désigne par *zone d'inflammation* la région de la couche dans laquelle l'inflammation n'a pas encore atteint le plan de grille; elle est suivie par la *zone de post-combustion* correspondant à la région où, l'inflammation complète étant réalisée, la gazéification s'achève en intéressant toute l'épaisseur du combustible.

Sur la figure, les abscisses sont portées en temps, le temps origine correspondant à l'abscisse où le soufflage d'air est déclenché. Pour avoir les abscisses en longueur, il suffit de multiplier les temps par la vitesse de déplacement de la voûte.

Une première série d'essais dits *essais principaux* fut effectuée avec des combustibles types dont on trouvera les caractéristiques dans le tableau 2.

Deux granulométries (6-10 et 10-20) furent examinées sur une seule épaisseur de couche (10 cm). Au cours de ces essais, les débits d'air maxima furent limités à 1 500 kg/m².h. Les charbons stockés à l'abri des intempéries n'avaient qu'une faible humidité superficielle.

Une seconde campagne dite *essais complémentaires* fut ensuite effectuée avec des charbons gras et demi-gras de qualité commerciale utilisés avec leur granulométrie d'origine. Au cours de ces essais, l'influence de l'humidité fut examinée sur des fines demi-grasses. Avec ces charbons gras et flambants gras commerciaux, les débits d'air furent poussés jusqu'à une valeur de 2 500 kg/m².h.

Les éléments retenus pour caractériser les phénomènes d'inflammation et de combustion étaient pour une part les mêmes qu'au cours des essais sans voûte, mais ici la vitesse horizontale de propagation de l'inflammation n'est pas autre chose que la vitesse de déplacement de la voûte.

L'inflammation est alors caractérisée par deux paramètres:

- *le délai d'inflammation*, temps qui sépare le passage à une abscisse donnée du rebord intérieur de l'arche froide, du déclenchement du soufflage à cette abscisse, et qui correspond à la durée d'échauffement superficiel;

- la *vitesse verticale de propagation de l'inflammation*, ou, pour une couche d'épaisseur donnée, la *durée de l'inflammation* T_1 , temps nécessaire pour que l'inflammation se propage jusqu'au plan de grille.

2.4.2. Résultats des essais principaux

Sauf avec les charbons maigres, l'inflammation *superficielle* se produit quel que soit le retard de soufflage. Dans le cas des maigres, un retard de l'ordre de 5 cm (soit de 1 à 2 mm) était nécessaire pour obtenir une bonne stabilité de l'inflammation superficielle.

La propagation vers le bas de l'inflammation se poursuit à une vitesse relativement constante qui varie avec la nature du charbon mais dans une mesure assez limitée; pour les combustibles non agglutinants, elle apparaît d'autant plus faible que le combustible est plus « réactif », et ce résultat est conforme aux observations effectuées précédemment au cours des essais sans voûte. La granulométrie du combustible n'a qu'une faible influence sur la vitesse de propagation verticale de l'inflammation, tandis que l'accroissement du débit d'air provoque une augmentation sensible de cette vitesse (de même qu'en ambiance froide, il augmente la vitesse du front d'inflammation).

Avec les charbons gras et flambants gras, on constate que l'inflammation s'accompagne de phénomènes de cokéfaction qui provoquent le gonflement de la couche. Aux faibles débits d'air, le charbon a tendance à s'agglutiner en plaques peu perméables à l'air qui perturbent considérablement la combustion ultérieure, laissant un résidu de coke non brûlé, mélangé aux cendres. Au contraire, avec des débits d'air élevés, le charbon s'agglutine en mottes de dimensions beaucoup plus réduites qui se fragmentent aisément au cours de la combustion et brûlent de façon beaucoup plus complète.

Dans la zone d'inflammation, une fraction toujours importante du combustible est gazéifiée et cette fraction est d'autant plus élevée que le débit d'air est plus grand. C'est avec les charbons flambants caractérisés par les vitesses d'inflammation verticales les plus lentes que la proportion de charbon gazéifié dans la zone d'inflammation est la plus importante (50 à 90% selon le débit d'air). Avec le charbon gras de Carmaux dont l'inflammation laisse des cokes difficiles à brûler, la fraction du combustible gazéifiée au cours de l'inflammation est la plus faible.

La gazéification complète du combustible dans l'ensemble des deux zones (inflammation et post-combustion) demande un temps (durée de combustion totale t_c) qui décroît lorsque le débit d'air croît,

d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement; la longueur du feu diminue tandis que la masse de combustible brûlé par m^2 de surface de grille augmente quand on augmente le débit d'air. Le tableau 5 donne les valeurs moyennes des durées d'inflammation T_1 , des durées de combustion totale t_c , du pouvoir gazéificateur moyen g_c et de l'allure spécifique moyenne de la combustion π_c .

A l'exception des charbons gras, la combustion est dans l'ensemble réductrice, faiblement avec les maigres, fortement avec les flambants secs. La figure 10b donne un exemple de l'évolution de la composition des gaz qui montre le caractère fortement réducteur de la combustion dans une très longue fraction de la longueur de grille. Le caractère réducteur de la combustion est plus marqué avec les grains 6-10 qu'avec les braisettes 10-20.

A l'exception du charbon gras, les résidus contiennent très peu d'imbrûlés; avec le gras, la perte est de l'ordre de 5% aux faibles débits d'air, et tombe à 1% aux débits d'air élevés. On peut attribuer cette amélioration de la combustion des gras sous l'effet d'un accroissement du débit d'air à la meilleure structure prise par la couche cokéfiée aux fortes allures.

Avec le charbon maigre et le flambant non agglutinant, on observe un net accroissement de la pression sous grille à l'aplomb de la zone centrale où la gazéification est la plus active et où l'épaisseur de couche n'est pas encore fortement réduite. Avec le maigre, les pressions maximales observées atteignent 3 à 4 fois la pression correspondant à une couche non enflammée pour des allures faibles (500-750 $kg/m^2 \cdot h$ d'air); ces maxima sont moins accusés quand on augmente l'allure.

Dans le cas des charbons agglutinants (flambant gras et gras), les fluctuations de pression sont beaucoup moins accusées que précédemment; on constate à faible allure un léger maximum en fin d'inflammation.

Des thermo-couples soudés sur un barreau de grille ont permis d'enregistrer l'évolution de la température des barreaux au cours de la combustion. Cette température présente un maximum à l'aplomb de la zone où la gazéification est la plus active, qui suit immédiatement l'inflammation complète de la couche.

Cette température maximale tend à décroître quand le débit d'air croît. L'effet de refroidissement par l'air semble l'emporter sur l'effet de l'accroissement des niveaux de température dans la couche.

Les températures maximales observées varient avec la nature du charbon: elles sont dans l'ensemble d'autant plus élevées que le charbon est moins « réactif ».

2.4.3. Résultats des essais complémentaires (4)

Ces essais entrepris pour étudier le comportement de différents charbons gras et demi-gras de qualité commerciale furent l'occasion d'examiner plus complètement l'influence des paramètres suivants:

- débit d'air (poussé jusqu'à $2\,500\text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$);
- épaisseur de couche (portée jusqu'à 15 cm avec des calibrés gras et flambant gras);
- granulométrie (depuis des fines commerciales 0-20 mm jusqu'à des calibrés 13-35 mm).

On a également profité de ces essais pour étudier l'influence sur la qualité de la combustion de la vitesse de déplacement de la voûte.

Les essais ont confirmé que lorsque pour un même charbon *le calibre* augmente, le pouvoir gazéificateur tend à diminuer; cet effet est d'autant plus marqué que le charbon est moins agglutinant. Il est très atténué avec les véritables charbons gras.

L'accroissement de la hauteur de couche augmente souvent le pouvoir gazéificateur de façon nette quand on passe de 10 à 15 cm. L'effet est surtout marqué avec les gros calibrés et les charbons fortement agglutinants.

Les débits d'air élevés améliorent dans l'ensemble la qualité de la combustion en élevant le niveau du pouvoir gazéificateur. Avec les flambants gras, on observe un maximum très net du pouvoir gazéificateur aux environs de $2\,000\text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ d'air soufflé et cela correspond à une combustion nettement réductrice. Avec les gras, le maximum est moins marqué et même parfois inexistant au moins dans les limites de débit d'air explorées. Dans ce dernier cas, on observe une augmentation continue du pouvoir gazéificateur avec le débit d'air.

Pour ces charbons fortement agglutinants, l'amélioration de la qualité de la combustion observée aux débits d'air élevés s'explique quand on considère l'importance relative des phases d'inflammation et de post-combustion. Quand le débit d'air augmente, la durée d'inflammation décroît moins vite que la durée totale de la combustion et une part de plus en plus importante du charbon est gazéifiée dans la zone d'inflammation, où il reste en couche relativement mince, favorable à une bonne fragmentation des cokes.

Dans le cas de fines demi-grasses pour lesquelles la formation d'envols limite les débits d'air, *l'humidité de ces fines* joue un rôle capital. Si les fines sont superficiellement sèches, la résistance au passage de l'air de la couche non enflammée est élevée; l'air tend à cheminer de façon préférentielle en des points de moindre résistance où se forment des « renards ».

L'inflammation s'effectue alors de façon irrégulière et s'accompagne de la formation de cokes de grande dimension difficiles à brûler. Par contre, lorsque les fines chargées sur la grille ont une humidité superficielle de l'ordre de 5 à 6%, elles présentent une bonne perméabilité; l'air se répartit sous toute la surface de la grille de façon homogène, permettant une inflammation et une combustion correctes.

L'accroissement de la *vitesse de la voûte* a une influence nette sur la qualité de la combustion dans le cas des charbons gras et particulièrement aux faibles allures; elle réduit la formation de cokes volumineux, assure à la couche enflammée une structure plus homogène favorable à une meilleure utilisation de l'air soufflé. L'influence de la vitesse de voûte est encore sensible pour les fines demi-grasses et les flambants gras.

Les pertes par imbrûlés solides sont dans l'ensemble plus importantes pour les charbons gras que pour les flambants gras; dans le cas des fines demi-grasses, elles dépendent beaucoup de l'humidité. D'une façon générale, ces pertes diminuent quand le débit d'air croît, confirmant l'influence favorable du débit d'air sur la qualité de la combustion.

2.4.4. Résumé et conclusions

De l'ensemble des essais effectués avec parois chaudes radiantes, on peut dégager un ensemble de conclusions d'un grand intérêt pratique pour la conception et la conduite des grilles à chaîne. Celles-ci, selon la nature du charbon auquel elles sont destinées, doivent par leur conception se rattacher à l'un ou l'autre des deux grands types suivants:

Un premier type adapté aux charbons non agglutinants ou faiblement agglutinants devrait comporter un compartimentage soigné et assez serré des caissons de soufflage d'air avec alimentation directe et préférentielle des compartiments médians situés sous la région du lit en combustion la moins perméable à l'air. Les compartiments latéraux devraient être alimentés par prélèvement sur les compartiments médians avec lesquels ils seraient en communication par des ouvertures réglables.

Cette disposition conduit à réaliser les variations d'allures en maintenant constante la longueur du lit en combustion et en réduisant le débit d'air à peu près proportionnellement au débit de charbon, mais de façon uniforme sous toute la partie active de la grille.

Selon la nature du charbon à utiliser, ce type de grille et son foyer devront comporter deux séries d'aménagements différents:

pour les charbons maigres:

- une voûte arrière très développée soumise aux rayonnements de la couche enflammée et renvoyant une partie de la chaleur reçue à l'avant de la grille;
- un retard de soufflage de l'ordre de 1 à 2 mm;
- un débit d'air secondaire modéré;

pour les flambants secs:

- une courte voûte avant;
- un fort débit d'air secondaire.

Le deuxième type de grille adapté aux charbons fortement agglutinants (demi-gras, flambants gras, gras) devrait être conçu avec une alimentation directe et préférentielle en air des compartiments situés en tête du caisson de soufflage de façon à assurer une décroissance régulière de la pression sous grille d'avant en arrière.

En outre, pour empêcher un développement exagéré des phénomènes de cokéfaction, le charbon sera chauffé et enflammé le plus rapidement possible en tête de grille et on maintiendra toujours une combustion vive.

Cela conduit à réduire au minimum le retard de soufflage et peut rendre nécessaire le refroidissement par circulation d'eau du seuil ou registre limitant l'épaisseur de la couche afin d'empêcher les remontées de feu dans la trémie de chargement.

La nécessité de maintenir toujours une allure de combustion élevée en tête de grille conduit à effectuer les variations d'allure par variations de la longueur du lit; le raccourcissement de feu sera obtenu par réduction de la vitesse de grille conjuguée avec la quasi-fermeture des orifices d'alimentation des caissons arrière.

Avec les charbons gras fortement cokéfiant, il y a intérêt à utiliser de fortes épaisseurs de couche et à éviter le refroidissement des cokes dans la zone de post-combustion au moyen d'une voûte arrière assez longue. L'ensemble de ces résultats pratiques est résumé dans le tableau VI.

III—Recherches sur la combustion du charbon pulvérisé

1. Études de laboratoire

1.1. Généralités

L'aptitude d'un charbon à s'enflammer en pénétrant dans un foyer est sans doute l'une des propriétés les plus importantes pour le déroulement correct de la combustion.

Il importe que, dans les conditions d'échauffement et de mélange avec les gaz chauds de recirculation et l'air d'appoint que le charbon rencontre à la sortie du brûleur, son inflammation soit suffisamment rapide pour que puisse se constituer une flamme stable assurant une combustion régulière et complète.

Bien que l'aptitude à l'inflammation soit difficile à caractériser de façon précise, on sait par l'expérience que les charbons présentent sur ce point de très grandes différences de comportement, ce qui explique que les constructeurs aient dû concevoir différents types de brûleurs et de foyers dont chacun est plus particulièrement adapté à une catégorie plus ou moins étroitement délimitée de charbons.

En entreprenant une série d'études de laboratoire sur l'inflammation des charbons, le Cerchar visait deux objectifs pratiques:

- d'une part, parvenir à caractériser correctement l'aptitude à l'inflammation des charbons, de façon à aider les exploitants dans le choix des charbons ou des mélanges de charbons utilisables dans tel ou tel type de chaudière;
- d'autre part, parvenir à mieux comprendre les mécanismes physico-chimiques qui provoquent l'inflammation des particules et le rôle des différents facteurs dont ils dépendent; une connaissance plus scientifique des phénomènes d'inflammation ne peut que faciliter les progrès souhaitables vers une meilleure conception technique et une meilleure utilisation des foyers à charbon pulvérisé.

1.2. Comparaison de l'aptitude à l'inflammation de différents charbons (5) (6) (8)

1.2.1. Appareillage et mode opératoire

Pour caractériser l'aptitude à l'inflammation des différents charbons, nous avons eu recours à une méthode directe qui consiste à réaliser une flamme stable de charbon pulvérisé dans un petit four expérimental dont les conditions de réglage sont rigoureusement définies, puis à réduire progressivement la température de paroi du four jusqu'à provoquer l'extinction. La température de paroi correspondant à l'extinction de la flamme est retenue comme repère de l'aptitude à l'inflammation du charbon.

Le four utilisé est représenté sur la figure 12; il est constitué essentiellement d'un corps cylindrique en matériau réfractaire chauffé électriquement, dont les dimensions intérieures (chambres de combustion) sont: diamètre 175 mm; hauteur: 460 mm.

La partie supérieure formant couvercle porte le brûleur constitué par un bloc en matériau réfractaire

dans l'axe duquel est aménagé un orifice vertical pour le passage d'une gaine métallique refroidie par circulation d'eau et servant à l'injection du charbon pulvérisé en suspension dans l'air primaire. Dans ce bloc-brûleur sont également aménagés 4 orifices symétriques pour l'introduction de l'air secondaire. Le corps du four comporte une fenêtre disposée le long d'une génératrice et qui permet d'observer la flamme sur toute sa longueur. Dans l'épaisseur des parois sont aménagés 4 trous pour le passage de gaines de thermo-couples servant à mesurer la température du four.

Les gaz de combustion et le résidu de charbon non brûlé sont évacués à la partie inférieure du four par un diaphragme en matériau réfractaire qui communique avec une enceinte refroidie où la flamme est éteinte avant l'évacuation à l'atmosphère des produits de la combustion.

Le charbon est prélevé dans une trémie disposée sur bascule au moyen d'un dispositif pneumatique à éjecteur; avant de parvenir au brûleur, il traverse un mélangeur où la proportion d'air primaire est ajustée à la valeur désirée. La figure 13 donne une vue d'ensemble de l'installation.

Après une série de mises au point, on adopte les conditions de marche suivantes pour tous les combustibles examinés:

- charge calorifique évaluée en débit calorifique potentiel du charbon: 4 th/h;
- excès d'air global: nul;
- proportion d'air primaire: 15%;
- finesse du charbon: $80\% < 80 \mu$;
- humidité: 0%.

Avant chaque essai le four était porté à haute température (plus de $1\ 000^{\circ}\text{C}$), puis le charbon et l'air étaient introduits et leurs débits stabilisés. Une fois le four en équilibre thermique, le chauffage électrique était coupé, ce qui provoquait un lent refroidissement du four, la chaleur rayonnée par la flamme n'étant pas suffisante pour compenser les pertes thermiques. Au cours du refroidissement, on voyait le front d'inflammation s'éloigner progressivement du brûleur, puis la flamme devenait franchement instable et finissait par s'éteindre définitivement. Afin de conférer à la méthode une fidélité satisfaisante, on a procédé à une étude systématique de l'incidence des fluctuations des différents paramètres (débit de charbon, finesse, débits d'air primaire et secondaire, tirage) sur la température d'extinction; on a pu ainsi déterminer, compte tenu de la précision effective des différents réglages, qu'en doublant chaque essai, l'erreur sur la moyenne de deux mesures n'excédait pas $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

1.2.2. Résultats

L'influence du *rang du charbon* a été étudiée sur de nombreux échantillons à faible taux de cendres (5 à 7%); la figure 14 donne les points expérimentaux obtenus en portant la température d'extinction en fonction de l'indice de matières volatiles (M.V.) sur pur pris comme repère de rang. Les points se placent bien au voisinage d'une courbe moyenne régulièrement décroissante quand l'indice de M.V. croît. La pente de cette courbe est nettement plus forte dans la zone de faible indice de M.V. Autour de cette courbe, on observe des dispersions d'amplitude nettement significatives et pouvant dépasser 50° pour des charbons d'indices de M.V. voisins. On peut en conclure qu'en première approximation l'indice de M.V. donne une assez bonne indication sur l'aptitude à l'inflammation du charbon; mais l'essai en brûleur montre qu'à égalité d'indices de M.V. les charbons peuvent néanmoins présenter des différences très significatives justifiant ainsi l'intérêt de la méthode.

L'influence du *taux de cendres* a été étudiée sur différents lots de charbons très différents, chaque lot ayant fait l'objet d'une séparation par liqueur dense pour obtenir des échantillons à différentes teneurs en cendres. Les résultats sont représentés sur la figure 15.

Sur les charbons maigres, la séparation par liqueur dense s'est accompagnée d'une légère variation de l'indice de M.V. sur pur, aussi a-t-il fallu corriger les résultats pour ramener tous les échantillons à des taux de M.V. identiques; cette correction est représentée par les courbes en pointillés. On voit que dans tous les cas l'influence du taux de cendres sur la température d'extinction est faible; elle est plus marquée pour les maigres que pour le gras et le flénu, surtout au-delà de 30% de cendres.

Les essais précédents ont été effectués sur des charbons d'origine bien définie; en pratique, on doit souvent brûler dans les centrales des mélanges de charbons, et il a paru intéressant de comparer le comportement à l'inflammation de ces mélanges à celui de charbons purs présentant le même indice de matières volatiles.

Deux mélanges ont été étudiés; un mélange de charbons maigres et de charbons gras, et un mélange de charbons maigres et de charbons flénus. Les résultats sont représentés sur la figure 16; on voit qu'à indices de M.V. égaux, les mélanges sont dans l'ensemble nettement moins inflammables que les charbons purs d'origine définie.

1.3. Étude de l'inflammation en chauffe rapide

1.3.1. Généralités

En pénétrant dans le foyer, les particules de charbon sont soumises à un échauffement très rapide (plu-

sieurs milliers de degrés par seconde) sous l'action conjuguée du rayonnement de la flamme et des parois, et du contact avec les gaz chauds aspirés par le jet primaire.

Au cours de cet échauffement, deux phénomènes apparaissent qui jouent un rôle fondamental dans le déclenchement de l'inflammation :

- l'oxydation;
- la pyrolyse ou dégagement des matières volatiles sous l'effet de la chaleur.

Pour comprendre le mécanisme de l'inflammation, il est essentiel de connaître l'ordre de déclenchement de ces deux phénomènes.

Si, avant d'atteindre le « seuil de pyrolyse » ou température à laquelle apparaissent les premiers produits de pyrolyse, l'oxydation directe des particules est suffisante pour accélérer leur échauffement, l'inflammation sera gouvernée principalement par la vitesse d'oxydation hétérogène du charbon; cette vitesse d'oxydation hétérogène et son évolution en fonction de la température peuvent être déterminées avec une assez bonne approximation par la *méthode du point de croisement* (11).

Si, au contraire, la pyrolyse se déclenche avant toute oxydation appréciable des particules, il y a tout lieu de penser que le phénomène initiateur de la combustion sera l'oxydation directe du nuage de produits volatiles entourant chaque particule. Dans ce cas, l'inflammation sera gouvernée par le phénomène de pyrolyse en chauffe rapide (position du « seuil de pyrolyse » dans l'échelle des températures, nature et quantité des matières volatiles).

Les études qui suivent ont été entreprises pour analyser ces phénomènes et préciser les rôles respectifs de l'oxydation directe et de la pyrolyse dans l'inflammation des différents types de charbons.

Pour étudier la pyrolyse de particules de charbon soumises à un échauffement très rapide, on s'est heurté à la difficulté de réaliser un appareil capable de reproduire des conditions d'échauffement semblables à celles rencontrées en pratique dans les brûleurs, tout en permettant le repérage précis et instantané des températures des particules. Aussi a-t-on préféré recourir pour cette étude à deux techniques distinctes mais complémentaires, dont chacune réalise l'une au moins de ces conditions.

1.3.2. Four à chauffage brusque par contact (7) (8) (9)

1.3.2.1. Description

Après divers tâtonnements, on a mis au point un petit four reposant sur le principe suivant (figure 17) :

une toile métallique en nickel à mailles de 40μ est chargée de particules de charbon; ces particules une fois introduites, la toile est légèrement secouée, de façon à éliminer l'excès de charbon. La toile ainsi chargée est disposée dans un tube en verre et insérée dans un circuit électrique dont la tension est réglable au moyen d'un alternostat. La durée de passage du courant peut être fixée à une valeur convenue à l'avance au moyen d'un dispositif de commande électronique très précis, sensible au 1/100 de seconde (une demi-alternance). Le passage du courant provoque un échauffement rapide de la toile et du charbon dans les mailles; cet échauffement est suivi au moyen d'un couple thermoélectrique en fil de 50μ de platine-platine-rhodié relié à un oscillographe cathodique à rémanence dont les indications sont photographiées.

L'appareil permet de porter les particules de charbon à des températures pouvant atteindre $1\ 000^\circ\text{C}$ et plus, en des temps de l'ordre de 1/5 de seconde.

Les quantités de charbons traitées à chaque essai étant très faibles (40 mg), les produits gazeux de pyrolyse sont très dilués et leur analyse doit être effectuée avec une grande précision (10 pp million).

L'appareil a été utilisé à la fois comme inflammateur (atmosphère d'air) et comme pyrolyseur à chauffage rapide (atmosphère d'azote).

1.3.2.2. Utilisation du four comme inflammateur

On a observé au moyen d'une caméra rapide la phase de déclenchement du phénomène d'inflammation.

Avec un charbon gras, il se forme d'abord autour du charbon un nuage abondant de matières volatiles dont les dimensions augmentent rapidement; l'inflammation s'amorce ensuite brusquement en un point de ce nuage, là où les conditions de concentration et de température favorisent le déclenchement du phénomène.

Pour les maigres, on observe également le dégagement de matières volatiles autour du ruban, mais le nuage est beaucoup moins dense que précédemment; l'inflammation ne se produit plus au sein du nuage beaucoup trop dilué, mais au contact même du charbon fixé sur la toile métallique. Dans ce cas, l'inflammation paraît bien résulter de l'accélération des réactions hétérogènes gaz-solides, et la méthode de la toile métallique permet alors de préciser à quelle température se déclenche le phénomène. En fait, les essais ne sont pas rigoureusement reproductibles et l'on s'attache plutôt à déterminer la température correspondant à une probabilité donnée d'inflammation.

On a vérifié notamment par cette méthode que deux charbons maigres, apparemment peu différents (in-

dices de matières volatiles voisins) peuvent s'enflammer, en chauffe rapide, à des températures très différentes.

On a également pu confirmer l'influence relativement secondaire du taux de cendres.

L'appareil a été également utilisé pour préciser l'influence de la loi de chauffe sur la température d'inflammation.

Trois charbons maigres du Nord-Pas-de-Calais ont été soumis aux essais d'inflammation selon deux vitesses de chauffe:

- entre 450 et 500 °C par seconde d'une part,
- entre 4 000 et 4 500 °C par seconde d'autre part.

Ces charbons présentaient les caractéristiques suivantes:

Charbons	Cendres %	Matières volatiles %	T _E (°) °C
Rousseau I	5,6	7,8	1 045
Rousseau II	4,3	6,1	1 002
Escarpelle	6,4	9,5	993

(¹) T_E est la température d'extinction de la flamme déterminée par la méthode du brûleur (voir paragraphe 12).

Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous (températures d'inflammation).

Charbons	Loi de chauffe	
	450-500 °C/s	4000-4500 °C/s
Rousseau I	775 °C	830 °C
Rousseau II	770 °C	825 °C
Escarpelle	750 °C	790 °C

On constate que l'accroissement de la vitesse de chauffe tend à élever la température d'inflammation mais de façon très modérée puisque pour des lois de chauffe dont le rapport est presque de 1 à 10, l'élévation observée n'est que de l'ordre de 40 à 60 °C. On peut en conclure que, tant que les lois de chauffe considérées restent de même ordre de grandeur, leur influence sur les températures d'inflammation reste modérée, et peut être négligée au moins en première approximation.

1.3.2.3. Utilisation comme pyrolyseur à chauffage rapide

Sept charbons ont été pyrolysés en atmosphère d'azote en les portant à 1 050 °C selon une loi de chauffe de 1 500 °C/s. Après un refroidissement, l'ampoule était vidée de ses gaz au moyen d'une trompe à mercure et les goudrons déposés sur la paroi interne de l'enceinte étaient recueillis par lavage à la pyridine.

Les résultats les plus intéressants de ce bilan massique de la pyrolyse rapide ont été les valeurs élevées des rendements en goudrons. Comparés à ceux obtenus par les techniques de pyrolyse conventionnelles, les poids de goudrons recueillis représentaient en % du charbon initial 15 à 17% avec les charbons gras à coke, plus de 25% avec le flénu de Bruay, et 20 à 23% avec les flambants de Lorraine.

Les goudrons paraissant jouer un rôle très important dans l'inflammation des charbons à haut indice de M.V., on a examiné s'il existe une corrélation entre la température à laquelle apparaissent ces goudrons en chauffe rapide (seuil de pyrolyse) et l'aptitude à l'inflammation définie par la méthode du brûleur (paragraphe 12).

Vingt-trois charbons ont été examinés en procédant avec chacun d'eux à une série d'essais visant à encadrer la température à partir de laquelle apparaissent les premiers goudrons. On a pu vérifier que pour les charbons à plus de 15% de M.V. sur pur, il y a une bonne corrélation entre les valeurs de T_E obtenues par la méthode du brûleur et le seuil de pyrolyse, ce qui permet d'expliquer les différences constatées dans l'aptitude à l'inflammation de charbons de même rang.

Par contre, avec les charbons maigres, il n'apparaît pas que le seuil de pyrolyse ait une influence notable sur l'inflammation.

Sur trois charbons peu cendreuse, un maigre à 9% de M.V., un gras à 24% de M.V. et un flambant à 37,5% de M.V., on a cherché à préciser la loi de dégagement de goudrons en chauffe rapide en fonction de la température. Pour cela, on a procédé sur chaque charbon à des séries d'essais par palier de température en déterminant chaque fois la quantité de goudrons dégagés. L'allure des courbes de dégagement des goudrons est donnée par les figures 18-19-20. A titre de comparaison, nous avons fait figurer également les courbes de dégagement correspondant à des vitesses de chauffe lentes de 5°/mn, à l'exception du charbon d'Oignies qui ne donne pas de goudrons par chauffe lente alors qu'il en produit 4 à 5% en pyrolyse rapide.

A partir de ces résultats expérimentaux, on a cherché à préciser la loi cinétique de dégagement des M.V.;

pour les trois charbons, on a trouvé une relation de la forme:

$$\text{Log } \frac{q}{q_0} = - \frac{k_0}{\alpha (n+1)} T^{n+1}$$

avec:

- q = quantité de matières volatiles non dégagées à l'instant t;
- q₀ = quantité de matières volatiles résultant de la pyrolyse complète;
- α = loi de chauffe (°C ou K par seconde);
- T = température à l'instant t (°K) (linéaire en fonction du temps).

Pour les 3 charbons étudiés, les valeurs de n et k₀ étaient les suivantes:

- charbon maigre (Orgnies)
n = 13,3 k₀ = 1,04.10⁻⁴⁰
- charbon gras (Lens)
n = 8,65 k₀ = 1,79.10⁻²⁵
- charbon flambant (Faulquemont)
n = 13,5 k₀ = 4,67.10⁻³⁹

1.3.3. Four à chauffage brusque par rayonnement (9) (10)

1.3.3.1. Description

Dans ce four, on réalise l'échauffement rapide des particules disposées dans un jet de gaz par l'action de parois radiant, cela dans des conditions voisines de celles existant dans les foyers réels à charbon pulvérisé. L'inconvénient du procédé est qu'on ne peut repérer la température exacte des particules, ni enregistrer leur loi d'échauffement; en contrepartie, le fonctionnement continu du four permet de traiter des quantités relativement importantes de charbon, et les bilans matières peuvent être établis avec une bonne précision.

Le schéma du four est représenté sur la figure 21.

Les particules de charbon, calibrées entre 50 et 100μ, sont extraites d'une trémie par un dispositif à vis en téflon, à vitesse de rotation réglable et contrôlée, et distribuées, à l'aide d'un couloir vibrant qui a pour rôle de régulariser l'alimentation en charbon, dans un courant d'azote — ou d'air — de débit connu. Le mélange est injecté dans l'axe du tube laboratoire du four à chauffage électrique, dans le sens descendant, au niveau du début de la zone chauffée. Celle-ci, longue de 250 mm, est précédée et suivie de deux zones refroidies énergiquement et de longueurs respectives 250 mm et 150 mm.

La géométrie de l'injecteur est telle qu'un courant annulaire d'azote — ou d'air — concentrique au jet primaire confine les particules de charbon sur l'axe du four, les deux écoulements ayant sensiblement le même nombre de Reynolds.

Pour éviter tout contact des particules ou des produits de pyrolyse, notamment du goudron, avec les parois internes du tube laboratoire, celui-ci est en céramique poreuse et est traversé par un courant centripète d'azote — ou d'air — de débit connu.

A la sortie du four, les produits de pyrolyse débouchent dans une chambre à poussières où la vitesse du courant gazeux est brusquement réduite, ce qui permet d'en séparer les particules cokéfiées; les produits gazeux sortent par une ouverture latérale de la chambre, traversant soit un précipitateur électrostatique dans le cas des essais dans l'azote, soit un filtre dans celui des essais dans l'air, et sont débarrassés des goudrons et des ultimes particules cokéfiées. Les gaz épurés passent dans un condenseur maintenu à -15 °C pour piéger la vapeur d'eau; une partie aliquote des gaz est ensuite envoyée dans un gazomètre, la fraction la plus importante étant rejetée à l'atmosphère après mesure de son volume.

Le four était utilisé avec les conditions de réglage suivantes:

- débit de charbon: 16 à 17 g/h
- débit de gaz primaire: 15 l/h
- débit de gaz secondaire: 60 l/h
- débit de gaz tertiaire (parois poreuses): 60 l/h.

Pour chaque essai, le four était mis en équilibre de température à ± 3 °C près; la gamme de températures explorée s'est étalée entre 500 et 1 000 °C.

1.3.3.2. Résultats

La pyrolyse de deux charbons très différents a été complètement étudiée, d'abord dans l'azote, puis dans l'air; il s'agissait d'un charbon maigre à 9% de M.V. et 6% de cendres et d'un charbon gras à 24% de M.V. et 5% de cendres.

Avec le *charbon maigre* pyrolysé dans l'azote, on observe l'apparition de goudrons aux environs de 750 °C; leur quantité va croissant jusque vers 850 °C puis se stabilise autour d'une valeur représentant environ 2% du poids de charbon sec. Un peu après les goudrons, apparaissent H₂ et CH₄ dont le volume croît très vite avec la température (figure 22).

Dans l'air, le charbon maigre ne donne plus de trace de goudrons ni de méthane, quelle que soit la température. On observe pourtant la formation d'un peu de CO et d'hydrogène qui disparaissent brus-

quement, le premier vers 810 °C, le second vers 825 °C. Au-delà il ne se forme plus que du CO₂; or c'est vers 820 °C qu'on observe les premières particules incandescentes et vers 830 °C que s'établit une flamme stable.

Avec le *charbon gras* pyrolysé dans l'azote, les goudrons apparaissent très tôt, dès 500 °C; leur quantité croît et passe par un maximum (17%) vers 825 °C, puis décroît ensuite lentement (craquage). Le CH₄ et l'hydrogène sont observés dès 700 °C (figure 23), et leur volume croît ensuite très rapidement avec la température.

Dans l'air, la pyrolyse du charbon gras s'accompagne de l'apparition de goudrons mais en quantité beaucoup plus faible que dans l'azote; leur production maximale se situe vers 700 °C et ne dépasse pas 3,5%. On note aussi la formation de CO et d'un peu d'hydrogène en proportion croissante jusqu'à 700 °C, température au-delà de laquelle leur concentration tombe brusquement (figure 24). C'est à cette température de 700 °C que s'établit une flamme stable.

La comparaison pour chaque charbon de la pyrolyse dans l'azote et dans l'air donne différentes indications sur le mécanisme de l'inflammation; il est particulièrement instructif de comparer l'évolution du carbone gazéifié dans les deux cas.

Avec le charbon maigre, on voit (figure 25) que dans l'air le carbone gazéifié est à toute température supérieur à ce qu'il est dans l'azote. Le rapport du carbone gazéifié dans l'air au carbone gazéifié dans l'azote passe par un minimum voisin de l'unité un peu avant la température d'inflammation, ce qui signifie qu'aux températures nettement pré-inflammatoires (600 — 700 °C), inférieures au seuil de dégagement des produits de pyrolyse du combustible, il y a déjà oxydation directe du charbon par l'air. A 800 °C la quantité de carbone gazéifié par réaction hétérogène est du même ordre que le carbone provenant de la combustion des goudrons et des gaz combustibles de pyrolyse; ces produits brûlent donc au fur et à mesure de leur dégagement, mais sans absorber la totalité de l'oxygène dont une partie continue à réagir directement avec le carbone solide.

Avec le charbon gras, le mécanisme apparaît très différent; jusqu'à 700 °C les proportions de carbone gazéifié sous azote et sous air sont sensiblement les mêmes, ce qui signifie que *les réactions d'oxydation qui se produisent avant l'inflammation ne portent que sur les produits de pyrolyse*. Ce n'est qu'au-delà de 700 °C, température correspondant dans l'air à l'apparition d'une flamme stable, que la proportion de carbone gazéifié sous air devient supérieure à celle du carbone gazéifié sous azote, par suite de la combustion des particules de coke dévolatilisé.

1.4. Résumé et conclusions

De l'ensemble des études de caractère global (aptitude à l'inflammation dans un brûleur) ou analytique (étude de l'oxydation et de la pyrolyse en chauffe rapide) sur l'inflammation du charbon pulvérisé se dégagent les conclusions pratiques suivantes:

Si dans l'ensemble, l'aptitude à l'inflammation est en assez bonne corrélation avec l'indice de matières volatiles, des charbons de même rang peuvent néanmoins présenter des différences qui suffisent à expliquer certaines difficultés rencontrées dans la pratique industrielle.

En particulier, les mélanges de charbons de rangs différents sont dans l'ensemble moins facilement inflammables que les charbons purs de même indice de matières volatiles.

En ce qui concerne les charbons purs, l'étude analytique des mécanismes montre que le phénomène initiateur de l'accélération de l'échauffement qui conduit à l'inflammation est différent suivant qu'on a affaire à un charbon pauvre ou riche en matières volatiles.

Pour les anthracites et les maigres, c'est l'oxydation directe des particules, phénomène hétérogène, qui amorce l'accélération de l'échauffement; l'aptitude à l'inflammation est alors directement liée à la « réactivité » du charbon, propriété en corrélation assez lâche avec l'indice de matières volatiles.

Dans le cas des charbons à fort indice de matières volatiles, la pyrolyse se déclenche avant l'oxydation et l'inflammation s'amorce dans le nuage de gaz et de goudrons qui se mélange à l'air. L'aptitude à l'inflammation n'est pas seulement déterminée par la quantité de matières volatiles dégagée mais par la cinétique du dégagement et en particulier par la température à laquelle le phénomène se déclenche (seuil de pyrolyse). Or, pour des charbons de même rang, ce seuil peut présenter des écarts assez importants.

Les études analytiques ont permis de préciser la cinétique du dégagement des matières volatiles en chauffe rapide et montré que la durée du dégagement n'est pas négligeable à l'échelle des durées d'échauffement des particules. Néanmoins, on a pu vérifier que la température à laquelle apparaît l'inflammation ne s'élève que très modérément quand on augmente la vitesse d'échauffement des particules.

Les expériences ont confirmé l'influence de la vitesse de chauffe sur la production de goudrons par pyrolyse en atmosphère neutre. Aux vitesses d'échauffement de l'ordre de celles auxquelles sont soumises les particules de charbon dans un foyer, on a obtenu des rendements en goudrons de l'ordre du triple de ceux obtenus en chauffe lente.

L'étude expérimentale de l'influence de la teneur en cendres sur l'aptitude à l'inflammation a montré qu'au moins dans la gamme des teneurs en cendres usuelles l'influence de ce facteur reste très secondaire.

2. Études sur modèles mathématiques (12)

2.1. Généralités

Au cours des processus d'inflammation et de combustion du charbon pulvérisé, l'intervention simultanée de phénomènes de natures très diverses (chimiques, thermiques, aérodynamiques) mais interdépendants, rend particulièrement complexe l'étude du rôle des différents paramètres susceptibles de modifier le déroulement des phénomènes globaux. Par exemple, l'accélération du mélange entre jet primaire riche en charbon et air secondaire augmente la pression partielle de l'oxygène autour des particules de charbon, ce qui tend à accélérer la combustion, mais simultanément cet apport d'air a pour effet de refroidir le mélange et de produire l'effet contraire.

Afin de préciser l'effet global de telles modifications des paramètres et de rechercher les valeurs optimales à leur donner, on a tenté de représenter l'ensemble des processus d'inflammation et de combustion au moyen de modèles mathématiques.

Cet essai de synthèse, basé sur des schémas d'écoulement et de mélange fortement stylisés et sur des lois de cinétique chimique et de transfert de chaleur très simplifiées, a davantage pour objet de mettre en évidence des tendances que de préciser quantitativement l'effet de telle ou telle variation d'un paramètre de réglage de la combustion.

2.2. Principe du calcul

Le schéma du modèle est représenté figure 26; c'est un modèle non dimensionné et l'évolution de la combustion est suivie en fonction du temps de séjour, l'origine des temps correspondant à l'introduction du mélange air primaire charbon dans la chambre de combustion.

Ce mélange traverse d'abord une zone à parois chaudes pendant un temps t_w , puis finit de brûler dans une zone à parois plus froides; au temps t_d commence l'apport d'air secondaire qui se poursuit linéairement jusqu'au temps t_1 .

Pour étudier l'influence de la recirculation de gaz chauds aspirés par le jet primaire, on a supposé que la fraction R des gaz de combustion est réintroduite dans le jet primaire avec lequel on admet qu'elle se mélange instantanément.

On a adopté les hypothèses générales suivantes:

- l'écoulement est du type unidirectionnel et sans turbulence (écoulement type « piston »);
- l'ensemble d'une tranche constituée par les éléments dont le temps de séjour est compris entre t et $t + \Delta t$ est homogène chimiquement et thermiquement;
- le combustible pur est un mélange de carbone fixe (proportion X_0) et de produits de pyrolyse ou matières volatiles (proportion G_0);

Les calculs sont effectués par tranche de temps Δt et rapportés à l'unité de masse de combustible initial; pour cela on suppose que:

- a) Les produits de pyrolyse sont brûlés de façon préférentielle au fur et à mesure de leur dégagement, la loi cinétique de dégagement étant celle fournie par les études de laboratoire sur la pyrolyse rapide (paragraphe 1323). En cas de défaut d'air, les produits de pyrolyse sont stockés en phase gazeuse pour être brûlés préférentiellement au fur et à mesure de l'apport ultérieur d'oxygène;
- b) La combustion des particules débute lorsque la totalité des produits de pyrolyse est brûlée; on suppose qu'elle est gouvernée par la loi cinétique de la réaction chimique hétérogène; on admet que cette réaction est d'ordre un par rapport à la pression d'oxygène et que la surface des particules varie comme la puissance $2/3$ de la masse de carbone fixe résiduel. Les constantes de la loi cinétique (énergie d'activation et facteur de fréquence) ont été empruntées à Beer (13);
- c) Les combustions sont complètes et ne donnent que CO_2 et H_2 ;
- d) Les particules sont constamment en équilibre de température avec la phase gazeuse;
- e) A chaque instant t le mélange en réaction n'échange de chaleur par rayonnement qu'avec la paroi se trouvant à son aplomb: paroi chaude si $t < t_w$, froide si $t > t_w$. L'échange obéit à la loi de Stefan, et le coefficient d'échange B exprimant la proportionnalité entre chaleur échangée et la différence des quatrièmes puissances de température est supposé constant dans le temps.

Le calcul exécuté sur ordinateur repose sur la résolution de trois équations traduisant:

- les lois de cinétique chimique (pyrolyse et combustion hétérogène des particules),

- le bilan thermique,
- le bilan massique.

Ce calcul donne, tranche par tranche, la température, la pression d'oxygène et le taux d'épuisement du combustible ou fraction du combustible brûlée à l'instant t .

2.3. Modèle de référence

Pour étudier l'influence des différents paramètres agissant sur la combustion, on est parti d'un modèle de référence répondant aux caractéristiques suivantes:

Le charbon est un maigre à 10% de M.V. sur pur ($G_O = 0,1$; $X_O = 0,9$), auquel sont associées 6 parties de stériles pour 100 de charbon pur.

Sa granulométrie, proche d'une répartition naturelle, a été obtenue en mélangeant 3 lots à répartitions granulométriques exponentielles:

- 1 lot de diamètre équivalent en surface $d_{e1} = 4,08 \mu$ en proportion 20%,
- 1 lot de diamètre équivalent en surface $d_{e1} = 19,11 \mu$ en proportion 40%,
- 1 lot de diamètre équivalent en surface $d_{e1} = 61,59 \mu$ en proportion 40%.

L'ensemble donne, en poids, 18% de refus à 80μ et le diamètre équivalent en surface de l'ensemble des particules est de $13,1 \mu$.

L'air primaire représente 25% de l'air neutre ($A_p = 0,25 A_n$); sa température est égale à $T_p = 400 \text{ }^\circ\text{K}$.

L'air secondaire commence à être introduit à l'instant t_d pour lequel la température atteint la valeur $T_d = 1\,650 \text{ }^\circ\text{K}$; l'apport est linéaire en fonction du temps jusqu'à l'instant t_1 pour lequel l'excès d'air atteint 30%. A ce moment, l'apport est interrompu et l'air total mis en jeu représente 1,3 fois l'air de combustion neutre ($A_1 = 1,3 A_n$).

La durée d'apport d'air secondaire ($t_1 - t_d$) est prise égale à 200 ms.

La température de l'air secondaire A_s est prise égale à $T_s = 600 \text{ }^\circ\text{K}$.

La température de la paroi chaude est égale à $T_{w1} = 1\,500 \text{ }^\circ\text{K}$; celle de la paroi froide qui suit est prise égale à $T_{w2} = 600 \text{ }^\circ\text{K}$.

La durée de séjour t_w dans la zone à paroi chaude est également déterminée par la durée d'échauffement à $1\,650 \text{ }^\circ\text{K}$, ce qui revient à faire coïncider le début de l'apport d'air secondaire avec la sortie de la zone chaude ($t_w = t_d$).

Le coefficient d'échange thermique entre flamme et paroi est pris égal à $B = 1,9 \cdot 10^{-10} \text{ mth/kg.s. }^\circ\text{K}$.

Dans cette flamme de référence on n'a pas fait intervenir la recirculation des gaz chauds.

Les résultats des calculs sont résumés sur les graphiques de la figure 27.

On note que l'inflammation a lieu un peu avant le déclenchement de l'apport d'air secondaire, après un délai de 750 ms, nettement supérieur à ce qu'on observe en pratique. On distingue ensuite 4 phases:

- une phase de combustion vive et d'échauffement très rapide avec achèvement de la pyrolyse et réduction de la pression d'oxygène. La température augmente rapidement et atteint à la fin de cette phase sa valeur maximale;
- la réduction de la pression d'oxygène entraîne ensuite un ralentissement des réactions; quand l'air secondaire est introduit, les réactions ne sont plus assez rapides pour consommer tout l'oxygène fourni et compenser le refroidissement dû à l'apport d'air froid. La température baisse tandis que la pression d'oxygène augmente;
- au moment où cesse l'apport d'air (t_1) la tendance s'inverse à nouveau; la suppression du refroidissement par apport d'air permet une remontée de la température qui se trouve à son tour freinée par la réduction progressive de la pression partielle d'oxygène. La température passe par un nouveau maximum de l'ordre de $1\,800 \text{ }^\circ\text{K}$ au temps 1,7 s;
- à partir de ce moment, la vitesse de combustion n'est plus suffisante pour compenser les pertes vers les parois et la température décroît lentement jusqu'à provoquer l'extinction. Au temps 5 s le taux d'épuisement plafonne à 94% et la température est tombée à $1\,310 \text{ }^\circ\text{K}$.

Ce schéma est assez conforme à ce qu'on observe en pratique, bien que les fluctuations de températures y soient plus marquées, à cause des hypothèses faites sur la loi d'échange de chaleur qui néglige les échanges mutuels entre tranches voisines.

2.4. Étude de l'influence des principaux paramètres

Partant de ce schéma, on a étudié l'influence des variations des principaux paramètres ayant une action directe sur le déroulement de la combustion; comme critères de comparaison, on a retenu 3 grandeurs qui ont paru particulièrement significatives pour traduire la qualité de la combustion:

- taux d'épuisement à 3 s et à 5 s,
- temps de retour à la température 1 500 °K,
- taux d'épuisement à cette température de 1500 °K.

Loi d'apport d'air secondaire: on a examiné successivement l'influence de la durée d'apport d'air $t_d - t_1$ et du retard à l'apport d'air t_d . Les résultats obtenus montrent:

- que la durée d'apport présente un maximum qui se situe autour de 220 ms quand le retard à l'apport d'air est celui du modèle de référence,
- que les meilleurs taux d'épuisement sont obtenus quand l'air secondaire commence à être introduit à une température T_d comprise dans une fourchette de 1 300 à 1 500 °C, soit avant la sortie de la zone chaude. Dans ces conditions, la meilleure durée d'apport d'air est d'environ 200 ms.

Échanges calorifiques: Quand le coefficient d'échange B augmente, la durée d'échauffement à 1 650 °K est raccourcie. Si l'air secondaire est introduit à cette température, les conditions de combustion optimales exigent qu'on réduise légèrement la durée d'apport d'air par rapport au modèle de référence.

Développement de la zone à parois chaudes: L'influence de ce paramètre est complexe; les taux

d'épuisement à 3 et 5 s s'élèvent quand la durée de séjour dans la zone chaude t_w augmente; mais en même temps, on augmente la durée du retour à 1 500 °K. Le meilleur compromis semble se situer autour de $t_w = 2$ s. Par rapport au modèle de référence, il permet de gagner 3 points sur le taux d'imbrûlés pour un accroissement relatif du temps de retour à 1 500 °K de l'ordre de 10%.

Température des parois « froides » de la zone aval: Les calculs montrent qu'il faut élever cette température de façon importante pour obtenir une amélioration sensible du taux d'épuisement; ce paramètre apparaît en fait nettement moins déterminant que le précédent.

Composition granulométrique du charbon: En partant des trois lots constitutifs de la granulométrie de référence (paragraphe 23), on a préparé:

- une granulométrie « tronquée » par l'élimination du lot le plus gros,
- une granulométrie « serrée » en ne conservant que le lot de granulométrie moyenne,
- un troisième lot a été préparé par réduction uniforme des dimensions des particules du lot de référence et a donné une granulométrie dite « réduite ».

Les principaux résultats sont résumés dans le tableau suivant:

	Granulométrie de référence	Granulométrie tronquée	Granulométrie serrée	Granulométrie réduite
Surface spécifique m^2/kg	392	598	227	576
Temps de retour à 1 500 °K — s	3,43	3,15	3,43	3,29
Taux d'épuisement au retour à 1 500 °K — %	92,3	99,5	98,7	96,3

Ces résultats montrent que ce n'est pas tant en jouant sur la finesse moyenne des particules qu'on peut accélérer la combustion et augmenter le taux d'épuisement final, mais plutôt en resserrant l'éventail granulométrique.

Ainsi, la granulométrie tronquée apparaît nettement supérieure à la granulométrie réduite, bien que présentant une surface spécifique du même ordre.

De même la granulométrie serrée bien que présentant la surface spécifique la plus faible se classe nettement avant la granulométrie de référence, et même avant la granulométrie réduite, pour ce qui concerne le taux d'épuisement.

Proportion d'air primaire: Les calculs ont été repris avec des quantités d'air primaire représentant successivement 15% puis 10% de l'air de combus-

tion neutre. La réduction de l'air primaire provoque un échauffement plus rapide du jet (sensiblement inversement proportionnel à la capacité calorifique du jet) et pour réaliser les conditions optimales de combustion, il faut diminuer le retard à l'apport d'air secondaire tout en maintenant sensiblement aux mêmes valeurs que pour le modèle de référence la durée d'apport d'air. Par suite, la combustion est plus rapide mais le gain sur le taux d'épuisement au retour à 1 500 °K reste très modéré.

Recirculation: Partant du modèle de référence, on a admis qu'une fraction R des gaz de combustion à 1 500 °K était captée et mélangée instantanément au jet primaire dès l'introduction dans la chambre de combustion. On a donné à R trois valeurs s'étageant entre 0 et 25%. On constate que l'accroissement de R accélère très fortement l'échauffement et l'inflammation. Pour R = 25% l'inflammation se produit en 250 ms, valeur conforme à ce qu'on observe en pratique.

Pour réaliser les conditions optimales de combustion, il faut réduire le retard à l'apport d'air mais augmenter la durée d'apport quand R croît; les conditions optimales sont d'ailleurs beaucoup moins étroitement délimitées que sur le modèle de référence, la recirculation ayant pour effet d'accroître la tolérance de la flamme aux écarts de réglage de la durée d'apport d'air.

L'effet de la recirculation sur les résultats globaux de la combustion est assez limité; le taux d'épuisement varie peu mais on constate une légère réduction du temps de retour à 1 500 °K quand R croît.

2.5. Résumé et conclusions

Les modèles mathématiques étudiés donnent des résultats en bon accord avec ce qu'on observe en pratique concernant l'évolution des principales grandeurs physiques, température et pression partielle d'oxygène; cet accord donne toute leur valeur aux indications qu'ils fournissent sur le rôle des principaux paramètres de la combustion.

Les courants de recirculation jouent un rôle essentiel dans le processus d'échauffement et d'inflammation du charbon. En l'absence de recirculation, l'inflammation par le seul concours du rayonnement des parois demanderait des délais beaucoup plus longs que ceux acquis en pratique.

Les résultats de la combustion sont très sensibles à la loi d'apport d'air (retard à l'apport d'air, durée de l'apport), surtout en l'absence de courant de recirculation. La recirculation a pour effet bénéfique d'atténuer les conséquences défavorables d'une loi d'apport d'air s'écartant de la loi optimale.

La combustion est très sensible à la granulométrie du charbon; si une réduction générale du niveau de finesse apporte une amélioration sensible, c'est surtout le resserrement de l'éventail granulométrique qui s'accompagne le plus d'une forte amélioration du taux d'épuisement.

Il est bien connu que l'élévation de température des parois améliore la combustion du charbon pulvérisé; le modèle montre qu'à cet égard il est plus avantageux de calorifuger fortement la zone voisine du brûleur que de relever modérément le niveau thermique de toutes les parois.

3. Études sur modèles réduits (Maquettes)

3.1. Généralités

A l'intérieur des chambres de combustion, les phénomènes de mélange entre air primaire chargé de charbon, air secondaire et gaz chauds de recirculation jouent un rôle de premier plan dans le déclenchement de l'inflammation et le déroulement de la combustion des particules de charbon. En pratique, ces phénomènes, de nature aérodynamique, sont beaucoup trop complexes pour se prêter à une analyse mathématique même approchée; par contre, il est possible, moyennant certaines simplifications (14) d'en obtenir une image satisfaisante au moyen de modèles froids.

Dans le cadre des recherches entreprises par le Cerchar, cette technique expérimentale a été appliquée à l'étude de deux problèmes:

- amélioration des chaudières à flammes tangentielles,
- étude de flammes de fours de cimenterie.

3.2. Étude sur les chaudières à flammes tangentielles (16)

3.2.1. But de l'étude

Les foyers à flammes tangentielles sont normalement conçus pour brûler les charbons gras. Comparés aux foyers classiques à flammes en U ou en double U utilisés pour la combustion des maigres, ils présentent l'avantage d'être de volume plus réduit et donc d'un coût de construction nettement inférieur.

L'objet de l'étude était d'examiner les possibilités techniques d'adaptation des foyers à flammes tangentielles à la combustion de charbons à faible indice de M.V., de façon à pouvoir disposer dans l'avenir, pour l'utilisation de ce type de charbon, de solutions moins coûteuses que les chaudières classiques à flamme en U ou double U.

3.2.2. Principe de la méthode utilisée

L'étude a été conduite par étapes en collaboration avec les Houillères du Bassin du Nord-Pas-de-Calais et la Société Stein-et-Roubaix, en utilisant une maquette à air à échelle 1/8 d'une chaudière en service. Elle a comporté une succession d'essais sur la maquette et d'essais en vraie grandeur dans la chaudière réelle.

La technique des modèles froids utilisés au Cerchar a été exposée en (14) et (15). Elle repose sur l'hypothèse que le « corps de flamme » qui remplit l'intérieur de la chambre de combustion peut être considéré comme constitué de gaz à température et masse volumique uniformes. Les conditions à respecter pour réaliser la similitude sont alors :

- de conserver sur la maquette des conditions d'écoulements nettement turbulents,
- d'assurer sur la maquette la même répartition entre les différents orifices d'introduction de fluides primaire, secondaire, tertiaire, des débits-masse et des débits de quantité de mouvement que sur la chaudière réelle,
- d'appliquer aux sections d'introduction des fluides une correction pour tenir compte que dans la réalité les fluides injectés dans la chambre de combustion sont à température beaucoup plus basse que le corps de flamme et que le fluide primaire y est chargé de charbon. C'est la correction de Thring-Newby.

3.2.3. Étude et choix de la structure des brûleurs

Dans la première phase de l'étude, on a recherché la structure de brûleur (forme et disposition des orifices d'injection de fluides) la plus apte à réaliser de bonnes conditions d'inflammation; pour caractériser ces conditions, on a considéré la loi d'échauffement du fluide primaire par mélange avec les gaz de recirculation et l'évolution de la concentration en charbon dans la zone d'inflammation supposée (isotherme fictive: 800 °C).

Les concentrations en différents points en fluide primaire, air secondaire, gaz de recirculation, étaient déterminées par analyse de deux gaz traceurs: CH₄ dans l'air primaire et CO₂ dans l'air secondaire, injectés en proportions constantes. Les températures fictives en chaque point étaient calculées en prenant: 90 °C pour l'air primaire, 250 °C pour l'air secondaire et 1 200 °C pour les gaz de recirculation. Les concentrations en charbon étaient supposées proportionnelles aux concentrations en air primaire porteur. Les calculs étaient effectués sur ordinateur. Au terme du dépouillement, les résultats étaient rassemblés sous forme de graphiques analogues à la figure 28.

Les divers types de brûleurs expérimentés sont représentés par la figure 29.

Les brûleurs dits « schématiques » sont dérivés des brûleurs usuels de la chauffe tangentielle par une stylisation de leur forme. Les orifices de sortie sont pris rectangulaires. Ces brûleurs devaient être réalisables sur la chaudière réelle par obturation partielle des orifices existants.

Dans la série des brûleurs schématiques, on a étudié l'influence des paramètres: vitesses d'air secondaire, proportion d'air primaire; on a examiné également l'intérêt d'une injection partielle de l'air secondaire de part et d'autre de l'air primaire.

Les brûleurs dits « nouveaux » correspondent à des constructions éventuellement nouvelles de brûleurs. Les types I et IV correspondent au souci de faciliter l'accès des gaz chauds recirculés vers un ou deux des côtés d'un jet primaire très allongé. Le type II permet d'expérimenter l'effet d'une injection limitée d'air secondaire au milieu du jet primaire afin d'augmenter la poussée de ce dernier. Le type III est une variante du type S_H destinée à juger si une convergence des jets secondaires permettrait d'accélérer la combustion une fois l'inflammation acquise. Le type V était destiné à expérimenter le comportement d'un brûleur à lames verticales d'air secondaire encadrant un jet primaire à forte poussée.

Sur la base des distances au brûleur de la zone à 800 °C, distances prises sur l'axe de l'écoulement et ramenées à l'échelle du foyer réel pour représenter une sorte de distance d'inflammation, on obtient le classement suivant:

brûleurs I	distance pour 800 °C: environ 1,50 m.
brûleurs S _H	distance pour 800 °C: environ 2 m.
brûleurs II, III, V et S _F	distance pour 800 °C: de 2,40 à 2,50 m.
autres brûleurs S	distance pour 800 °C: de 2,70 à 2,90 m.

Le brûleur IV n'a pas été classé; les résultats obtenus ont paru difficiles à interpréter; ce brûleur donne lieu à un échauffement analogue à celui du brûleur I, mais il se produit une dilution très poussée du charbon en sorte que les conditions d'une inflammation stable ne semblent pas assurées.

Le classement obtenu montre l'intérêt des choix suivants:

- faible proportion d'air primaire, résultat classique correspondant à l'effet de ballast défavorable de l'air primaire relativement très froid,

- absence de soufflage latéral, afin de faciliter l'accès des gaz chauds vers le jet primaire,
- buse primaire allongée, afin d'accroître la surface du jet primaire accessible aux gaz chauds,
- forte vitesse d'air secondaire, afin d'obtenir pour l'ensemble du brûleur une poussée motrice suffisante pour l'entraînement de gaz chauds vers les brûleurs.

3.2.4. Essais industriels des brûleurs sélectionnés

En conclusion de ces essais préliminaires, il fut décidé de retenir les formules de brûleur types S_H et I_A et de tenter l'essai en vraie grandeur sur la chaudière en service qui comportait trois étages de brûleurs.

Cependant, au cours de ces essais industriels, il n'a pas été possible de réaliser les conditions de répartition et de vitesse des fluides correspondant au meilleur essai sur maquette, à cause des caractéristiques des circuits d'alimentation en air et en charbon de la chaudière. Ainsi il a fallu conserver une proportion d'air primaire de l'ordre de 40%, très supérieure à celle retenue à la suite des essais sur maquette. On n'a pas pu non plus porter l'excès d'air à sa valeur maximale en raison de la nécessité pratique de limiter la température de surchauffe.

Ces essais n'ont donc pas permis de se faire une idée exacte de l'intérêt réel des deux formules retenues.

Comparés aux brûleurs anciens alimentés en charbon maigre à 8,5% de M.V., les brûleurs type S_H ont néanmoins permis un gain de 2,5 points sur les imbrûlés.

Le brûleur à fente verticale type I_A essayé également dans des conditions assez éloignées de l'optimum donné par l'étude sur modèle s'est caractérisé par une bonne stabilité de la flamme; mais le gain sur les imbrûlés a été moins net qu'avec brûleur type S_H . En outre, on a observé, sans en trouver l'explication, que pour maintenir l'excès d'air à un niveau acceptable, il fallait fermer l'alimentation en air secondaire entre les brûleurs médians et inférieurs. Cette analyse montrait au moins qu'il existe d'importantes interactions entre les trois étages de brûleurs et qu'il convenait de reprendre l'étude sur modèle en étudiant cette fois non plus un brûleur isolé, mais l'ensemble de la chambre de combustion équipée de ses trois étages de brûleurs.

3.2.5. Étude sur modèle de l'ensemble des trois étages de brûleurs

Cette nouvelle série d'essais comportant l'analyse du processus de mélange sur quelques cas et de

nombreux essais de dégrossissage par visualisation firent apparaître d'importantes interactions entre les brûleurs et la chambre de combustion se traduisant notamment dans le cas du brûleur à fente verticale par une forte déviation des écoulements vers les parois du foyer. Cette déviation était moins marquée quand on réduisait l'air injecté entre les deux étages inférieurs de brûleurs. En rapprochant cette observation des résultats des essais industriels, on a été conduit à admettre que la déviation des écoulements vers les parois n'était pas favorable à un bon mélange de l'air secondaire après l'inflammation.

Ainsi, le brûleur à fente type I_A s'avère apte à procurer une inflammation stable des charbons maigres mais la combustion proprement dite apparaît gênée par les médiocres conditions de mélange de l'air secondaire dues à une déviation brutale des flammes vers les parois.

Pour chercher un remède à ces défauts, une dernière série d'essais sur modèle fut entreprise en modifiant le mode d'admission de l'air secondaire. Au lieu d'injecter celui-ci en totalité au brûleur, on en prélevait une partie qu'on injectait par des fentes verticales disposées au milieu des parois de foyer (figure 30). Ce dispositif a été essayé en faisant varier la proportion d'air prélevé de 18 à 30% de l'air total et en faisant varier les vitesses d'injection de 15 à 58 m/s.

Une première série d'essais a été effectuée avec des fentes disposées au milieu des façades; ces essais ont montré (figure 31):

- qu'il fallait proscrire l'injection par les petits côtés du foyer seuls, ces dispositifs provoquant le plaquage des flammes contre les grands côtés du foyer;
- que l'injection par les grands côtés du foyer est bénéfique; elle produit un décollement des flammes et crée d'importantes zones de recirculation au voisinage des brûleurs;
- que l'emploi d'injections sur les 4 faces est moins avantageuse que le dispositif précédent; le décollement des flammes est réalisé mais les zones de recirculation sont moins développées;
- que dans la gamme des vitesses d'injection explorée, l'influence de ce paramètre est relativement secondaire.

Dans une seconde série d'essais, les orifices d'injection ont été légèrement décalés afin de tenir compte des possibilités technologiques de réalisation de ces orifices sur la chaudière réelle.

Ces essais ont montré que pour compenser ce décalage, il y avait lieu de donner aux injections une incidence α de l'ordre de 10° (figure 30).

Ainsi, l'injection d'une partie de l'air secondaire par des fentes disposées au milieu des grandes parois du foyer apparaissait à la suite des essais sur maquette comme susceptible d'apporter une amélioration décisive au fonctionnement des brûleurs type I_A.

3.2.6. Essais industriels avec injections d'air par les grandes façades du foyer

On a essayé alors de transposer ces résultats sur la chaudière réelle munie du brûleur à fente verticale. Les injections d'air secondaire disposées entre les brûleurs furent neutralisées. Par des fentes ménagées sur les deux grands côtés mais légèrement décalées par rapport au plan axial et présentant par rapport à ce plan une incidence de 10°, on a injecté des proportions d'air variant de 18 à 33% du débit total à des vitesses pouvant atteindre 50 m/s.

Toutefois, pour des raisons technologiques, ces orifices ne purent être réalisés sous la forme prévue d'une fente et durent être divisés en deux fentes superposées séparées par un long espace mort.

Les résultats obtenus dans ces conditions furent très éloignés de ce que laissait prévoir l'essai sur maquette, et les flammes restèrent plaquées à la paroi comme au cours des premiers essais effectués sans injections latérales.

Les causes de cet échec furent recherchées en reprenant les essais sur maquette et en remplaçant les fentes continues d'injection en façade par des fentes discontinues analogues à celles réalisées sur la chaudière. On s'aperçut que dans ces conditions les jets de façade devenaient incapables de créer les décollements de flamme qu'on avait obtenus au moyen de fentes continues.

L'impossibilité pratique de réaliser sur la chaudière dont on disposait des fentes continues conformes à celles indiquées par les essais sur maquette a conduit à interrompre les essais.

La chaudière fut néanmoins maintenue en exploitation avec ses fentes d'injection latérales discontinues car, avec le charbon à 18% de M.V. utilisé par la centrale, elle donnait une meilleure stabilité de flamme et une meilleure combustion que les chaudières équipées avec les brûleurs d'origine.

3.2.7. Résumé et conclusions

Une première série d'essais sur maquette a été effectuée pour rechercher les meilleures configurations de brûleurs d'angle pour chaudières à chauffe tangentielle, convenant à la combustion des charbons maigres; ils ont conduit au choix d'un type de brû-

leur caractérisé par un orifice d'injection de fluide primaire très allongé, favorisant le mélange de celui-ci avec les gaz chauds de recirculation.

Les essais industriels de ce type de brûleur furent effectués dans une chaudière de centrale; mais, pour des raisons technologiques, il ne fut pas possible de reproduire les conditions de répartition et de vitesse de fluides considérées comme les meilleures à la suite des essais sur maquette.

Ces essais industriels montrèrent néanmoins l'intérêt de ce type de brûleur qui, même dans des conditions de marche éloignées de l'optimum, apportait une très nette amélioration de la stabilité de la flamme; toutefois, le gain sur les imbrûlés restait très limité en raison de difficultés rencontrées pour augmenter l'excès d'air.

Une nouvelle série d'essais sur maquette, reproduisant l'ensemble des 3 étages de brûleurs existant dans la chaudière réelle, montrèrent que pour favoriser la combustion après inflammation, il y avait intérêt à injecter une partie de l'air secondaire par des fentes continues, de même hauteur que l'ensemble des brûleurs et disposées vers le milieu des parois de la chambre de combustion. Une tentative d'essais de ce dispositif sur la chaudière industrielle fut entreprise mais n'aboutit pas à des résultats vraiment concluants en raison de l'impossibilité technique de réaliser des injections de façades présentant les caractéristiques indiquées par les essais sur maquette.

On a dû interrompre les essais sans avoir pu tirer tout le parti possible des études sur maquettes. Néanmoins, les essais industriels avaient montré l'intérêt des améliorations suggérées par ces études et indiqué la voie dans laquelle il fallait s'engager pour adapter les chaudières à flamme tangentielle aux charbons maigres.

3.3. Étude sur un modèle réduit de four à ciment

3.3.1. But de l'étude

Pour la cuisson du clinker, le charbon présente l'avantage sur les combustibles concurrents de produire des flammes chaudes et très émissives, assurant un meilleur transfert de la chaleur vers la charge, se traduisant en pratique par un accroissement de la productivité des fours.

Pour essayer de tirer le meilleur parti de cette propriété des flammes de charbon, on a entrepris l'étude, sur une maquette, des conditions de mélange entre combustible et comburant qui gouvernent le processus de combustion et par contrecoup, les températures de flamme et l'intensité des transferts de chaleur.

L'étude a été conduite sur une maquette à air représentant à l'échelle du 1/10 un four en exploitation de la C^{ie} des Ciments français, dont toutes les dimensions et les caractéristiques de fonctionnement avaient été fournies par cette société.

3.3.2. Description de l'installation expérimentale

La longueur de la maquette était limitée à la zone de clinkérisation du four (figure 32) où se déroulent les phénomènes de combustion. La charge de clinker était simulée par une plaque pleine de même profil que la surface de la charge.

Le corps du four et le capot étaient réalisés en « Altuglas » et comportaient tout le long de l'une des génératrices latérales une série d'orifices pour l'introduction de sondes de mesures.

Les sondes étaient montées sur un chariot se déplaçant sur des rails parallèles à la maquette, de façon à permettre une exploration diamétrale des différentes sections. Chaque exploration diamétrale était réalisée automatiquement au moyen d'un mécanisme commandant le déplacement de la sonde selon un programme déterminé.

L'exploration des champs de vitesse était effectuée avec une sonde du type « tube de Pitot » dont le signal était détecté et amplifié au moyen d'un capteur à mutuelle inductance et enregistré sur potentiomètre.

Pour l'exploration des champs de mélange, le fluide primaire était marqué par une addition de 3% de méthane; la sonde de prélèvement était munie d'une cellule grisométrique à haute sensibilité et réponse rapide qui permettait d'enregistrer la teneur en méthane en chaque point exploré et de calculer le facteur de mélange. Le facteur de mélange était rapporté au charbon, supposé présent en proportion constante dans le fluide primaire; il exprime le rapport entre la masse totale d'air présente dans un échantillon et la masse d'air correspondant à la combustion neutre du combustible.

3.3.3. Essais préliminaires pour le choix des critères de similitude

Dans une première phase de l'étude, on a cherché à simuler les conditions de marche réelles du four afin de comparer les résultats obtenus aux observations des exploitants.

Ces conditions étaient:

Débits	clinker	3,47 kg/s (30 t/jour)
	charbon	3,66 kg/s
	air primaire	1,59 kg/s
	air secondaire	5,56 kg/s
	excès d'air total	13,8%
Températures	air primaire	30 °C
	air secondaire	800 °C
	corps de flamme	1 500 °C
	vitesse à la tuyère (air primaire et charbon)	30,2 m/s

Le premier problème qui s'est posé dans cette phase de l'étude a été le choix des critères de similitude. Sur la maquette, tous les fluides (air primaire, air secondaire, corps de flamme) sont à la même température et ont la même masse volumique, alors que, dans la réalité, ces fluides sont à des températures très différentes et l'un deux (fluide primaire) transporte le charbon.

On est donc conduit à corriger la section de la tuyère d'injection d'air primaire du four, de façon à restituer, avec un gaz de même masse volumique que le corps de flamme, le même débit masse et le même débit de quantité de mouvement que dans la réalité. On aboutit ainsi pour la tuyère d'injection d'air primaire et de charbon à un diamètre corrigé qui est loin d'être négligeable devant le diamètre du four, ce qui risque d'influer profondément sur la configuration des écoulements.

Devant l'impossibilité de fixer le choix d'un diamètre de tuyère corrigé sur des considérations théoriques, on a entrepris d'étudier les champs de vitesse et des champs de mélange avec cinq tuyères, et de comparer les longueurs de flamme obtenues avec celles observées dans le four réel.

La tuyère de plus petit diamètre correspondait à la similitude géométrique simple; la tuyère de plus grande section avait subi la plus forte correction, c'est-à-dire celle calculée sur la base de la température du corps de flamme (1 500 °C). Les 3 autres tuyères présentaient des diamètres intermédiaires.

L'exploration des champs de vitesse dans 6 plans diamétraux a montré que d'une façon générale, l'importance des courants de recirculation décroît quand le diamètre de la tuyère augmente. L'allure générale des phénomènes de recirculation est analogue à celle décrite par Curtet (17), mais l'extension des zones de recirculation et les débits recirculés sont plus importants que ce qu'indique cet auteur. Cette différence paraît due à la présence de la charge.

Les courbes d'égal facteur de mélange sont assez bien centrées sur l'axe dans le cas des tuyères de petit diamètre; elles sont de plus en plus déviées par rapport à l'axe quand le diamètre croît.

Pour les tuyères de petit diamètre, les vitesses de mélange sont assez conformes à ce qu'on observe dans un jet libre: en particulier, la distance axiale nécessaire pour obtenir le mélange stoechiométrique, prise comme repère de la longueur de flamme, est égale à celle calculée pour un jet libre. Mais quand le diamètre de la tuyère croît, le mélange devient de plus en plus rapide par rapport au jet libre et la longueur de flamme s'accroît beaucoup moins vite que pour celui-ci. Ce phénomène est probablement lié à la réduction des courants de recirculation qui accompagne l'accroissement du diamètre de la tuyère.

Ces résultats ont été comparés aux observations faites dans les fours industriels par les techniciens de la Société des Ciments français. Il est apparu que les longueurs de flammes données par la tuyère non corrigée ne sont certainement pas conformes à la réalité, alors que celles données par les trois tuyères de plus grand diamètre sont d'un ordre de grandeur très vraisemblable. Mais il n'a pas été possible de choisir entre ces trois tuyères qui donnent d'ailleurs des résultats assez voisins; aussi fut-il décidé de poursuivre l'étude en adoptant, pour calculer le diamètre des tuyères de la maquette, la correction classique de Thring-Newby. (paragraphe 3.2.2.).

3.3.4 Étude de l'influence de la vitesse à la tuyère

Utilisant les tuyères précédentes, considérées comme modèles réduits de tuyères réelles par application de la correction de Thring-Newby, on a étudié l'influence de la vitesse à débit-masse constant.

Rapportés au four, les résultats peuvent se résumer comme suit:

Vitesse à la tuyère m/s	229	120,8	66,5	36,6	30,6
Longueur de la flamme m	4,4	4,7	6,3	6,6	6,7

On voit que dans la gamme des vitesses usuelles (30-60 m/s), l'accroissement de la vitesse du jet primaire n'a qu'une faible influence sur la longueur de la flamme (longueur caractérisée par la position de la surface d'iso-mélange correspondant aux proportions stoechiométriques). Ce n'est que pour des vitesses très supérieures, de l'ordre de 100-200 m/s, difficilement réalisables en pratique, qu'on observe une réduction importante de la longueur de flamme.

3.3.5. Conclusions

Ces premiers essais sur maquette de four à ciment montrent qu'en pratique l'accroissement de la vitesse du fluide primaire au brûleur n'est susceptible d'apporter qu'une amélioration limitée des performances des fours.

Pour accélérer la combustion, accroître les échanges thermiques dans la zone de cuisson et par contre-coup la productivité des fours, il apparaît nécessaire d'agir sur la structure même des brûleurs.

4. Études en four pilote de brûleurs à turbulence (18)

4.1. Généralités

Les difficultés rencontrées au cours de l'étude des foyers à flamme tangentielle (paragraphe 32) pour transposer directement sur une chaudière réelle les résultats des essais sur modèle réduit incitèrent le Cerchar, en 1967, à s'équiper d'une installation permettant l'essai, à petite échelle, de véritables brûleurs alimentés en charbon et conçus conformément aux enseignements fournis par les études préliminaires sur modèles froids.

Cette installation, dénommée « four pilote », a servi jusqu'ici à l'étude de brûleurs à turbulence à haute intensité de rotation. Dans ces brûleurs, la mise en rotation de l'air secondaire permet d'accélérer l'inflammation et de stabiliser la flamme par la création, dans l'axe du brûleur, d'un important noyau de recirculation de gaz chauds. En améliorant cette technique, on peut espérer la rendre applicable à un très large éventail de qualités de charbons et notamment aux charbons maigres, ce qui permettrait d'utiliser ces charbons dans des chaudières à brûleurs de façade, beaucoup moins volumineuses et coûteuses que les chaudières à flammes en U ou double U utilisées jusqu'ici pour brûler les charbons à faible indice de matières volatiles.

Une série d'études technologiques concernant la conception des brûleurs a été conduite en tenant compte des impératifs techniques et économiques qui se présenteront lors du passage à l'échelle industrielle.

C'est ainsi qu'on a étudié le dimensionnement d'un générateur de rotation à ventelles en cherchant le meilleur compromis entre l'encombrement, le coût de construction et les pertes de charge.

Suivant le même critère, on a examiné le mode d'admission de l'air secondaire dans le corps du brûleur en s'imposant d'obtenir une symétrie satisfaisante des écoulements à la sortie. On a étudié

tout spécialement les conditions à remplir pour éviter la formation de flammes plaquées à la paroi frontale du foyer.

Enfin, à la suite des essais sur four pilote, on a étudié deux prototypes de taille industrielle, un pour charbons maigres, l'autre pour charbons flambants.

4.2. Description du four pilote et de ses annexes

Le four horizontal (figures 33 et 34) de forme cylindrique comporte deux façades à circulation d'eau et sept viroles constituées par des tubes d'eau à section carrée soudés sur une tôle. La paroi interne est revêtue de béton réfractaire, sur une épaisseur de 12 cm.

Les dimensions intérieures du four sont: longueur 2,97 m, diamètre 0,90 m.

Un orifice est prévu au centre de la façade avant, pour la mise en place du brûleur à charbon. Quatre brûleurs de préchauffage au gaz sont disposés autour de cet orifice. Le carneau de fumées est branché au centre de la façade arrière.

Toutes les viroles sont fendues suivant la génératrice supérieure du four pour permettre l'introduction de sondes de mesure qui peuvent ainsi être disposées en n'importe quel point du plan vertical de symétrie. L'étanchéité est assurée autour de la fente par un point hydraulique dont la partie mobile supporte les sondes de mesure. Divers regards sont aménagés dans le plan horizontal médian des viroles.

Le charbon, préséché à moins de 2% d'humidité, est pulvérisé dans un broyeur à marteaux capable de fournir un débit de 100 kg/h à la finesse industrielle; on peut parfaire le séchage au cours du broyage par l'appoint de fumées provenant d'un four à gaz.

Le charbon pulvérisé, récupéré dans un cyclo-filtre, est stocké dans une trémie dont la capacité est de 400 kg. Cette trémie est posée, avec deux bacs récepteurs d'eau, sur le tablier d'une bascule enregistreuse sensible à une variation de poids de 20 g. Au cours de l'essai, le charbon est extrait de la trémie par un dispositif pneumatique tandis que les bacs récepteurs sont alimentés par un débit d'eau pré réglé à la valeur choisie pour le débit de charbon: on est ainsi ramené à une méthode de zéro pour le contrôle du débit de charbon. La stabilité du zéro, et par suite du débit de charbon est assurée de façon automatique.

Le débit de charbon pulvérisé au brûleur est de l'ordre de 40 kg/h.

Un préchauffeur indépendant chauffé au gaz permet d'élever jusqu'à 600°C un débit d'air de 400 kg/h.

Le préchauffeur est réglé pour fournir au brûleur l'air secondaire à la température désirée et au circuit d'alimentation primaire une proportion convenable d'air chaud.

Le carneau d'évacuation des fumées est calorifugé et sa partie amont est réservée aux mesures et analyses continues correspondant à la sortie du four. Le tirage est réglé par une prise d'air à son extrémité aval. Le refroidissement des fumées se fait par mélange avec de l'air froid dans une cheminée verticale. Le mélange passe dans deux séparateurs cyclones, sa circulation est assurée par un ventilateur de tirage puissant.

4.3. Études et essais préliminaires

Le principe adopté pour la réalisation d'un premier brûleur destiné à l'étude des écoulements hautement turbulents par mise en rotation de l'air secondaire au moyen de ventelles orientables est donné par la figure 35, qui précise les principales caractéristiques géométriques finalement adoptées.

Une première étude « à froid », sur un banc d'essai annexe fut effectuée pour préciser les frontières du jet et des zones de recirculation en fonction de l'intensité de la rotation, de l'ouverture du col du divergent (angle α) et du rapport des débits massiques primaire et secondaire.

L'intensité de la rotation est caractérisée par un « nombre de rotation » qui exprime le rapport du moment de rotation au débit de quantité de mouvement axial (poussée axiale); afin de rendre cette expression adimensionnelle, on la divise par le rayon du col du divergent.

Au cours de cette étude, on a d'abord déterminé expérimentalement la longueur correcte à donner aux ventelles de mise en rotation pour assurer un bon guidage de l'air sans accroissement exagéré du maître-couple.

Ayant obtenu un guidage correct, on a procédé à l'étude des écoulements pour différentes valeurs des paramètres précédents.

Dans le cas d'un brûleur à sortie divergente, le « nombre de rotation » pour lequel apparaît le noyau de recirculation interne, dit « nombre de rotation critique » varie peu avec la distribution des fluides et reste compris entre 0,35 et 0,45. Au-delà, la longueur du noyau est comprise entre 4 et 6 fois le diamètre du col et sa largeur maximale atteint 1,4 diamètre.

Dans le cas d'un brûleur à col cylindrique, les variations du « nombre de rotation critique » en fonction de la répartition des fluides et de la géométrie du

brûleur sont plus complexes, les valeurs les plus courantes se situant entre 0,45 et 0,65; les dimensions des noyaux de recirculation observés sont dans l'ensemble plus réduites que dans le cas du col divergent: longueur 2 à 4 diamètres du col cylindrique, largeur maximale 0,8 diamètre.

Sur la base de ces résultats une première série de flammes fut réalisée dans le four pilote, avec un charbon maigre à 6,8% de matières volatiles et 5,4% de cendres, broyé de façon à avoir 87% de passant au tamis de 80 μ .

Avec un col divergent, on a obtenu des flammes stables pour des « nombres de rotation » compris entre 0,34 et 0,81. Bien que les contours de la flamme aient été peu visibles, on a pu vérifier par quelques mesures que l'inflammation se stabilisait très près du nez du brûleur. On a également vérifié l'existence de noyaux de recirculation de dimensions voisines de celles qui avaient été relevées lors des essais à froid.

Dans tous les cas donnant une flamme stable, les pertes par imbrûlés à la sortie du foyer n'excédaient pas 2% pour un temps de séjour moyen de l'ordre de 3 secondes.

4.4. Première étude complète d'une flamme de référence

Pour cette première étude complète d'une flamme, on a choisi les conditions de réglage assurant, d'après les résultats des essais qualitatifs précédents, la formation d'un important noyau de recirculation favorisant la stabilité de l'inflammation.

Les valeurs des paramètres de réglage correspondaient aux valeurs industrielles courantes, sauf pour ce qui concerne l'intensité de rotation, nettement plus élevée.

Le charbon utilisé était le même que précédemment et sa granulométrie du même ordre.

Les réglages adoptés étaient les suivants:

- ouverture du divergent: 35⁰,
- position du « nez » ou ajustage de l'orifice primaire du brûleur: au ras du col du divergent,
- air primaire: débit: 100 kg/h (soit 20% de l'air neutre)
vitesse: 35 m/s
température: 135 °C,
- air secondaire: débit: 450 kg/h (soit 90% de l'air neutre)
vitesse axiale: 56 m/s
température: 330 °C,
- excès d'air: 10%,
- angle de braquage des ventelles: 45⁰,
- nombre de rotation: 0,5.

Au moyen de sondes de mesure et de prélèvement à circulation d'eau on a procédé à une exploration systématique point par point de la flamme et déterminé:

- les températures,
- les vitesses axiales,
- les concentrations en particules et teneurs en carbone de ces particules,
- la composition des gaz (CO₂, CO, O₂).

Ces mesures ont montré:

- l'existence d'un noyau chaud sur l'axe et très près du brûleur,
- l'existence d'une zone périphérique chaude près des parois, sensiblement à l'impact du jet conique,
- l'existence d'un noyau de recirculation interne d'environ 50 cm de longueur et 20 cm de diamètre,
- la très faible intensité des courants de recirculation externes,
- l'évolution rapide de la combustion au voisinage du brûleur; au-delà de l'abscisse 40 cm l'évolution de la combustion devient très lente.

Ces résultats confirment l'existence d'un noyau de recirculation interne ramenant vers le brûleur une masse importante de gaz chauds; une première phase de combustion très active est observée près du brûleur, là où le jet primaire percute le noyau de gaz chauds recirculés. Une deuxième zone de combustion active est observée à la périphérie, au voisinage de l'impact du jet conique contre les parois.

4.5. Étude complète d'une série de flammes types

4.5.1. Sélection des flammes types au moyen des essais « à blanc »

L'exploration complète d'une flamme est une opération longue et coûteuse; aussi, avant d'entreprendre l'étude systématique de l'influence des paramètres de réglage sur la structure de la flamme on a procédé à une première étude, de caractère aérodynamique, pour déterminer comment évolue la structure des seuls écoulements en fonction des valeurs des paramètres.

Ces essais aérodynamiques ont été effectués dans le four même, avec des fluides primaire et secondaire portés à leur température d'utilisation. Pour les distinguer des essais effectués au banc, avec

fluides froids, on les a désignés sous le terme d'essais « à blanc ». Des expériences préalables avaient montré que ce type d'essais « à blanc » simule beaucoup plus correctement la structure réelle des écoulements dans les flammes que les essais au banc avec fluide froid.

Les paramètres dont on a étudié l'influence ont été:

- l'ouverture du divergent: de 0° (col cylindrique) à 35° ;
- la position du « nez » de l'orifice primaire du brûleur:
 - a) nez au col du divergent (nez court),
 - b) nez au ras de la façade intérieure de la paroi du four (nez long),
 - c) nez en position moyenne (nez moyen);
- l'angle de braquage des ventelles et le nombre de rotation.

Schématiquement les configurations des écoulements qui ont été obtenues peuvent se classer en trois catégories:

Type 1: Écoulement sans recirculation interne.

Cet écoulement est caractéristique des réglages conduisant aux faibles nombres de rotation.

Type 2: Écoulement avec recirculation interne pleine.

A l'inverse du précédent, ce type d'écoulement est obtenu aux nombres de rotation élevés.

Type 3: Écoulement avec recirculation interne torique.

Cette configuration, intermédiaire, résulte de l'évolution d'un écoulement de type 2. Lorsque le jet primaire n'est pas capturé par le jet secondaire et réussit à conserver son individualité, il pénètre plus ou moins profondément dans le noyau de recirculation. On obtient alors un noyau de recirculation pénétré ou pseudo-torique. C'est le cas le plus général. Les mesures à proximité immédiate du brûleur sont délicates à exécuter et en conséquence, il sera le plus souvent difficile de préciser les domaines d'existence respectifs des écoulements à noyau plein ou à noyau pseudo-torique. A la limite lorsque le jet primaire perce le noyau de recirculation, on obtient une configuration avec recirculation annulaire ou torique. Dans ce cas la composante axiale de vitesse, le long ou près de l'axe du four, est toujours posi-

tive. La caractéristique essentielle de l'écoulement avec recirculation annulaire ou torique est en définitive une individualité marquée du jet primaire, et son existence est subordonnée à l'emploi de buses primaires allongées et de divergents suffisamment ouverts, le nombre de rotation étant assez élevé. Des résultats d'essais à chaud ont montré que le domaine d'existence de ce type d'écoulement est limité; par ailleurs un certain manque de reproductibilité semble confirmer le caractère métastable et transitoire de cet écoulement.

Les conditions de formation des différents types d'écoulement ont pu être résumées, sous forme de graphiques analogues à la figure 36.

4.5.2. Étude complète de six flammes types

A la suite des essais aérodynamiques précédents, on a limité à six le nombre de flammes dont l'étude apparaissait nécessaire pour préciser les possibilités pratiques de la technique des brûleurs à haute intensité de rotation.

Ces six essais ont été effectués à « nombre de rotation » constant et tel qu'on reste toujours dans le domaine des écoulements à fort noyau de recirculation interne.

Les six flammes correspondaient à:

- trois positions du « nez » de la buse de fluide primaire
 - a) nez court (orifice au col du divergent),
 - b) nez long (orifice à l'alignement de la paroi interne de la façade avant du four),
 - c) nez moyen, à mi-chemin des deux positions précédentes;
- deux valeurs de l'ouverture du divergent: 20° et 35° .

Le charbon maigre était de même origine que celui utilisé précédemment (par. 4.3.), mais plus cendré (16%) afin d'améliorer la précision des calculs des taux de combustible résiduel.

La finesse de broyage du charbon était caractérisée par 85% de passant au tamis de 80μ .

Les autres conditions d'essais, identiques pour toutes les flammes étaient les suivantes:

- débit de charbon: 48 kg/h,

- air primaire: débit: 106 kg/h soit 22% de l'air neutre
vitesse: 24 m/s
température: 130 °C,
- air secondaire: débit: 446 kg/h soit 93% de l'air neutre
vitesse axiale: 36 m/s
température: 320 °C.
- excès d'air: 13%,
- angle de braquage des ventelles: 45°,
- nombre de rotation: 0,77.

Pour chacune des six flammes, les mesures ont permis de dresser une série de cartes représentant:

- le champ de vitesses axiales,
- le champ de températures (figure 37),
- les courbes d'égale teneur en CO₂ et en O₂,
- les courbes d'égal taux de combustible résiduel (figure 38).

Les structures d'écoulement observées ont été en tout point conformes aux prévisions des études aérodynamiques précédentes (par.4.5.1); suivant l'ouverture du divergent et la position du nez de la buse primaire on retrouve bien les différents types de noyau de recirculation, plein ou plus ou moins pénétré par le jet primaire.

Une autre observation générale importante est qu'il n'existe aucune corrélation simple entre le degré d'avancement de la combustion et le degré apparent de mélange du combustible et de l'air. On interprète ceci en admettant que les paramètres étudiés agissent de façon distincte sur les écoulements gazeux et sur l'écoulement des particules solides qu'ils transportent. En d'autres termes, il n'y a pas concordance entre les champs d'écoulement gazeux et les champs de concentration en particules; les performances de combustion dépendent alors d'une superposition plus ou moins favorable de ces deux champs.

L'examen des cartes de résultats (figures 37 et 38) des six flammes types conduit pour chacune d'elles aux observations suivantes:

- flamme n° 3; nez court, ouverture du divergent 33°:

Le débit de recirculation est maximum (49% à 10 cm du brûleur).

Une proportion importante de charbon pénètre dans le noyau de recirculation plein, ce qui crée une large zone très chaude, proche du nez du brûleur.

L'air secondaire capte ces gaz très chauds et est à son tour rapidement échauffé par la combustion.

La flamme est bien collée au nez du brûleur et très stable; schématiquement on peut la regarder comme constituée de deux flammes, l'une centrale et l'autre périphérique qui se stabilisent mutuellement.

- flamme n° 6; nez court, angle du divergent 20°:

Le noyau de recirculation reste plein; le débit de recirculation axiale est plus faible (27% à 10 cm). Le charbon est plus rapidement capté par l'air secondaire; de ce fait, la zone proche du brûleur est moins chaude et le niveau général des températures est abaissé.

L'inflammation est plus tardive et la flamme moins attachée au brûleur.

- flamme n° 1; nez long, angle du divergent 33°:

Le noyau est pénétré par le jet primaire; le débit de recirculation reste faible (20%).

La plus grande concentration en charbon se localise au voisinage de l'axe où il se trouve en excès et ne peut brûler que lentement; il y a par contre manque de charbon dans la nappe conique d'air secondaire.

La zone chaude est loin du brûleur et la flamme mal accrochée.

- flamme n° 4; nez long, angle du divergent 20°:

Le noyau de recirculation est moins pénétré que dans la flamme précédente, le débit de recirculation est encore plus faible (10%); mais comme le charbon est capturé plus rapidement par la nappe conique secondaire la combustion est plus rapide et la flamme mieux accrochée que dans le cas précédent.

Les flammes 2 et 5, correspondant à des positions intermédiaires du nez de la buse primaire, donnent comme on pouvait s'y attendre des résultats intermédiaires entre ceux des flammes 3 et 1 d'une part, 6 et 4 d'autre part.

La conclusion pratique de cette étude des six flammes types, correspondant à des configurations de flamme très différentes est que, dans le cas des charbons difficilement inflammables (charbons maigres), il faut conjuguer la création d'un champ d'écoulement à fort débit de recirculation interne avec le maintien d'une concentration relativement élevée de charbon sur l'axe. Ces conditions sont réalisées avec un divergent largement ouvert et une buse primaire en position arrière ou en position moyenne.

Pour les charbons gras ou flambants, beaucoup plus faciles à enflammer, cette disposition risque de provoquer une concentration de chaleur trop importante au voisinage du brûleur et il y a intérêt à éloigner la flamme en réduisant l'ouverture du divergent ou en avançant la buse primaire.

4.6. Étude de prototypes industriels

4.6.1. Prototype pour charbons maigres

Un des domaines d'application envisagé des brûleurs à haute intensité de turbulence était la possibilité de reconvertir certaines chaudières en service, conçues pour brûler des charbons gras, et équipées de brûleurs de façade, à l'utilisation de charbons maigres.

A la demande des Houillères du bassin du Nord-Pas-de-Calais, on a abordé ce problème par l'étude d'un brûleur prototype de 4 t/h de charbon qui devait être essayé sur une chaudière de ce bassin.

La nécessité d'utiliser les circuits d'alimentation en air et en charbon existants conduisait à des conditions de fonctionnement assez éloignées de celles expérimentées au cours des essais précédents et caractérisées par :

- une forte proportion d'air primaire, imposée par le fonctionnement des broyeurs, de l'ordre de 27% de l'air neutre en allure normale, et de 35% en allure réduite;
- une pression d'air secondaire ne pouvant excéder 120 mmCE, obligeant à réduire la vitesse axiale et la poussée de ce fluide.

Après avoir esquissé un projet de brûleur théoriquement capable, dans ces conditions, de créer des écoulements à fort noyau de recirculation interne (angle du divergent à grande ouverture, nez de buse d'air primaire au col), on a construit un modèle réduit de ce brûleur, à l'échelle du 1/8 pour expérimentation et mise au point sur le four pilote.

Une première série d'essais « à blanc » a confirmé que le niveau des pertes de charge dans le brûleur restait compatible avec les pressions dont on disposait.

Au cours des essais suivants, effectués « à chaud » avec un charbon maigre à 7,5% de matières volatiles, on a expérimenté les allures extrêmes: pleine charge et charge réduite aux 2/3.

A pleine charge, les résultats ont été entièrement satisfaisants. La stabilité de la flamme était très bonne, grâce à la formation d'un noyau de recirculation interne bien développé et d'une zone très chaude et assez étendue, proche du brûleur.

A charge réduite, le noyau de recirculation était moins développé, la flamme plus molle et on notait des instabilités d'écoulement pouvant aller jusqu'au plaquage de la flamme à la paroi frontale du four. Ces plaquages de flamme, survenant de façon intempestive et incontrôlable, représentaient un inconvénient sérieux en raison des surchauffes locales qu'ils peuvent provoquer.

Toute une série d'essais particuliers a dû être effectuée avant de trouver la cause de ce phénomène et de pouvoir l'éliminer. En définitive on a pu mettre en évidence l'importance insoupçonnée d'un paramètre de forme: la loi d'évolution des sections de passage de l'air secondaire à l'amont du col du divergent. Une correction convenable du profil du circuit d'air secondaire dans le brûleur a permis d'éliminer complètement les plaquages de flamme et de fonctionner de façon correcte à allure réduite.

En dépit des résultats très positifs obtenus avec le brûleur modèle réduit, le projet de construire et d'expérimenter un prototype de taille industrielle sur chaudière réelle a dû être abandonné pour des raisons d'ordre économique propres au bassin intéressé.

4.6.2. Prototype pour charbons flambants

La seconde application industrielle ayant fait l'objet d'une étude particulière concerne l'application de la chauffe au charbon pulvérisé dans des chaudières de taille moyenne (quelques dizaines de tonnes de vapeur à l'heure). Un regain d'intérêt pour la chauffe au pulvérisé dans cette catégorie de chaudières s'est manifesté en France à la suite de l'apparition sur le marché d'un broyeur sécheur de construction espagnole (Sedra), conçu de façon rustique et économique, pour des débits de l'ordre de quelques tonnes à l'heure de charbon.

Des études de prix effectuées par le service commercial des Houillères du bassin de Lorraine ont montré qu'un ensemble de chauffe au charbon comportant un broyeur Sedra représente un ensemble moins coûteux qu'une grille mécanique classique.

A la suite d'essais de ce broyeur effectués dans une cimenterie il fut décidé d'étudier et de construire un brûleur prototype adaptable au broyeur Sedra, d'une capacité de 1,6 t/h pour installation et essais dans une chaufferie du bassin de Lorraine.

Cette application particulière soulevait deux problèmes nouveaux:

- la plupart des petites et moyennes chaudières industrielles n'étant pas équipées de réchauffeurs d'air, il fallait utiliser de l'air secondaire froid;
- le fluide primaire servant au séchage dans le broyeur et au transport du charbon était réchauffé à l'entrée du broyeur par addition de fumées chaudes, et était donc constitué par un mélange appauvri en oxygène.

Une étude préalable à l'échelle du 1/6 fut entreprise sur le four pilote pour expérimenter ces conditions

de marche particulières avec un charbon à haut indice de matières volatiles (37%).

La construction de ce brûleur modèle réduit fut l'occasion d'expérimenter un nouveau dispositif de mise en rotation de l'air secondaire.

Pour s'affranchir des complications engendrées par le système cinématique d'orientation des ventelles, le nouveau dispositif comportait des ventelles fixes dont l'efficacité était modifiée au moyen d'un caisson coulissant permettant d'augmenter ou de diminuer la longueur utile des ventelles.

Le divergent en matériaux réfractaires fut remplacé par un divergent à circulation d'eau, dont l'angle d'ouverture fut fixé compte tenu des résultats antérieurs (par. 4.5.2), à 20°.

Plusieurs flammes furent essayées avec air secondaire froid, air primaire appauvri en oxygène par addition de fumées et nombre de rotation égal ou supérieur à 0,7; le débit d'air primaire, qui représentait 30% de l'air neutre pour les marches à allure nominale, fut maintenu constant pour les allures réduites, cette constance étant imposée par les conditions de marche du broyeur Sedra.

A l'allure nominale, les meilleurs résultats furent obtenus avec le nez de la buse de fluide primaire calé à mi-course, c'est-à-dire à égale distance du col du divergent et de la paroi intérieure de la façade avant.

On a pu réaliser des marches à allure réduite jusqu'à la moitié de la puissance nominale sans compromettre la stabilité de la flamme.

Dans l'ensemble, les résultats des essais sur four pilote ont confirmé qu'il n'y a aucune difficulté à réaliser des flammes stables, assurant une combustion complète, dans une gamme étendue d'allures, avec un brûleur à haute intensité de rotation alimenté en air secondaire froid et air primaire dilué, dans le cas de charbons du type flambant.

A la suite de ces résultats positifs, il avait été prévu d'étudier et de construire un brûleur prototype pour essais sur une chaudière du bassin des Houillères de Lorraine mais jusqu'ici, des difficultés matérielles ont retardé la réalisation de cette dernière étape de l'étude.

4.7. Résumé et conclusions

Pour procéder à une étude complète des brûleurs à turbulence, à haute intensité de rotation, les équipements du Cerchar ont été complétés par un foyer à charbon pulvérisé expérimental d'une capacité de l'ordre de 50 kg/h de charbon, dit « four pilote ».

L'étude dans ce foyer de flammes réelles a été précédée d'études préliminaires, de caractère aérodynamique, conduites en deux étapes:

- Des essais au banc, avec fluides primaire et secondaire froids, ont permis de mettre au point les dispositifs technologiques les mieux adaptés à la création des types d'écoulement recherchés, et de procéder à une première étude de l'influence de l'intensité de rotation (nombre de rotation) sur la configuration de ces écoulements.

Sur la base des résultats obtenus, un brûleur expérimental a été construit et essayé de façon d'abord qualitative sur le four pilote.

- Pour préciser les possibilités aérodynamiques de ce brûleur, une étude complète des écoulements à haute intensité de turbulence a été effectuée dans le four pilote, en utilisant des fluides primaire et secondaire préchauffés à leur température réelle d'utilisation. Par cette méthode, dite des essais « à blanc », on a pu sélectionner les paramètres qui, du point de vue aérodynamique, jouent le rôle le plus important (angle d'ouverture du divergent, position du nez de la buse primaire), et déterminer les valeurs de ces paramètres correspondant aux différents types d'écoulements observés (écoulements à noyau de recirculation plein, écoulements à noyau de recirculation plus ou moins pénétré par le jet primaire).

Ce n'est qu'après ces études préliminaires très complètes qu'on a procédé dans le four pilote à l'étude d'une série de flammes réelles correspondant aux différents types d'écoulements à haute intensité de rotation obtenus précédemment.

Les essais furent effectués avec un charbon maigre à 16% de cendres. Ils montrèrent que dans les flammes à haute intensité de rotation, les particules solides ne suivent pas la trajectoire du fluide gazeux porteur et que, par conséquent, il n'y a pas concordance entre le champ aérodynamique et le champ de concentration en combustible. La rapidité de l'inflammation et la qualité de la combustion dépendent de la superposition plus ou moins favorable de ces deux champs. Les flammes les plus stables étaient caractérisées par un noyau central à fort débit de recirculation, bien développé autour de l'axe, et une forte concentration de charbon dans ce noyau au voisinage du brûleur. Ces conditions étaient réalisées avec une large ouverture de l'angle du divergent (33°) et le « nez » de la buse d'air primaire à l'aplomb du col du divergent.

Utilisant les connaissances générales ainsi acquises, on a abordé l'étude de deux applications pratiques:

L'une concernait un prototype de brûleur pour charbons maigres, destiné à permettre la combustion de ce type de charbon dans des chaudières de centrales thermiques primitivement conçues pour brûler des charbons gras.

L'autre concernait un brûleur pour charbons flam-bants devant équiper des chaudières industrielles de petite et moyenne puissance.

Dans les deux cas, les conditions réelles d'exploita-tion des brûleurs ont conduit à réaliser au préalable un modèle et à l'essayer sur le four pilote. On a ainsi pu vérifier:

- Qu'il est possible de réaliser des flammes turbu-lentes à haute intensité de rotation, avec les

débits d'air primaire relativement élevés, et les pressions d'air secondaire faibles qui étaient imposées par le premier cas.

- Que l'inflammation et la combustion du charbon flambant peuvent être assurées de façon très satisfaisante avec de l'air secondaire froid et de l'air primaire appauvri en oxygène, conditions imposées par le second cas.

En dépit de ces résultats positifs, l'étude et la cons-truction du premier prototype ont dû être abandon-nées pour des raisons de caractère conjoncturel; quant au second, des difficultés matérielles ont re-tardé jusqu'ici cette ultime étape de la recherche.

BIBLIOGRAPHIE

1. DUMOUTET P. et DESSEINE J.: La formation des mâchefers sur grille. 6^{es} Journées Internationales de l'IFCE, Paris, 19-23 mai 1964.
2. DUMOUTET P. et DESSEINE J.: La formation des mâchefers sur grille. Document intérieur Cerchar, septembre 1964, n° 1489.
3. DUMOUTET P. et DESSEINE J.: Étude expérimentale de l'inflammation et de la combustion du charbon sur grille. Revue Générale de Thermique, 1963, n° 16 (avril).
4. DESSEINE J.: Essais de divers combustibles agglutinants sur une grille expérimentale. Document intérieur Cerchar, août 1965, n° 1584.
5. CHAUVIN R.: et TISSANDIER G.: Recherches et essais sur la combustion des charbons pulvérisés maigres. Bulletin d'information des Centrales Électriques. Janvier 1962, n° 35.
6. LOISON R.: Études sur la combustion des charbons pulvérisés maigres dans les centrales. Revue de l'Industrie Minérale. Avril 1964.
7. LOISON R. et CHAUVIN R.: Mécanisme de l'inflammation des poussières. Revue de l'Industrie Minérale. Décembre 1963.
8. CHAUVIN R., LOISON R. et TISSANDIER G.: L'inflammation des poussières de charbon. 6^{es} Journées Internationales de l'IFCE, Paris, 19-23 mai 1964.
9. LOISON R. et CHAUVIN R.: Pyrolyse rapide du charbon. Chimie et Industrie. 91, 1964, n° 3 (mars).
10. CHAUVIN R.: Étude comparative de la pyrolyse sous azote et de l'inflammation dans l'air de fines particules de charbons de différents rangs. 7^e Conférence Internationale sur la Science du charbon, Prague, 10-14 juin 1968.
11. CHAUVIN R.: Mesure de la réactivité des combustibles solides par la méthode du point de croisement. Revue Générale de Thermique, n° 26, 1964 (février).
12. DESSEINE J. et MULLER G.: Étude mathématique des flammes de charbon maigre pulvérisé. Revue Générale de Thermique, (1969), n° 85, (janvier).
13. BEER J.M. et LEE K.B.: The effect of the residence time distribution on the performance and efficiency of combustion. 10^e Symposium (International) on Combustion, Cambridge, England, 17-21 août 1964.
14. MOINARD J. et TISSANDIER G.: Essais sur modèles appliqués à la combustion du charbon pulvérisé. 6^e Journées Internationales de l'IFCE, Paris, 19-23 mai 1964.
15. DUQUESNE P.: Essais sur modèles appliqués aux chaudières de 400 t/h de la Centrale de Courrières. Bulletin d'Information des Centrales Électriques, (1964), n° 44.
16. CERCHAR: Recherches sur la combustion du charbon. Rapport technique final pour la période du 1^{er} janvier 1964 au 31 mars 1968.
17. CURTET R.: Sur l'écoulement d'un jet entre parois. Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air, Paris, (1960), n° 359.
18. CERCHAR: Recherches sur la combustion du charbon. Rapport technique final pour la période du 1^{er} avril 1968 au 31 mars 1970.
19. DUMOUTET P.: Utilisation des combustibles solides. Techniques de l'Ingénieur, Paris, (1965).

Tableau I
ESSAIS EN POT-FOYER — PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES COMBUSTIBLES UTILISÉS

Type de combustibles		Unités	Anthracites			Charbons maigres					Cokes		Flam- bant sec	Charbons maigres		
Repères			A ₁	A ₂	A ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	C ₁	C ₂	F ₁	M ₆	M ₇	
Cendres sur sec		%	8,4	6,1	6,4	6,2	5,1	6,1	8	9	9,8	9,3	7,9	6,2	4,1	
Matières volatiles sur sec		%	2,8	2,4	3,7	9,3	8,2	6,95	9,1	9	1,4	6,3	42,2	7,7	6,8	
Pouvoir calorifique supérieur		mth/kg	7 460	7 690	7 740	8 105	8 095	8 055	7 890	7 785	7 180	7 305	6 840	8 110	8 330	
Fusibilité des cendres (méthode SNCF)	atmosphère réductrice	Début fusion	° C	1 330	1 220	1 560	1 510	1 490	1 370	1 170	1 205	1 250	1 250	1 110	1 485	1 270
		Point de fusibilité	° C	1 380	1 270	1 630	1 325	1 320	1 405	1 260	1 245	1 300	1 280	1 130	1 510	1 310
		Étalement	° C	1 425	1 330	1 655	1 360	1 550	1 455	1 350	1 300	1 375	1 305	1 170	1 545	1 355
	atmosphère oxydante	Début fusion	° C	1 400	1 290	1 560	1 510	1 495	1 385	1 275	1 250	1 285	1 285	1 185	1 485	1 340
		Point de fusibilité	° C	1 440	1 330	1 635	1 540	1 530	1 410	1 310	1 280	1 335	1 320	1 220	1 510	1 370
		Étalement	° C	1 480	1 400	1 663	1 380	1 565	1 470	1 420	1 315	1 410	1 385	1 235	1 545	1 410

Tableau II**ESSAIS SUR GRILLE EXPÉRIMENTALE — CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU CHARBON
« TYPE » UTILISÉ**

Type de combustible et provenance	Unité	Maigre (Oignies)	Flambant sec (Faulquemont)	Flambant sec (Gardanne)	Flambant gras (Simon)	Gras (Carmaux)
Cendres sur sec	%	6,4	7	8,4	5,9	6,4
Matières volatiles sur sec	%	8,5	37	39,3	37,2	29
Pouvoir calorifique supérieur	mth/kg	8 090	7 230	6 800	7 580	8 005
Indice gonflement	mth/kg	0	1	0	3,5	8,5
Indice roga	mth/kg	0	15,6	0	52,4	84

Tableau III

**ESSAIS SANS VOÛTE — PRINCIPAUX RÉSULTATS POUR LE CALIBRE 6-10 mm
ET L'ÉPAISSEUR DE COUCHE 10 cm**

Débit d'air — $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ _____		750	1 000	1 500	2 000
Charbon maigre	Vitesse horizontale du front d'inflammation V_1 ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	0,36	0,43	0,57	0,64
	Durée de la combustion — T_c (h.)	1,1	0,9	0,6	0,5
	Allure de combustion spécifique πc ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	68	87	127	140
	Pouvoir gazéificateur moyen g ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ⁽¹⁾	0,081	0,080	0,074	0,064
	Pertes par imbrûlés solides i (%)	3,2	—	3,3	5,3
Charbon flambant (légèrement agglutinant)	Vitesse horizontale du front d'inflammation V_1 ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	0,33	0,40	0,50	0,50
	Durée de la combustion — T_c (h.)	1,1	0,9	0,73	0,65
	Allure de combustion spécifique πc ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	57	79	85	100
	Pouvoir gazéificateur moyen g ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ⁽¹⁾	0,072	0,064	0,052	0,045
	Pertes par imbrûlés solides i (%)	2	—	1,6	1,5
Charbon flambant (non agglutinant)	Vitesse horizontale du front d'inflammation V_2 ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	0,26	0,30	0,33	0,34
	Durée de la combustion — T_c (h.)	0,7	0,55	0,38	0,32
	Allure de combustion spécifique πc ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	90	110	150	180
	Pouvoir gazéificateur moyen g ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ⁽¹⁾	0,113	0,104	0,094	0,085
	Pertes par imbrûlés solides i (%)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

⁽¹⁾ En charbon pur, cendres exclues.

Tableau IV

**ESSAIS EN AMBIANCE FROIDE
PERTES PAR IMBRÛLÉS SOLIDES AVEC LE CHARBON MAIGRE**

Granulométrie (mm)		10-20		6-10		3-6	
Épaisseur de couche (cm)		10	6	10	6	10	6
Débit d'air ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)	750	5,3	11,2	3,2	5,5	1,7	3
	1 500	7	14	3,3	7	1	2,3
	2 000		11,2	5,3	7,8		

Tableau V

**ESSAIS SUR EXPÉRIMENTALE AVEC PAROIS CHAUDES RADIANTES
PRINCIPAUX RÉSULTATS**

Charbon	Débit d air $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	Lit de 10 cm				Lit de 15 cm ⁽¹⁾	
		T_I (h)	T_α (h)	g_c $\text{Kg} \cdot \text{Kg}^{-1}$	π_c $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	g_c $\text{Kg} \cdot \text{Kg}^{-1}$	π_c $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
Maigre (Oignies) grains	750	0,25	0,97	0,090	72		
	1 000	0,22	0,75	0,085	91		
	1 500	0,17	0,48	0,092	147		
Flambant sec (Provence) grains	750	0,30	0,47	0,155	127		
	1 000	0,25	0,35	0,155	170		
Flambant sec (Faulquement)	750	0,27	0,60	0,130	105		
	1 000	0,22	0,45	0,125	135		
	1 500	0,17	0,33	0,118	190		
Flambant gras (Simon) grains	750	0,28	0,90	0,092	73		
	1 000	0,25	0,65	0,098	104		
	1 500	0,19	0,38	0,110	176	0,106	170
	2 000 ⁽¹⁾	0,17	0,27	0,115	245	0,115	245
Gras (Carmaux) grains	750	0,22	1,20	0,068	55		
	1 000	0,18	0,83	0,073	78		
	1 500	0,15	0,58	0,071	104	0,090	132
	2 000 ⁽¹⁾	0,15	0,48	0,064	135	0,082	173
½ gras (Lourches) ⁽¹⁾ Fines 0 — 20 mm	750	0,23	0,90	0,095	78		
	1 000	0,20	0,67	0,096	105		
	1 500	0,17	0,43	0,098	160		

⁽¹⁾ Essais complémentaires.

Tableau VI

APPLICATION PRATIQUE DES ESSAIS SUR GRILLE EXPÉRIMENTALE

Nature du charbon	Conception grille et foyer				Mode de réglage de l'allure	Allure maximum réalisable		Observations
	Voûtes Arche — Registre	Retard de soufflage	Distribution air primaire	Air secondaire		Débit air primaire kg/m ² · h	Charbon brûlé kg/m ² · h	
<i>Grains maigres</i> (Oignies)	Grande voûte arrière	Important (de l'ordre de 2 mn)	— Compartimentage efficace — Alimentation <i>directe et préférentielle des compartiments médians</i>	— Faible débit (10 à 15% de l'air total) mais forte impulsion	— Réduction vitesse grille — Maintien de la longueur du feu par réduction uniforme du débit d'air sous toute la surface de grille	1 500 ⁽¹⁾	145 ⁽¹⁾	⁽¹⁾ Grains 6—10 mm
<i>Grains flambant sec</i> (Provence)	Courte voûte avant	Indifférent	— id. maigres Possibilité d'air préchauffé	— Fort débit: 35 à 45% de l'air total	— id. maigres	1 250	200	
<i>Grains flambant sec</i> (Faulquemont)	Courte voûte avant	Indifférent	— id. maigres mais conditions moins impératives	— Débit de l'ordre de 30—35% de l'air total	— id. maigres	1 750	220	
<i>Grains flambant gras</i> (Simon)	Courte voûte avant Arche refroidie	Le plus court possible	— Alimentation <i>directe et préférentielle des compartiments avant</i>	— Débit de l'ordre de 30 à 35% de l'air total	— Réduction vitesse grille — Réduction débit air dans compartiments arrière, maintien débit élevé dans compartiments avant (raccourcissement du feu)	2 500	300	
<i>Grains gras</i> (Carmaux)	Longue voûte avant	Le plus court possible	— id. flambant gras, mais <i>débit beaucoup plus important</i>	— Débit faible (10 à 15%) mais forte impulsion	— id. flambant gras	2 500 ⁽²⁾	200 ⁽²⁾	⁽²⁾ lit de 15 cm
<i>Fines 0-20 mm demi-grasses</i> (Lourches)	Voûte avant assez développée	Retard de l'ordre de 1 mn	— id. flambant gras	— Débit de l'ordre de 20 % de l'air total Forte impulsion	— id. flambant gras	1 750	180 — 190	

FIGURES

- Fig. 1 Pot-foyer ouvert à arche froide
- Fig. 2 Comparaison des températures repérées en pot-foyer et au laboratoire (atmosphère réductrice)
- Fig. 3 Comparaison des températures repérées en pot-foyer et au laboratoire (atmosphère oxydante)
- Fig. 4 Influence de la hauteur de couche sur la température maximale et les propriétés du mâchefer — Combustible M2 —
- Fig. 5 Volume spécifique et indice de bris en fonction du pourcentage en cendres d'un des constituants — Mélanges M6-M7 —
- Fig. 6 Grille expérimentale — schéma d'ensemble
- Fig. 7 Grille expérimentale — vue d'ensemble au cours d'un essai en ambiance froide
- Fig. 8 Grille expérimentale — Essais sans voûte Aspect général de la couche en combustion
- Fig. 9 Grille expérimentale — Essais sans voûte Maigre d'Oignies
- Fig. 10 Composition des gaz — Maigre d'Oignies 6-10, débit d'air: 1500 kg/m². h
- Fig. 11 Grille expérimentale — Essais avec voûte Aspect général de la couche en combustion
- Fig. 12 Four à charbon pulvérisé 12 kW
- Fig. 13 Four à charbon pulvérisé — vue d'ensemble
- Fig. 14 Inflammabilité des charbons naturels
- Fig. 15 Températures d'extinction en fonction du taux de cendres
- Fig. 16 Inflammabilités comparées des mélanges et des charbons naturels
- Fig. 17 Schéma de principe du four à loi de chauffe rapide
- Fig. 18 Rendements en goudrons en fonction de la température obtenus par pyrolyse rapide d'un maigre Oignies (2546-B) (Seuil de pyrolyse \approx 560 °C)
- Fig. 19 Comparaison des rendements en goudrons obtenus en pyrolyse rapide et en pyrolyse lente pour un charbon gras de Lens
- Fig. 20 Comparaison des rendements en goudrons obtenus en pyrolyse rapide et en pyrolyse lente sur un charbon de Faulquemont
- Fig. 21 Schéma de principe du four vertical
- Fig. 22 Pyrolyse rapide sous azote du charbon maigre d'Oignies
- Fig. 23 Pyrolyse rapide sous azote du charbon gras de Lens. Variation de la composition des gaz en fonction de la température du four
- Fig. 24 Pyrolyse rapide sous air du charbon gras de Lens. Variation de la composition des gaz en fonction de la température du four
- Fig. 25 Pyrolyse rapide sous azote et sous air du charbon maigre d'Oignies
- Fig. 26 Schéma du modèle de combustion
- Fig. 27 Cas de référence: $T_d = 1\ 650\ ^\circ\text{K}$
 $t_l = 0,20\ \text{s}$
- Fig. 28 Maquette d'Harnes, exemple de champ d'inflammation
- Fig. 29 Études préliminaires sur maquettes Brûleurs expérimentés
- Fig. 30 Schéma d'implantation des injections en façades

- Fig. 31 Essais sur maquette d'Harnes — Mars —
Avril 1966. Étude du procédé des injections
en façades
- Fig. 32 Vue d'ensemble de la maquette de four à
ciment
- Fig. 33 Installations du four pilote, de combustion
- Fig. 34 Four pilote — Vue d'ensemble du four
montrant la façade avant équipée d'un brû-
leur à turbulence (au centre) et de quatre
brûleurs à gaz de mise en température
- Fig. 35 Caractéristiques géométriques du brûleur
- Fig. 36 Flammes en rotation — Essais à blanc
Conduit d'air primaire affleurant à la sortie
de l'ouvrage
- Fig. 37 Four pilote-Résultats des mesures internes
— Isothermes
- Fig. 38 Four pilote-Résultats des mesures internes
— Courbes d'égal taux de combustible rési-
dual I_p

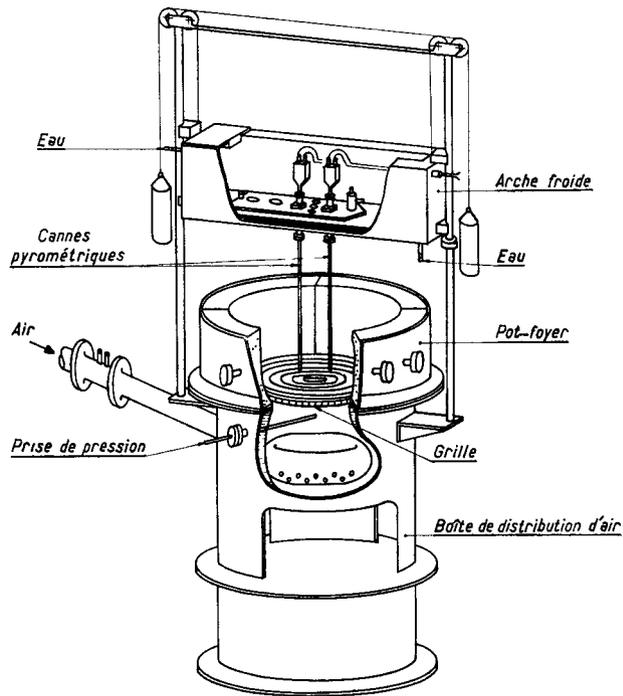


Fig. 1 — Pot-foyer ouvert à arche froide

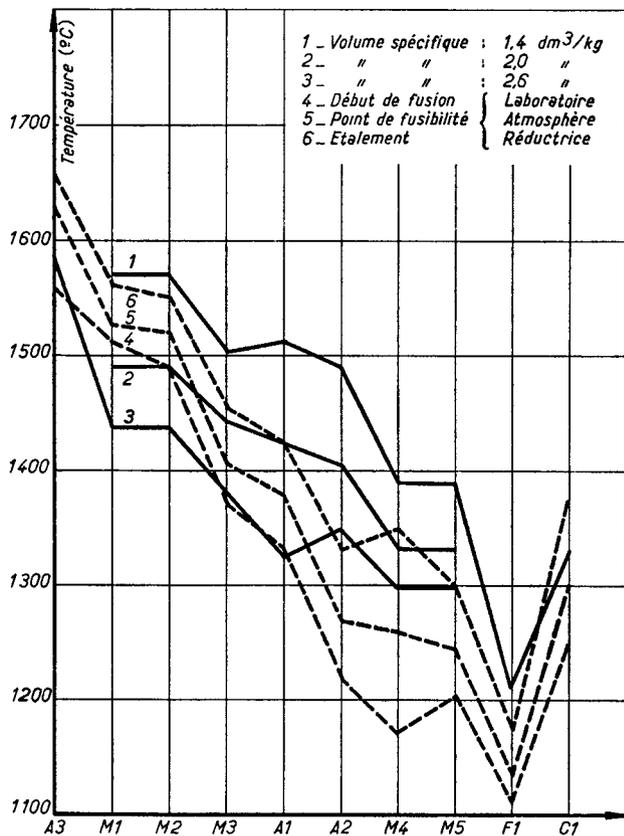


Fig. 2 — Comparaison des températures repères en pot-foyer et au laboratoire (atmosphère réductrice)

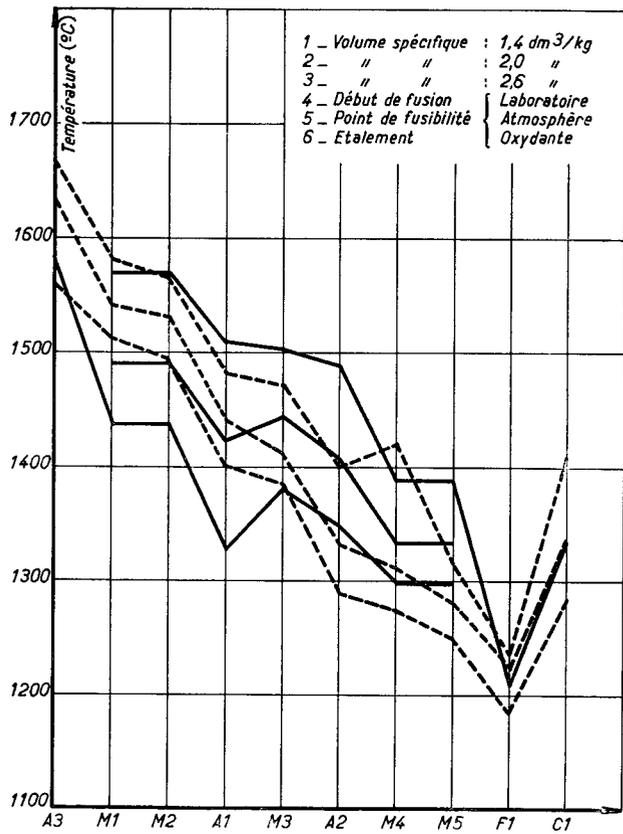


Fig. 3 — Comparaison des températures repères en pot-foyer et au laboratoire (atmosphère oxydante)

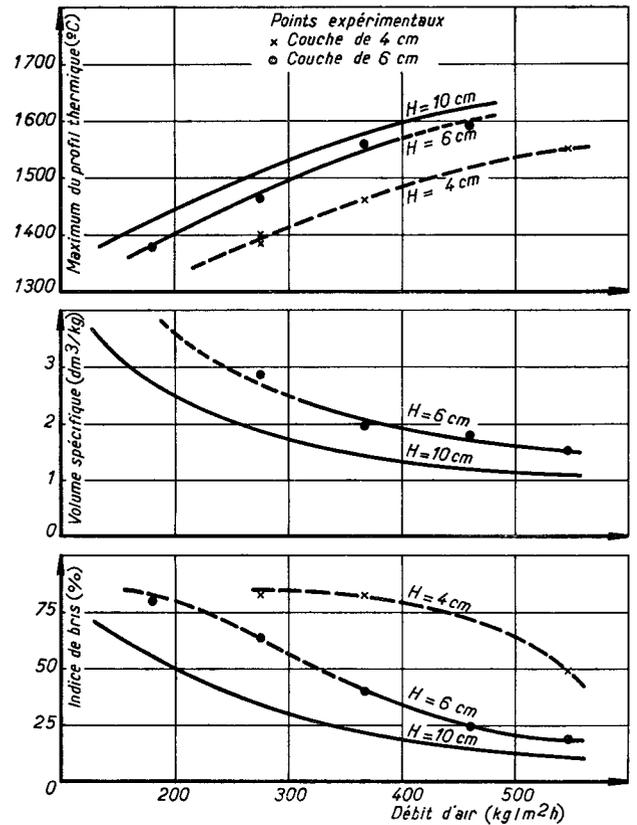


Fig. 4 — Influence de la hauteur de couche sur la température maximale et les propriétés du mâchefer Combustible M2

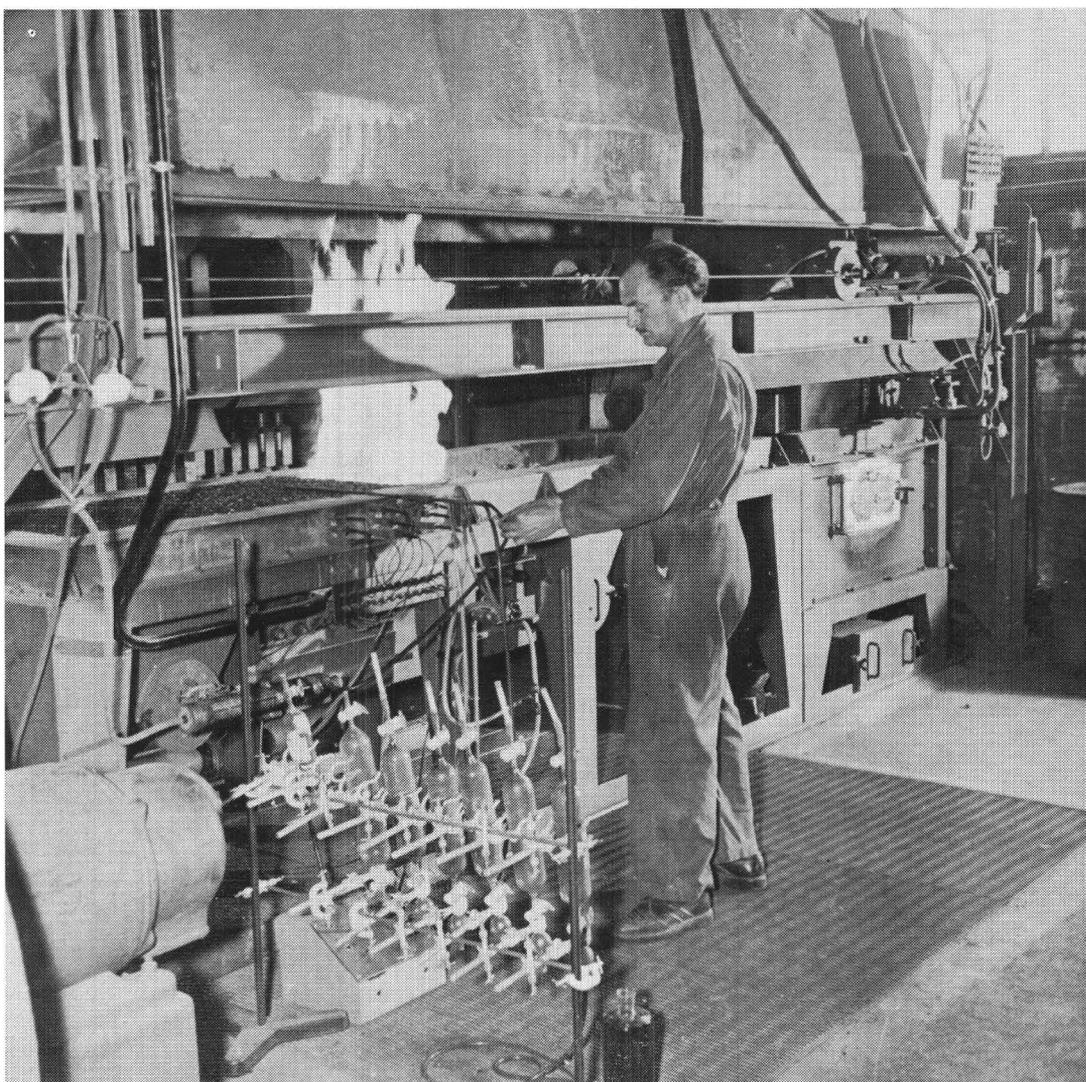


Fig. 7 — Grille expérimentale; vue d'ensemble au cours d'un essai en ambiance froide

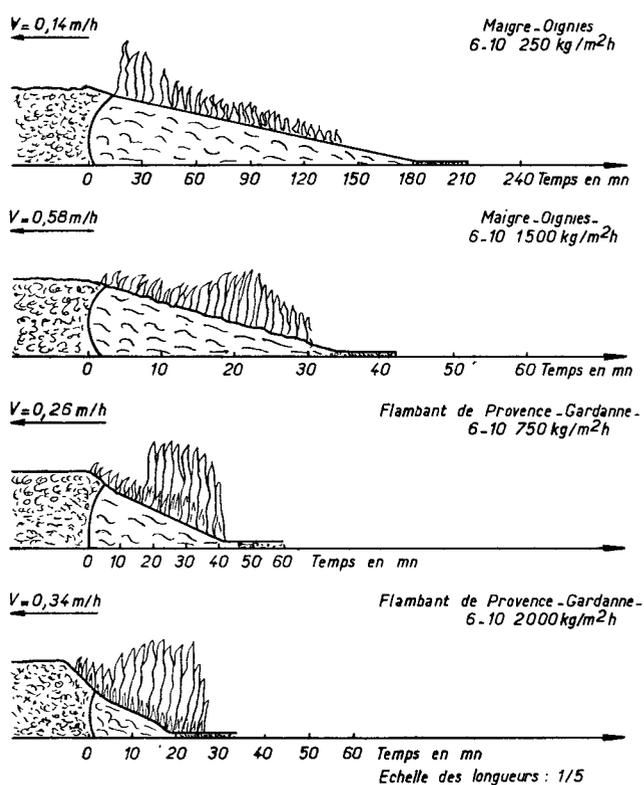


Fig. 8 — Grille expérimentale — essais sans voûte
Aspect général de la couche en combustion

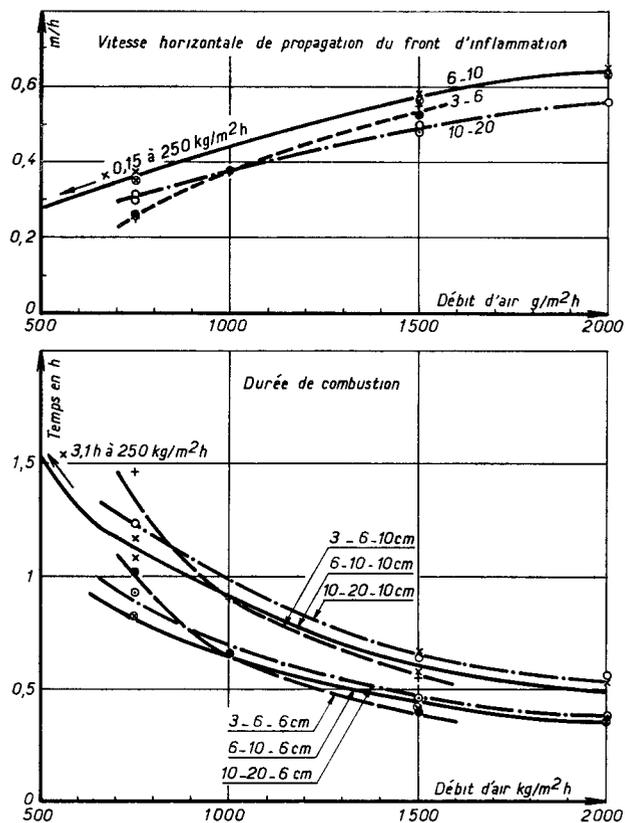


Fig. 9 — Grille expérimentale — essais sans voûte
Maigre d'Oignies

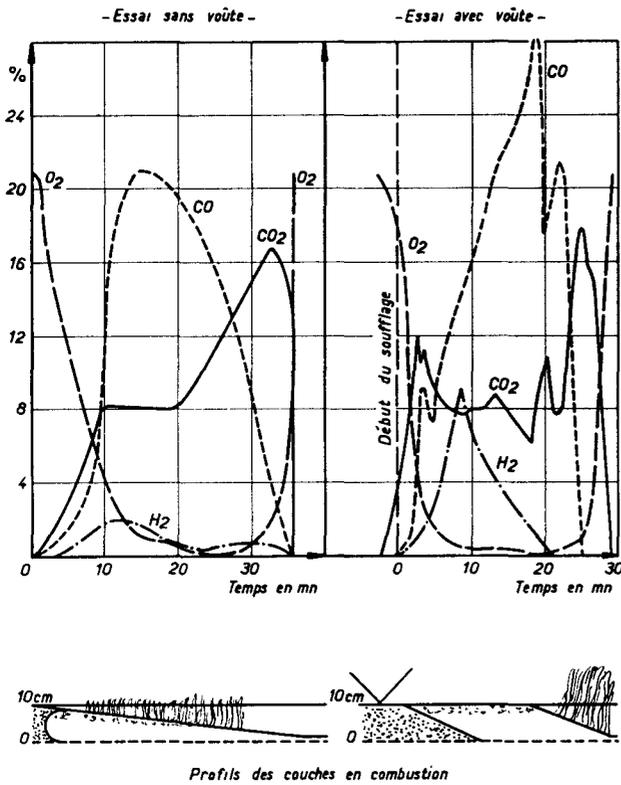


Fig. 10 — Composition des gaz — Maigre d'Oignies 6-10, débit d'air: 1500 kg/m²h

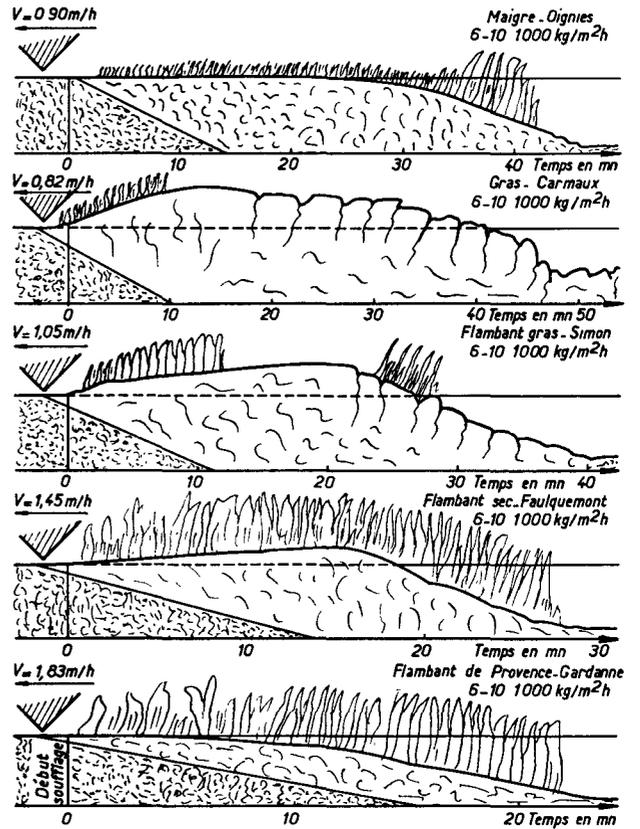
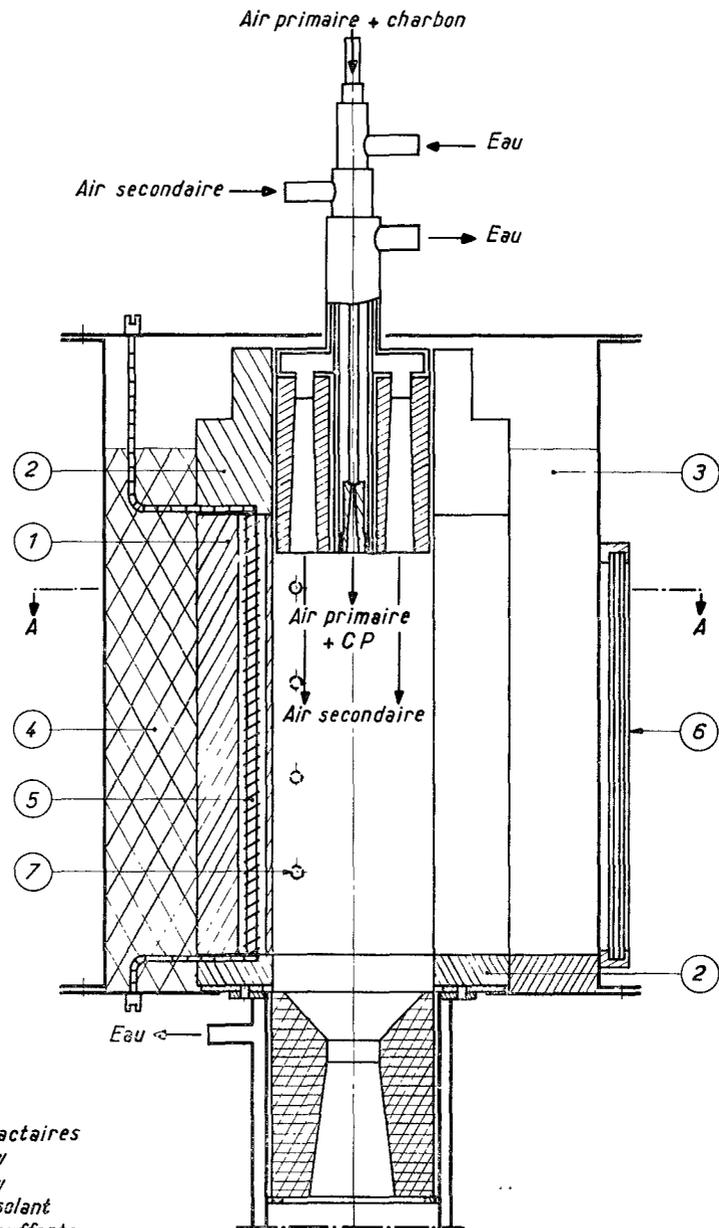


Fig. 11 — Grille expérimentale — essais avec voûte
Aspect général de la couche en combustion



- 1 - Briques réfractaires
- 2 - " "
- 3 - " "
- 4 - Garnissage isolant
- 5 - Eléments chauffants
- 6 - Fenêtre d'observation
- 7 - Couple de paroi

Coupe -A-

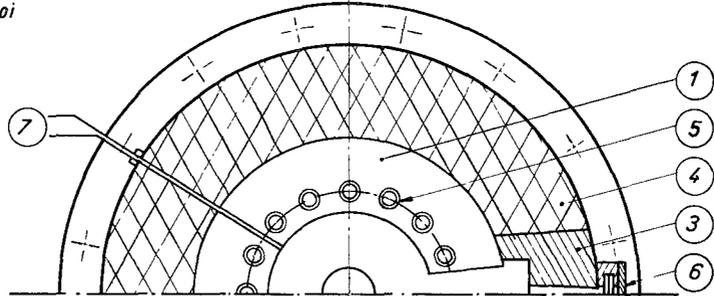


Fig. 12 — Four à charbon pulvérisé 12 kW

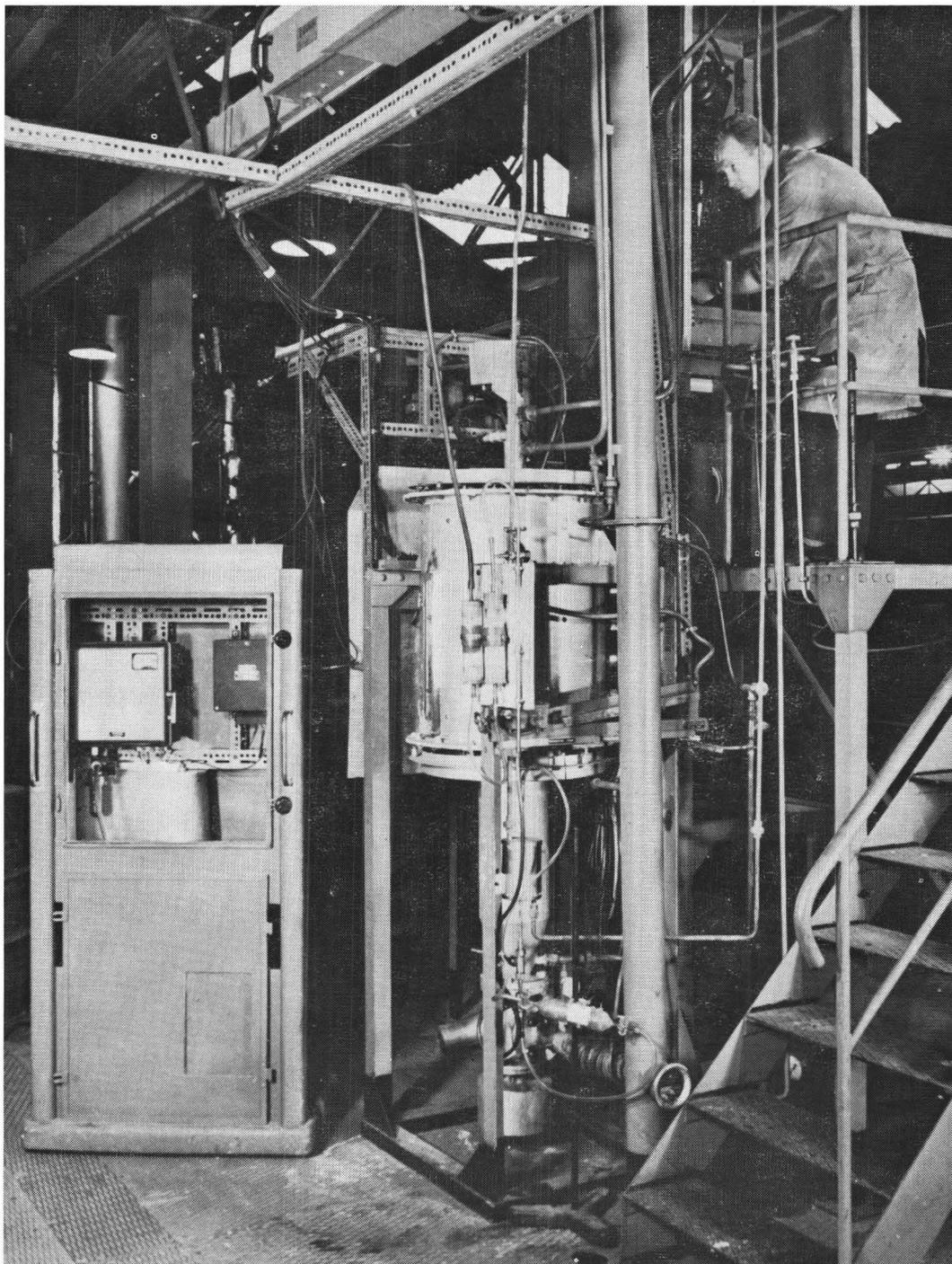


Fig. 13 — Four à charbon pulvérisé
Vue d'ensemble

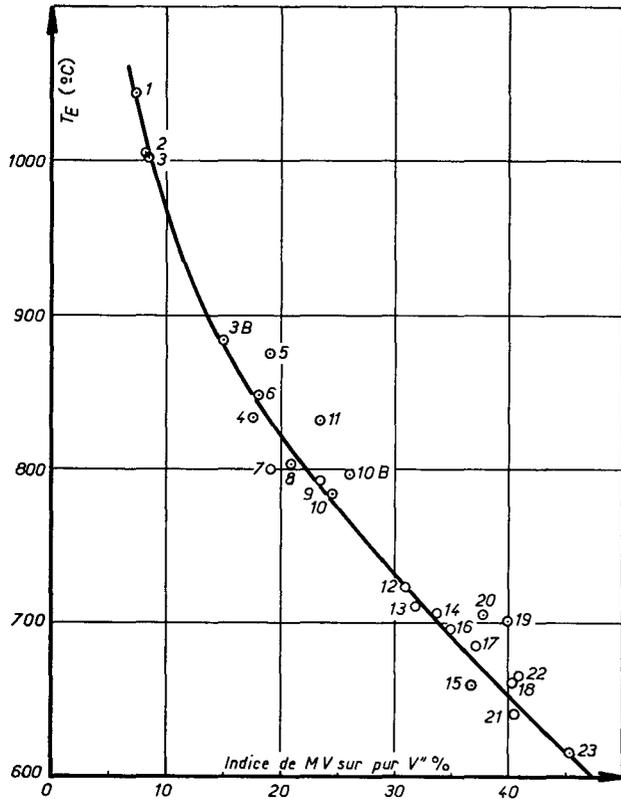


Fig. 14 — Inflammabilité des charbons naturels

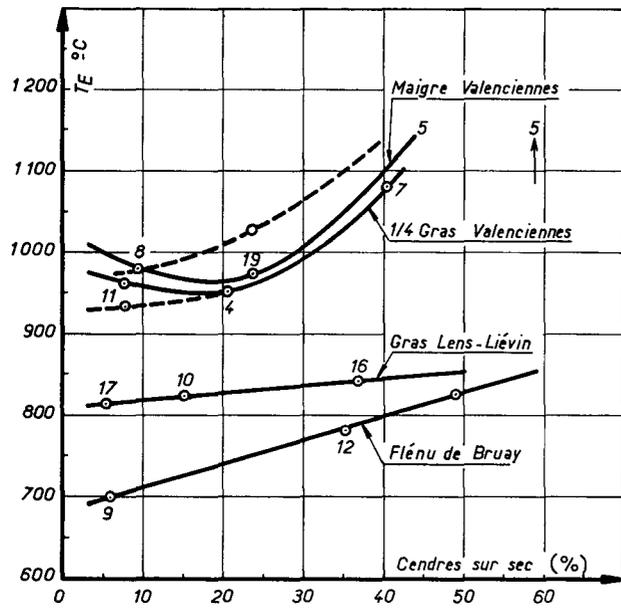


Fig. 15 — Températures d'extinction en fonction du taux de cendres

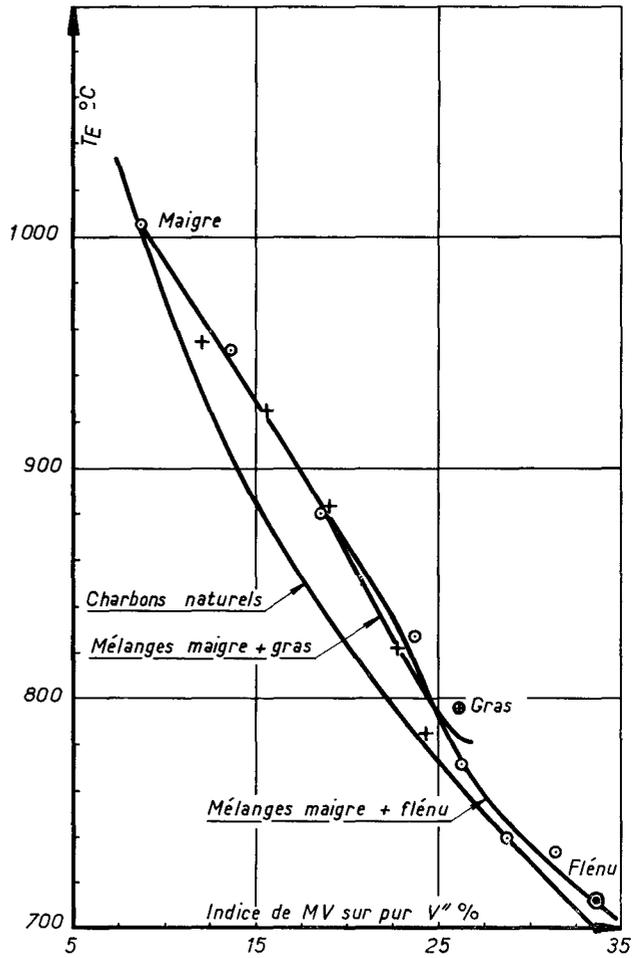


Fig. 16 — Inflammabilités comparées des mélanges et des charbons naturels

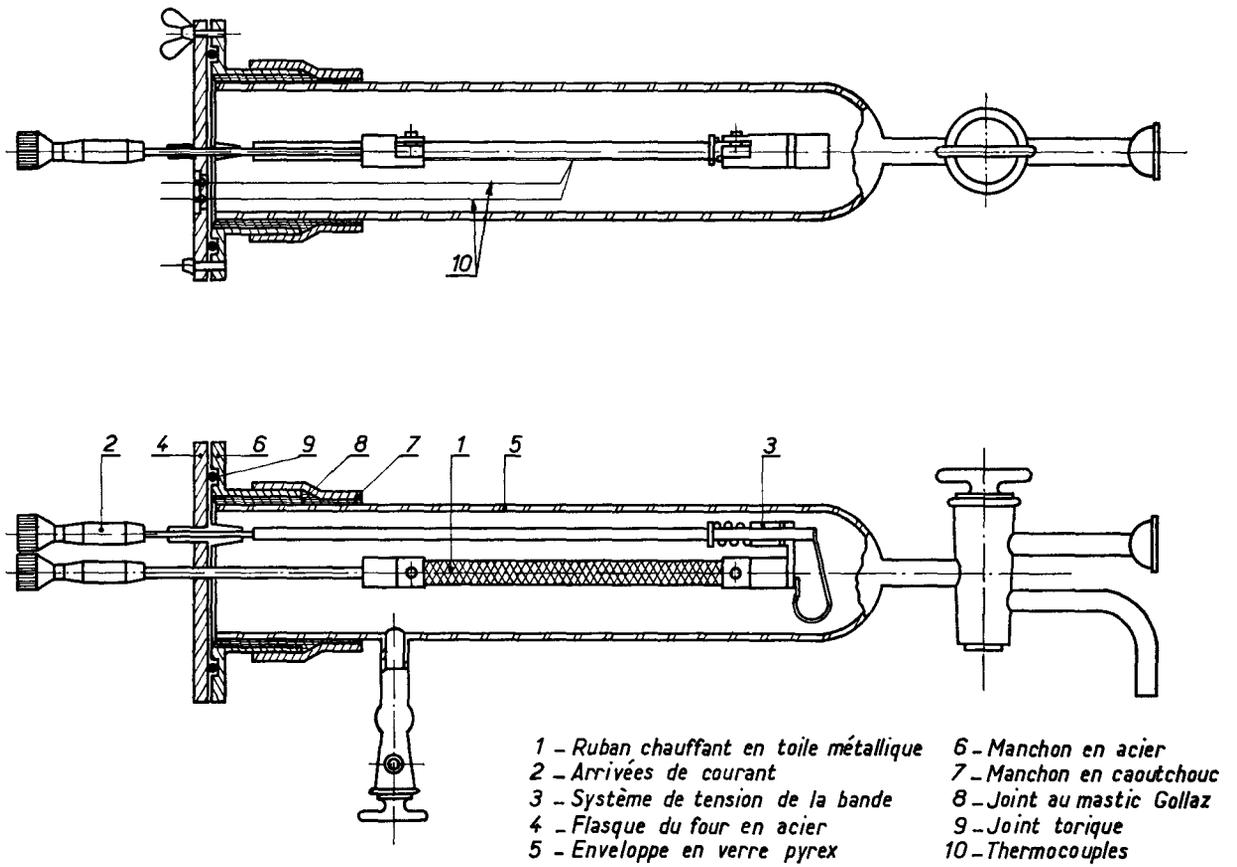


Fig. 17 — Schéma de principe du four à loi de chauffe rapide

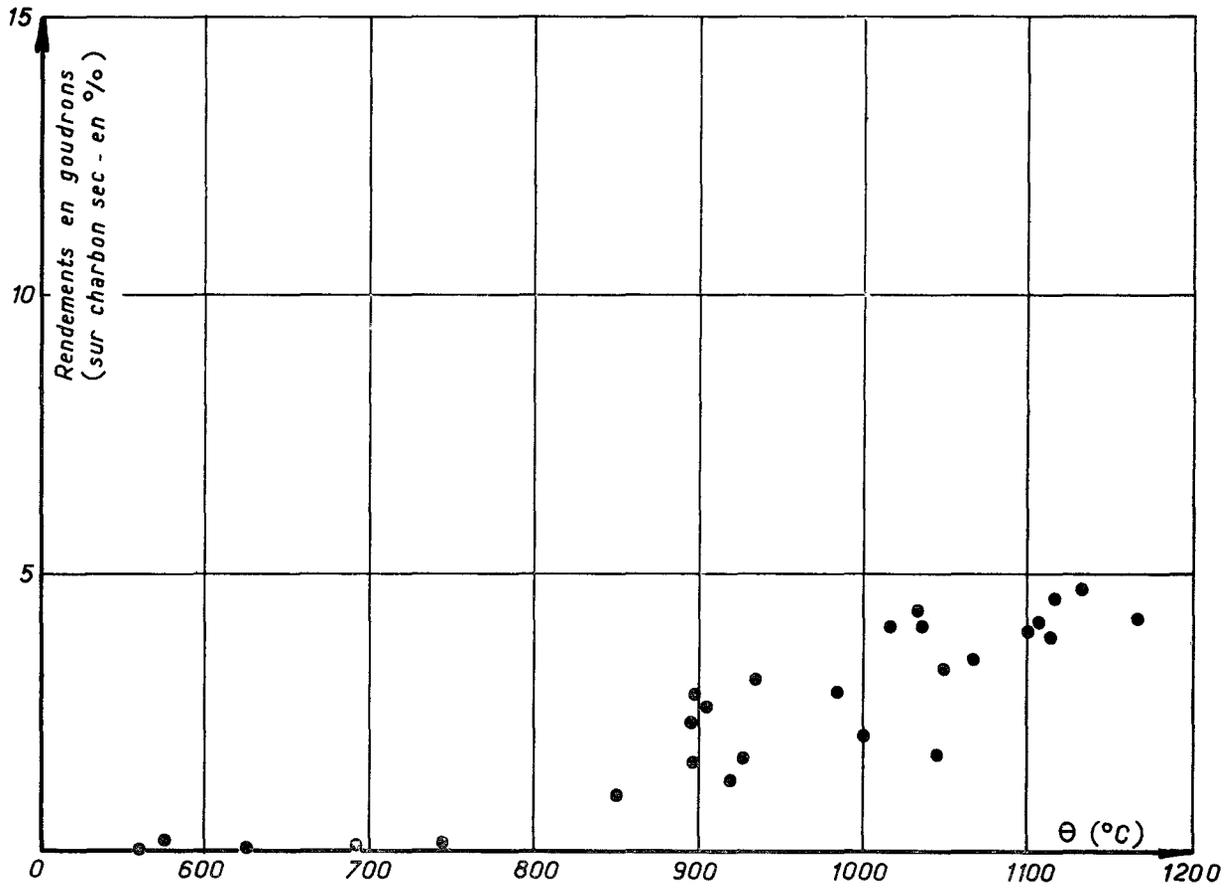


Fig. 18 — Rendements en goudrons en fonction de la température obtenus par pyrolyse rapide d'un maigre Oignies (2546-B) (seuil de pyrolyse $\approx 560^{\circ}$ C)

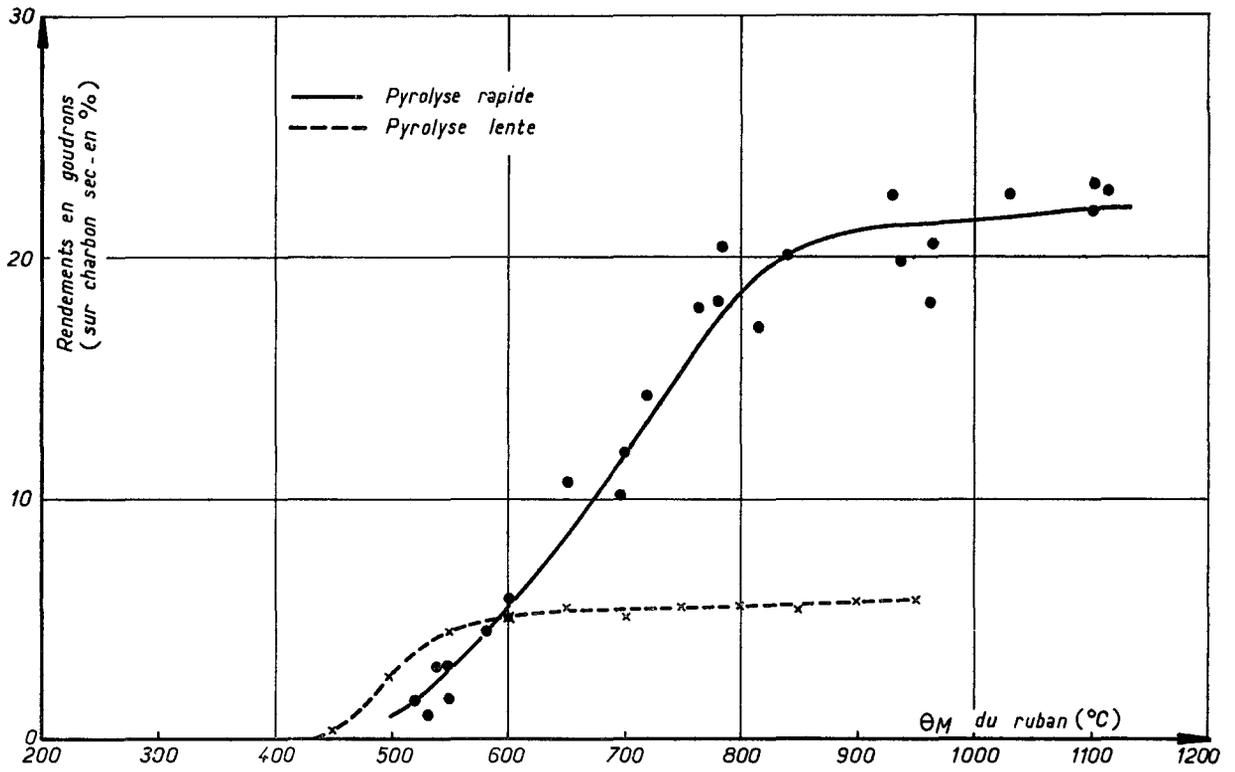


Fig. 19 — Comparaison des rendements en goudrons obtenus en pyrolyse rapide et en pyrolyse lente pour un charbon gras de Lens

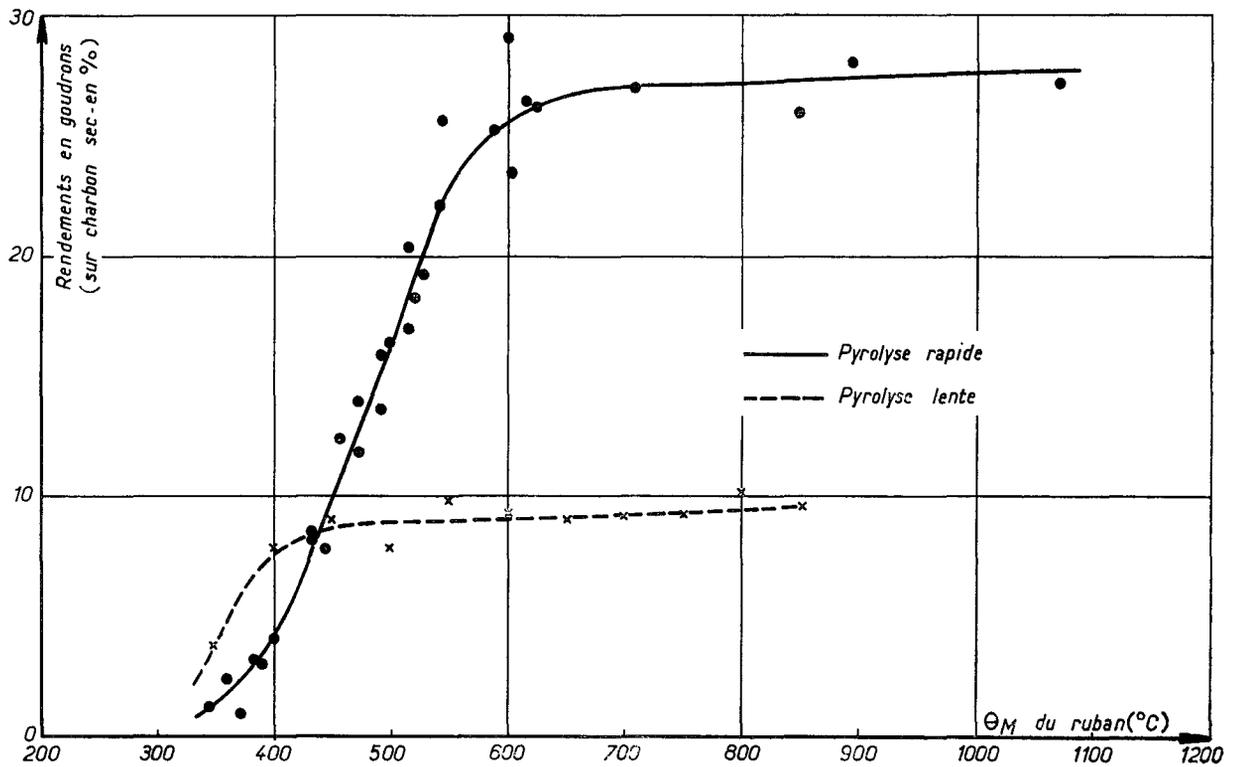


Fig. 20 — Comparaison des rendements en goudrons obtenus en pyrolyse rapide et en pyrolyse lente sur un charbon de Faulquemont

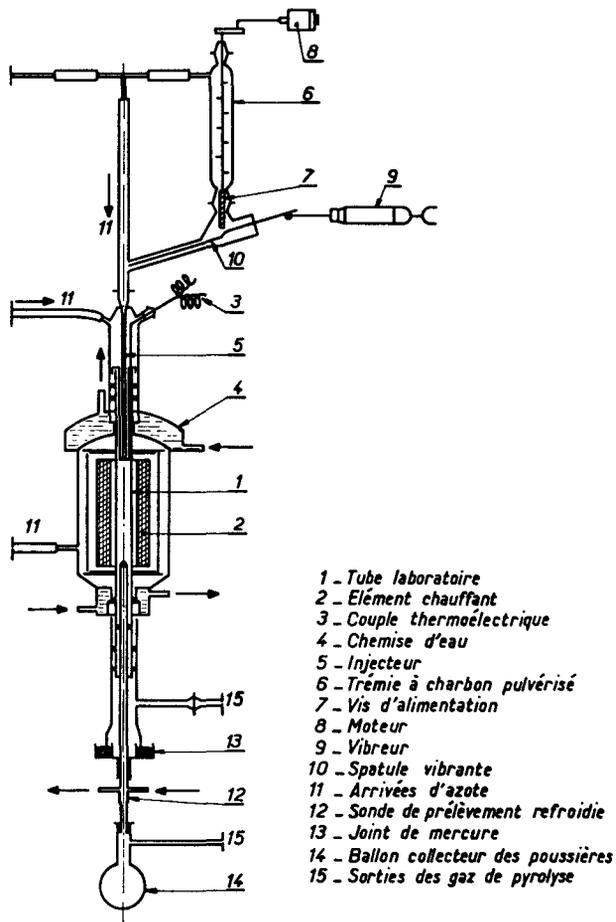


Fig. 21 — Schéma de principe du four vertical

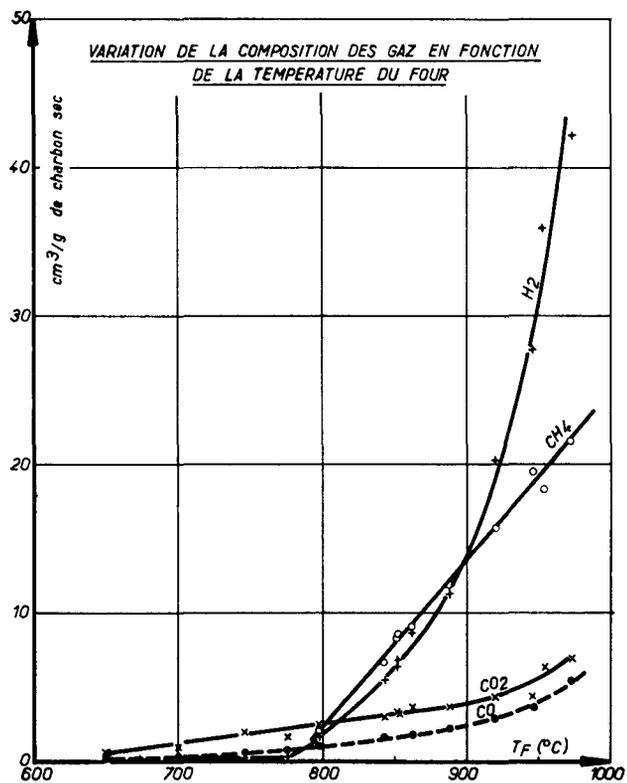


Fig. 22 — Pyrolyse rapide sous azote du charbon maigre d'Oignies

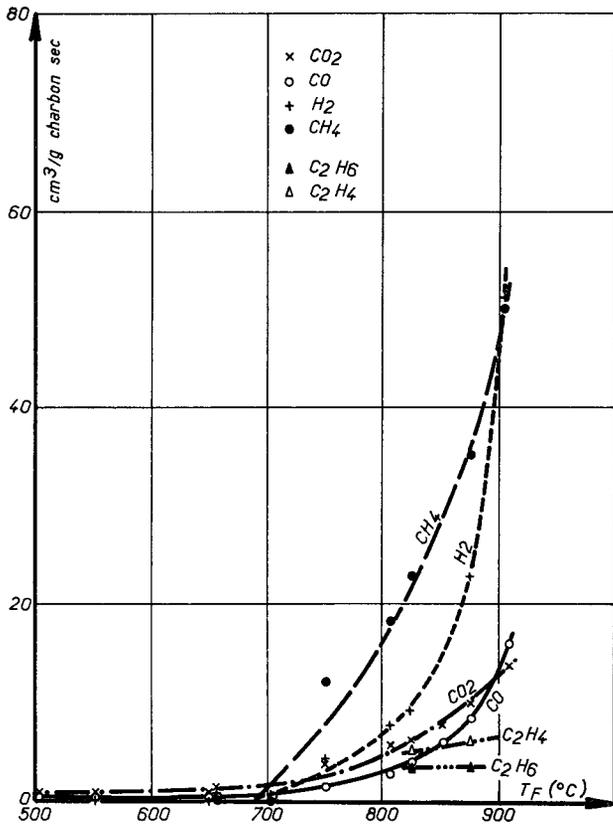


Fig. 23 — Pyrolyse rapide sous azote du charbon gras de Lens, variation de la composition de gaz en fonction de la température du four

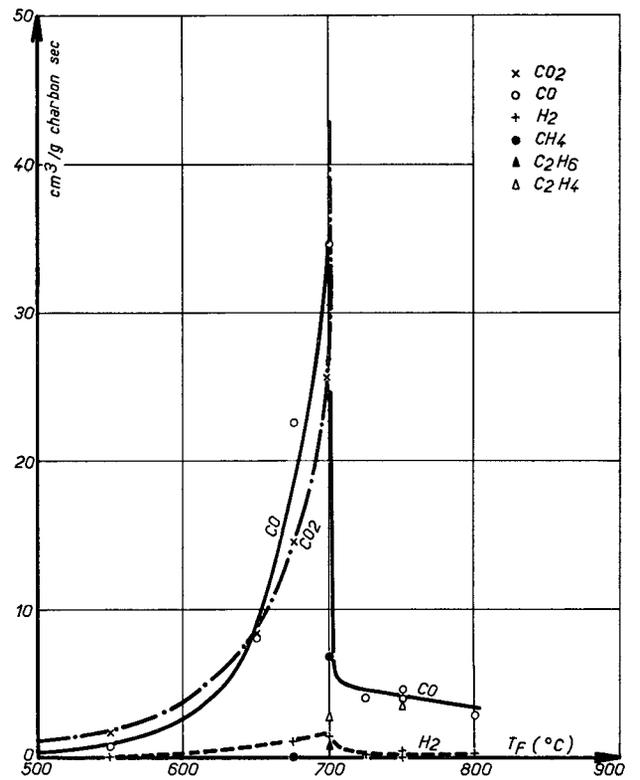


Fig. 24 — Pyrolyse rapide sous air du charbon gras de Lens, variation de la composition des gaz en fonction de la température du four

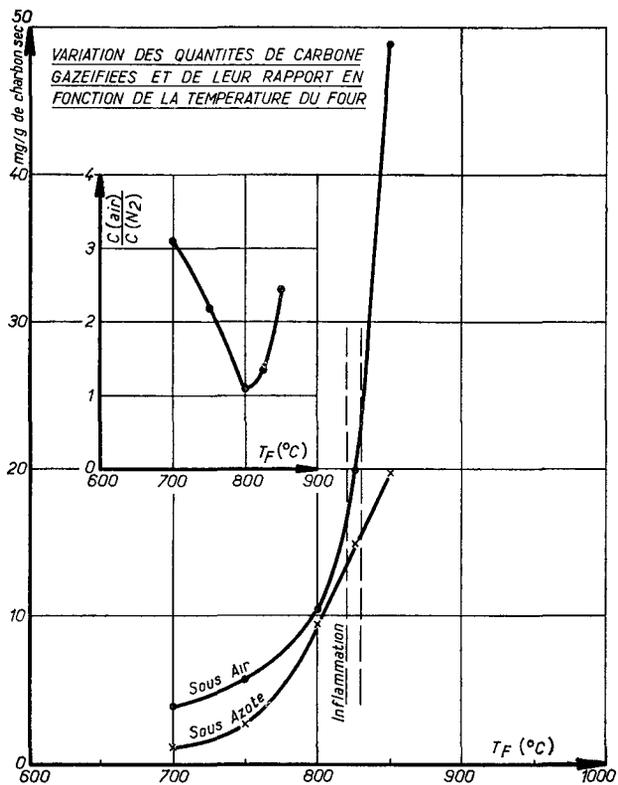


Fig. 25 — Pyrolyse rapide sous azote et sous air du charbon maigre d'Oignies

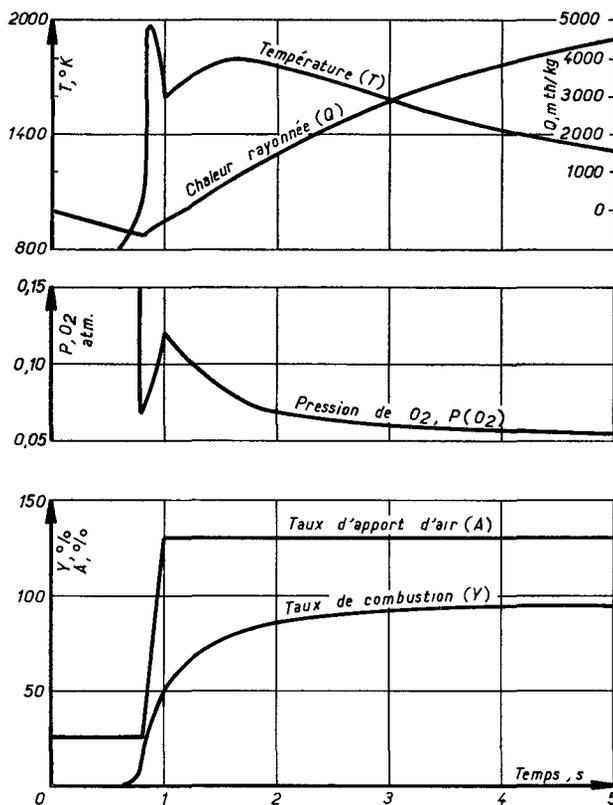


Fig. 27 — Cas de référence: $T_d = 1650 \text{ }^\circ\text{K}$
 $t_i - t_d = 0,20\text{s}$

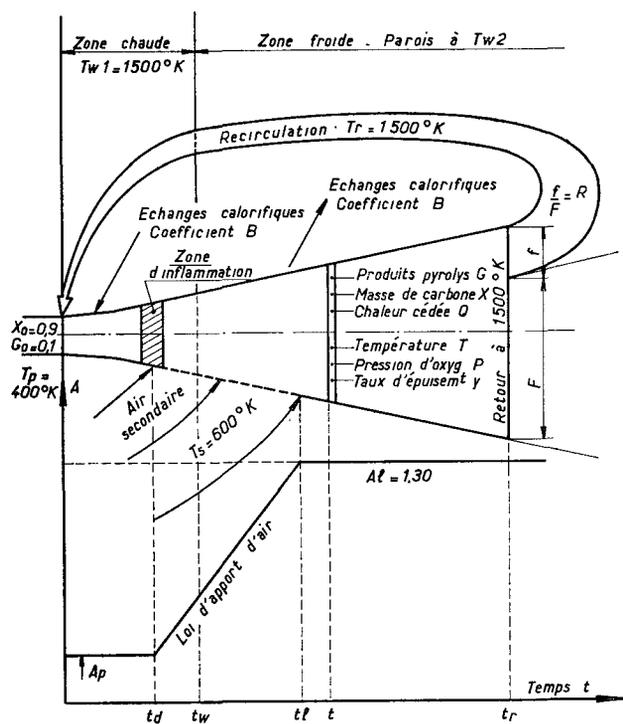


Fig. 26 — Schéma du modèle de combustion

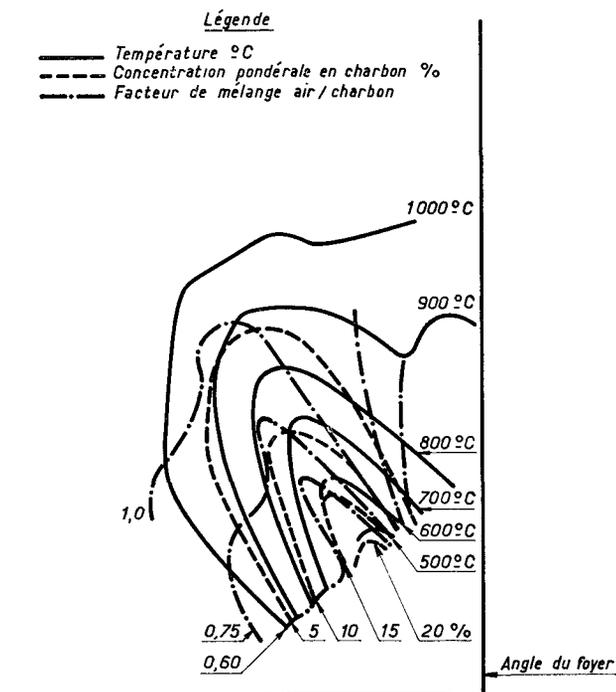


Fig. 28 — Maquette d'Harnes, exemple de champ d'inflammation

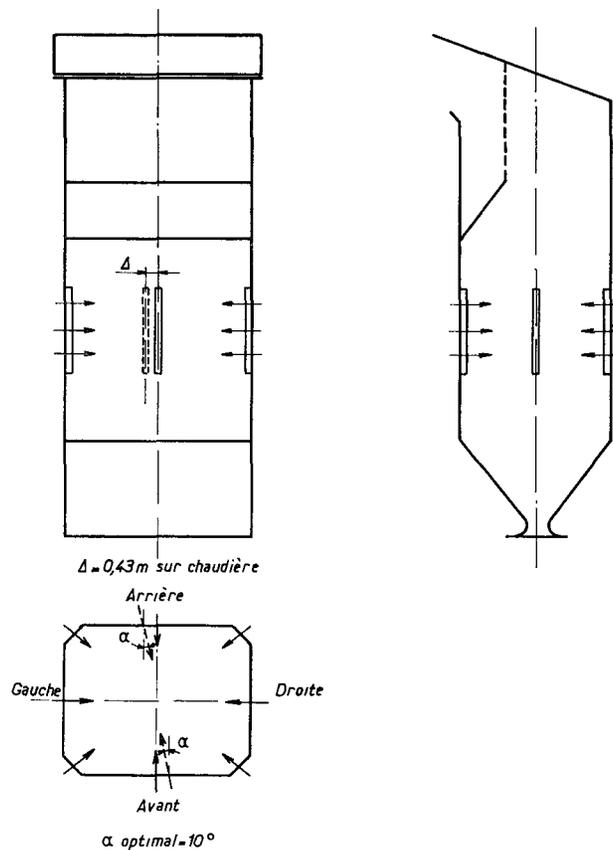
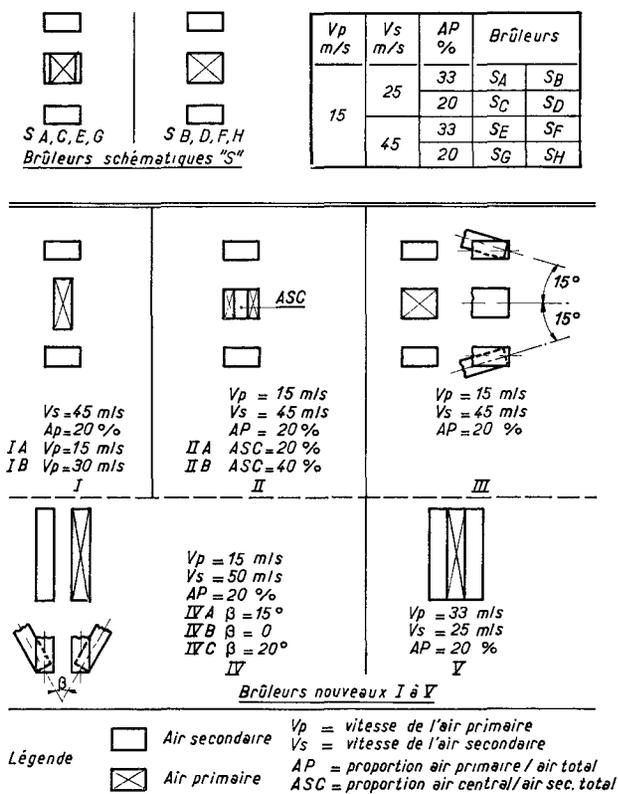


Fig. 29 — Études préliminaires sur maquettes Brûleurs expérimentés

Fig. 30 — Schéma d'implantation des injections en façades

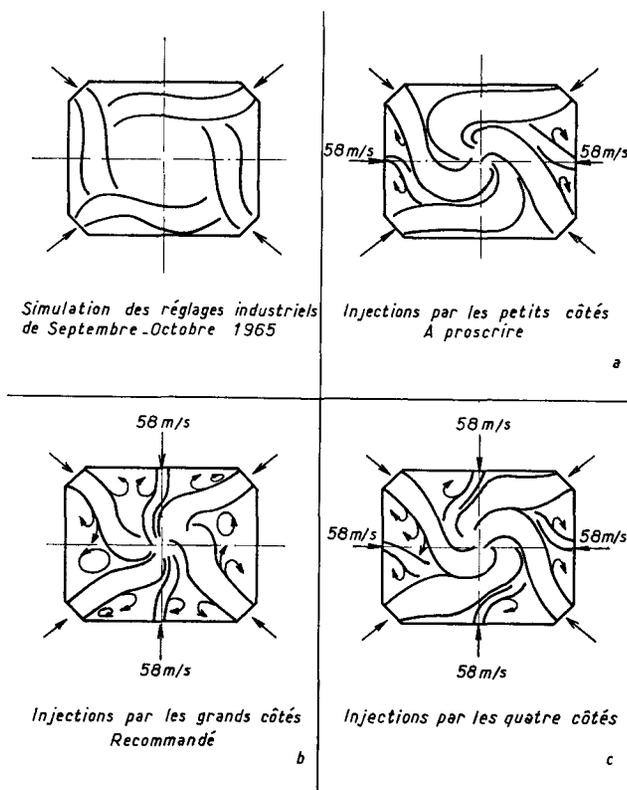


Fig. 31 — Essais sur maquette d'Harnes—mars-avril 1966 Étude du procédé des injections en façades

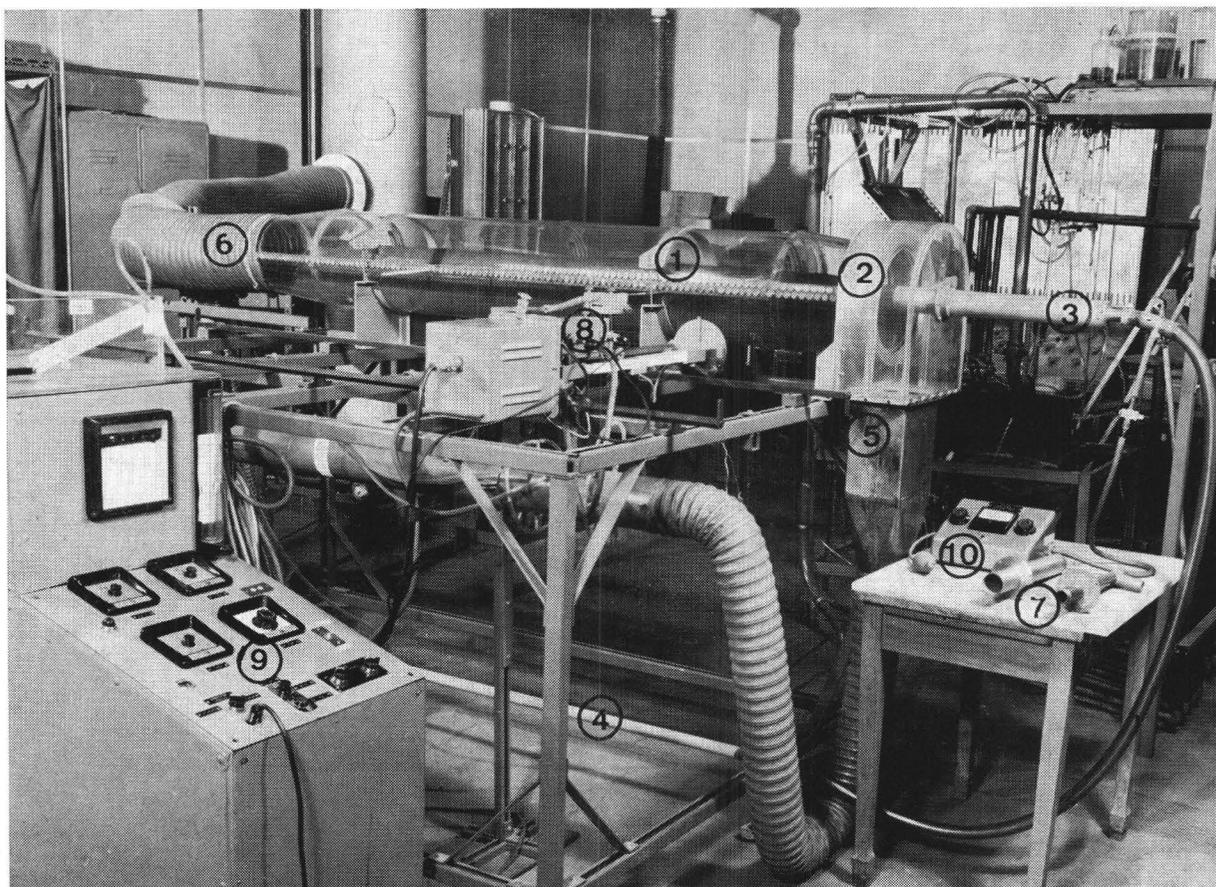


Fig. 32 — Vue d'ensemble de la maquette de four à ciment

- | | |
|-------------------------------|---|
| 1 Four | 6 Évacuation vers la cheminée |
| 2 Capot | 7 Tuyères T ₁ et T ₂ |
| 3 Tuyère | 8 Chariot porte sonde |
| 4 Arrivée du mélange primaire | 9 Minuteries réglant le déplacement du chariot et les analyses de CH ₄ |
| 5 Arrivée de l'air secondaire | 10 Grisoumètre de contrôle |

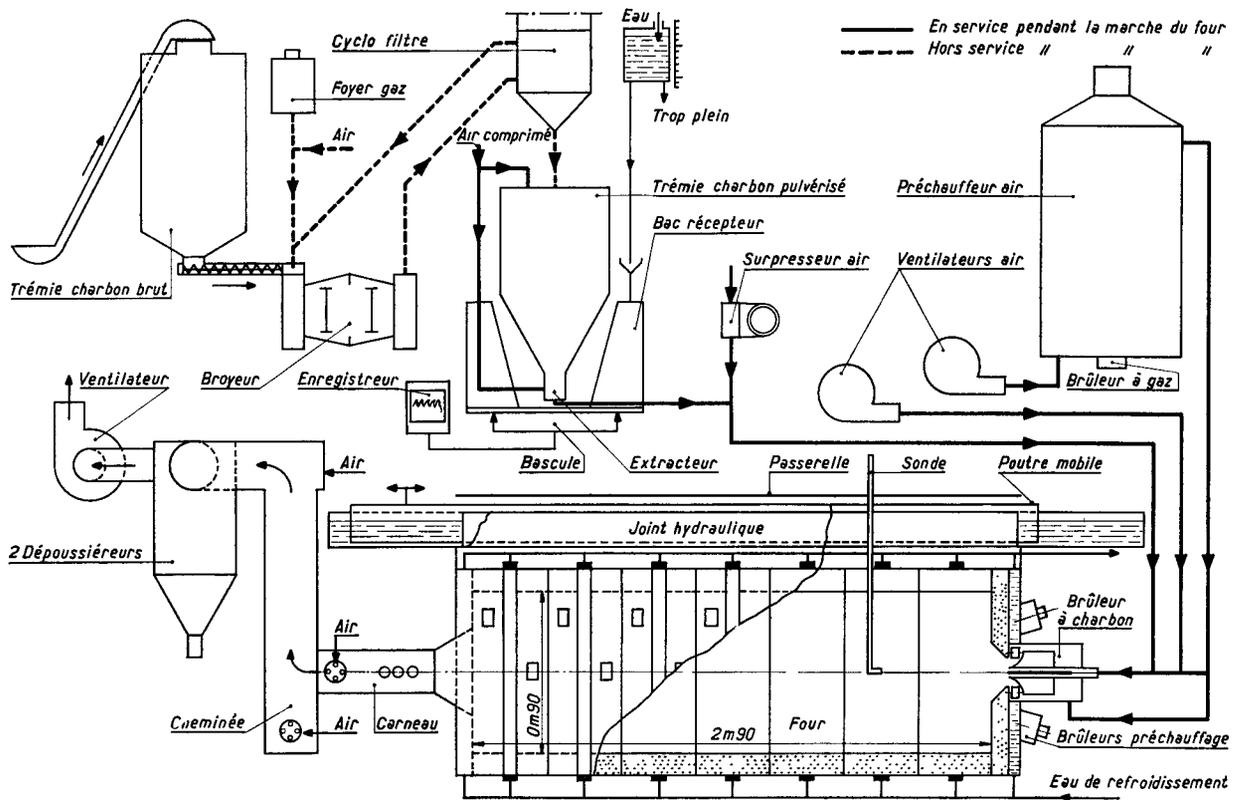


Fig. 33 — Installations du four-pilote, de combustion

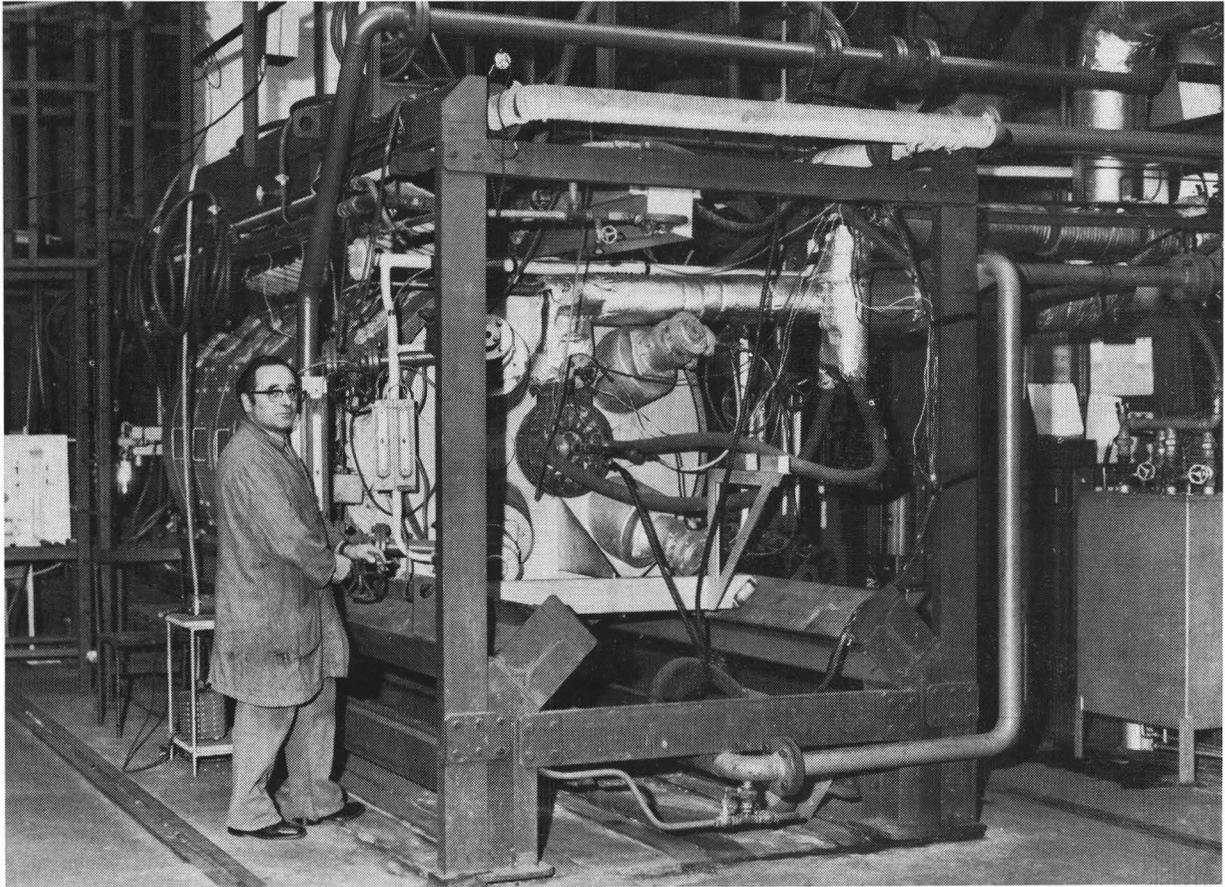
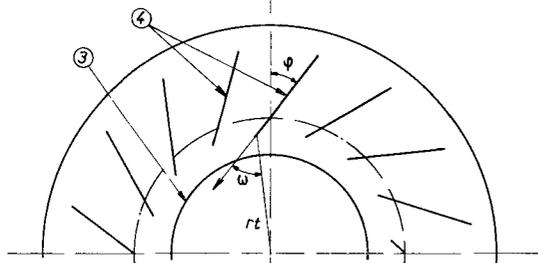
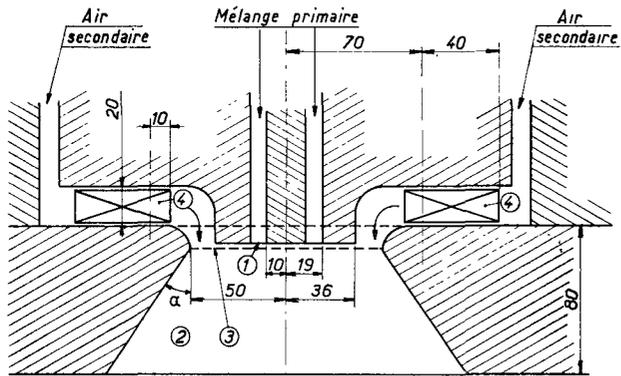


Fig. 34 — Four pilote: Vue d'ensemble du four montrant la façade avant équipée d'un brûleur à turbulence (au centre) et de quatre brûleurs à gaz de mise en température



- ① Orifice de la buse d'injection de mélange primaire (nez)
- ② Divergent
- ③ Col du divergent
- ④ Ventelles orientables

Fig. 35 — Caractéristiques géométriques du brûleur

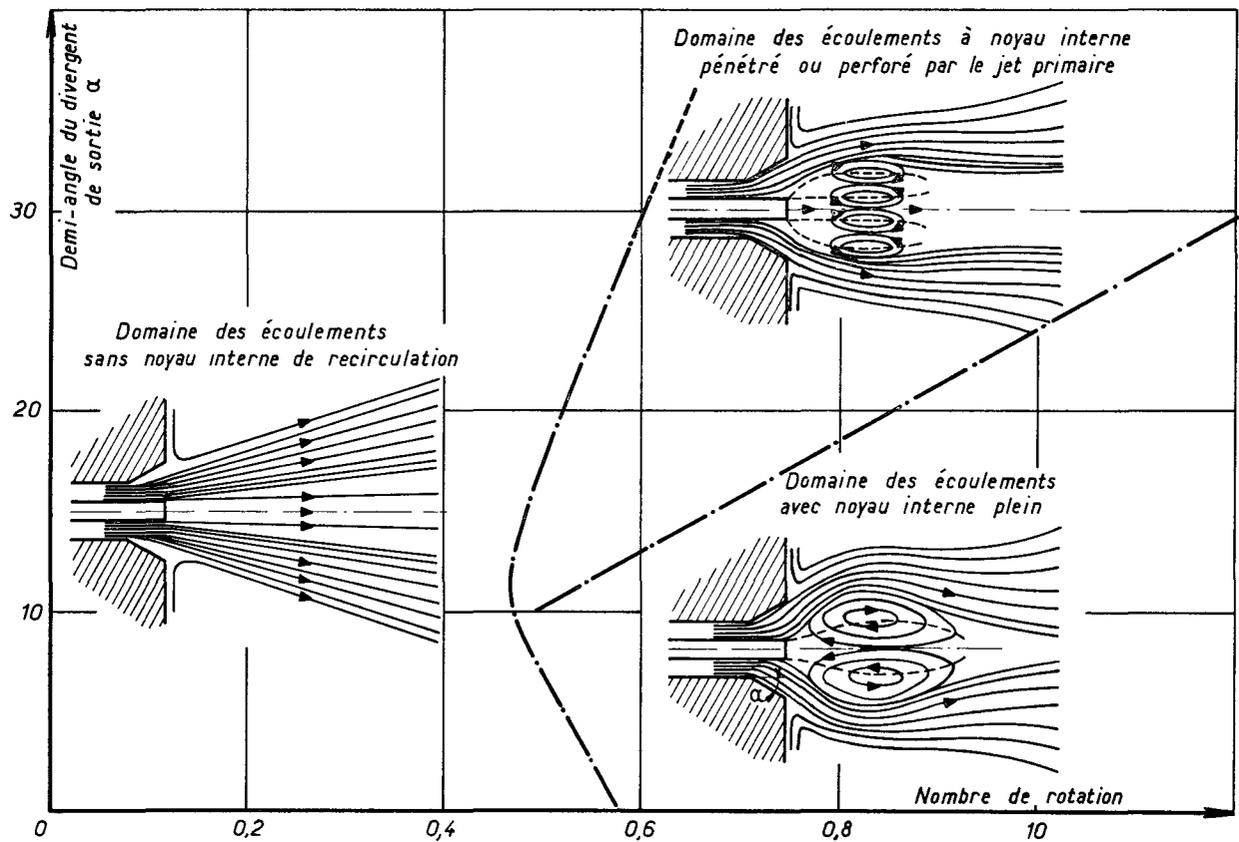
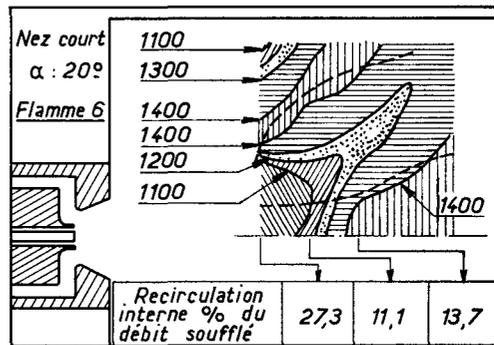
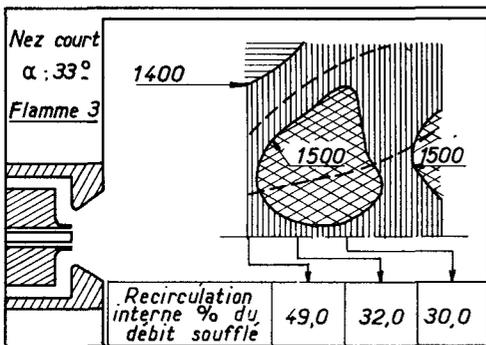
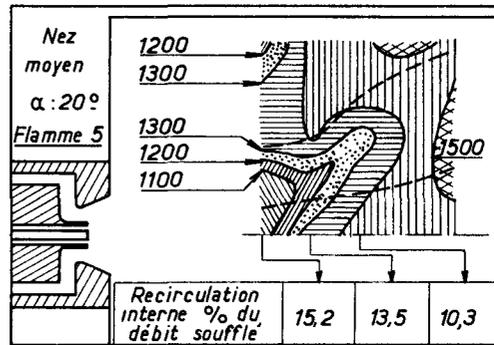
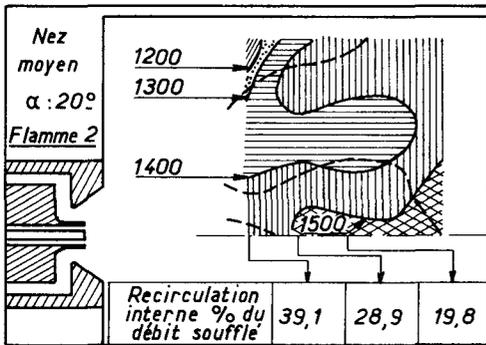
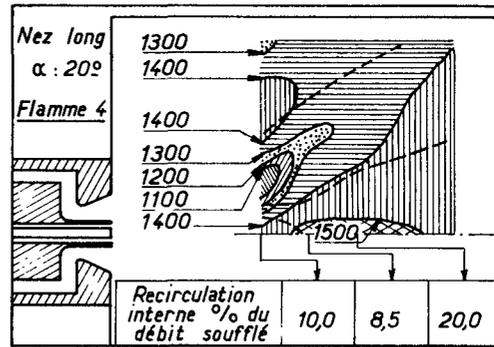
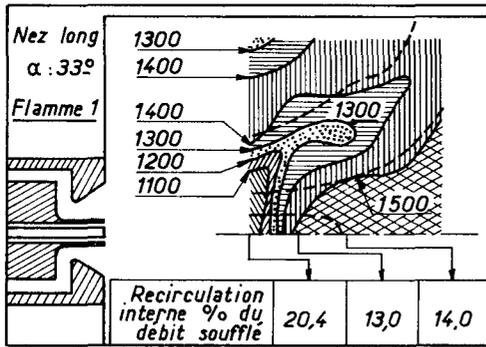


Fig. 36 — Flammes en rotation — essais à blanc conduit d'air primaire affleurant à la sortie de l'ouvrage



Les lignes de vitesse nulle sont représentées en traits interrompus

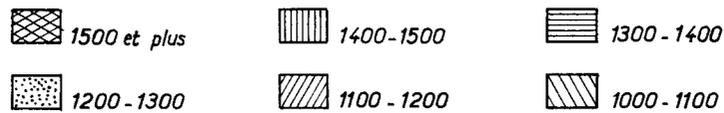
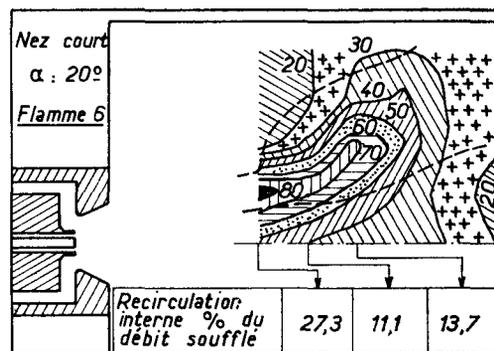
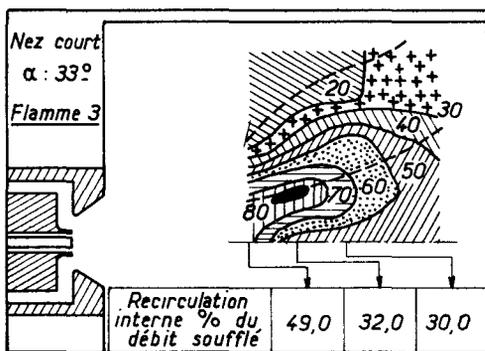
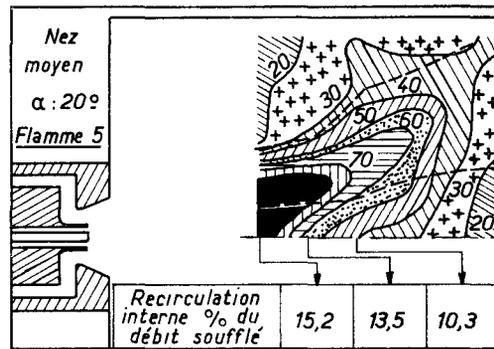
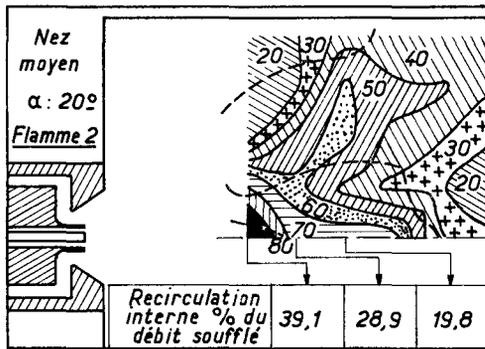
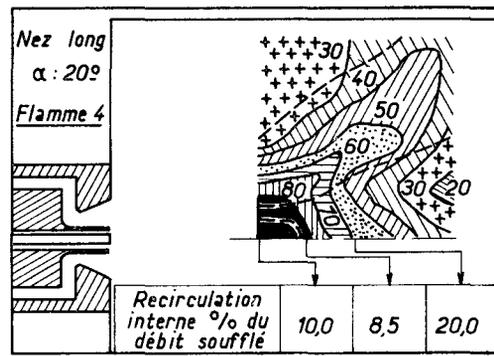
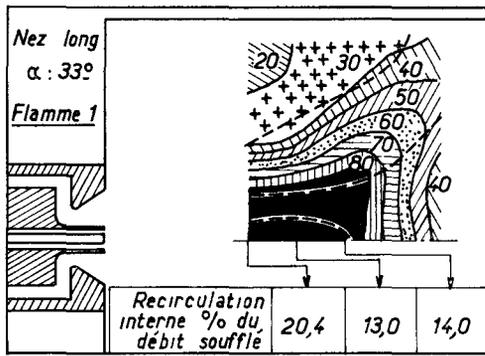


Fig 37 — Four pilote — résultats des mesures internes isothermes



Les lignes de vitesse nulle sont représentées en traits interrompus

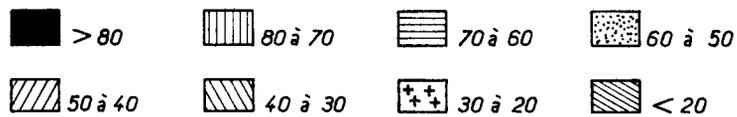


Fig. 38 — Four pilote — résultats des mesures internes courbes d'égal taux de combustible résiduel I_p

**Publications technico-économiques de la Commission
des Communautés européennes dans le domaine du charbon**

Doc. n°	Titre	Année	Langues	Prix en unités de compte
9591/1/59/1	Creusement rapide de galeries dans le rocher et dans le charbon	1959	a	2,50
6740/2/60/1	Mesures de rationalisation dans les charbonnages	1960	a, f	2,50
11848/2/66/1	Mesures de rationalisation et de modernisation dans les charbonnages des bassins de la Sarre et de la Lorraine	1966	a, f	3,00
	Le grisou et les moyens de le combattre			
13909	Deuxième journée d'information du 10 février 1967 à Luxembourg	1967	a, f	2,50
	Réunion technique de la commission de recherches charbon du 10 au 12 avril 1967 à Essen	1967	a, f	2,50
	Recueils de recherches charbon			
11466/2/66/1	N° 1 Chargement des fours à coke avec du charbon préchauffé	1966	a, f, i, n	1,50
11734/2/66/1	N° 2 Combustion du charbon	1966	a, f, i, n	1,50
11735/2/66/1	N° 3 Inflammation et combustion de charbon gras sur grille	1966	a, f, i, n	1,50
12546/2/66/1	N° 4 Mécanisation du creusement au rocher — Machine de creusement des galeries SVM 40	1966	a, f	1,50
12633/2/66/1	N° 5 Chaudière «Package» à tube d'eau à grille oscillante	1966	a, f	1,50
12634/2/66/1	N° 6 Chaudière «Package» à tube d'eau alimentée au charbon pulvérisé	1966	a, f	1,50
3934	N° 7 Dégagements instantanés I — CERCHAR	1966	a, f	1,50
3935	N° 8 Dégagements instantanés I — INICHAR	1966	a, f	1,50
3931	N° 9 Mise à l'épreuve de barrages et d'arrêts-barrages	1967	a, f	1,50
3936	N° 10 Télécommande et télécommande en taille havée	1967	a, f	1,50
4488	N° 12 Désulfuration des gaz de fumées des foyers au charbon	1969	a, f	1,50
4489	N° 13 Contraintes, mouvements et formation de cassures dans les roches encaissant les galeries en veine	1969	a, f, n	1,50
4490	N° 14 Chaudière de chauffage central à coke	1969	a, f, n	1,50
15837	N° 15 Étude sur le tirage des cheminées sous l'influence de rafales de vent	1970	a, f, n	2,50
	N° 16 Recherches concernant les techniques de combustion des différentes catégories de charbon dans les poêles et petites chaudières	1969	en préparation	
	N° 17 Soutènement mécanisé I — Steinkohlenbergbauverein	1969	a, f	2,50
16085	N° 18 Télécommande et automatisation des travaux souterrains dans les houillères du Royaume-Uni et de la Communauté européenne du charbon et de l'acier (Situation 1968)	1970	a, f	1,50
4491	N° 20 Recherches fondamentales sur la chimie et la physique des charbons et des coques	1968	a, f	3,50
4543	N° 21 Commandes hydrostatiques pour des installations d'abattage de charbon	1968	a, f, n	1,50
	N° 22 Recherches sur les pressions de terrains I — Steinkohlenbergbauverein	1969	a, f	1,50
4492	N° 23 Recherches sur les pressions des terrains I — CERCHAR — Rapport général	1968	a, f	1,50
	N° 24 Recherches concernant les mouvements de terrain au voisinage des galeries	1969	a, f, n	1,50
	N° 25 Mécanique des terrains houillers dans le cas de déformations planes	1969	a, f	5,50
4493	N° 26 Étude concernant le gisement, le dégagement du grisou et les moyens de le combattre, effectuée dans les mines des Pays-Bas	1968	a, f, n	1,50
4494	N° 27 Étude des pressions de terrain en relation avec les dégagements instantanés de grisou	1969	a, f, n	1,50
	N° 28 Cadres articulés sur piles de bois	1969	f, n	1,00
15791	N° 29 Recherches fondamentales sur la chimie et la physique des charbons et des coques — Rapport de synthèse II 1965-1967	1969	a, f	1,50
16353	N° 30 Essais d'explosion avec des arrêts-barrages et des barrages d'isolement	1970	a, f	2,50
16409	N° 31 Expertise sur le creusement des galeries au rocher	1970	a, f	2,50
16490	N° 32 Utilisation des cendres volantes et du mâchefer de générateurs de vapeur chauffés au charbon	1970	a, f	1,50
16743	N° 33 La recherche charbonnière encouragée par la Communauté et ses résultats	1970	a, f, i, n	1,00
16878	N° 34 Le gisement et le dégagement du grisou I — 1962-1968 — StBV	1971	a, f	2,50
16879	N° 35 Le gisement et le dégagement du grisou I — 1963-1968/INIE	1971	a, f	2,50
16880	N° 36 Recherches fondamentales sur la chimie et la physique des charbons et des coques — III 1967-1969	1970	a, f	3,50
5641	N° 37 Soutènement mécanisé II		en préparation	
5610	N° 38 Étude sur la combustion du charbon — Rapport de synthèse 1962-1970 — CERCHAR	1971	a, f	3,50
	N° 39 Foration par enlèvement	1971	en préparation	8,00
5518	N° 40 Rapport d'activité 1970 sur les recherches charbonnières encouragées par la Communauté	1971	a, f	1,50
5598	N° 41 Dégagements instantanés de méthane et de charbon — Rapport de synthèse 1962-1969 — CERCHAR	1971	a, f	5,00
5686	N° 42 Télécommande et télécommande d'une taille à rabot et soutènement marchant	1971	en préparation	4,00
EUR 4520	Technique et évolution dans le domaine de la cokéfaction	1970	a, f, e	14,00
EUR 4533	Pression des terrains et soutènement dans les mines	1970	a, f	16,00
EUR 4641	Recherche charbonnière — Application à la technique minière — Base pour nouveaux produits	1971	a, f	5,00
EUR 4670	Maîtrise du dégagement grisouteux — Amélioration du climat	1971	a, f	15,00

Des exemplaires supplémentaires du présent recueil tout comme les publications mentionnées plus haut peuvent être commandés à
Office des publications officielles des Communautés européennes
Case postale 1003 — Luxembourg 1

