

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

RECUEILS DE RECHERCHES CHARBON

**Utilisation des cendres volantes et
du mâchefer de générateurs de vapeur
chauffés au charbon**

Recueil

N°

32

LUXEMBOURG 1970

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.

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

RECUEILS DE RECHERCHES CHARBON

**Utilisation des cendres volantes et
du mâchefer de générateurs de vapeur
chauffés au charbon**

Recueil

N°

32

LUXEMBOURG 1970

UTILISATION DES CENDRES VOLANTES ET DU MÂCHEFER DE GÉNÉRATEURS DE VAPEUR
CHAUFFÉS AU CHARBON

Dr H. Schäfer

Bergbau-Forschung GmbH, Essen

Sommaire

	Page
1. Avant-propos	7
2. Introduction	9
3. Travaux en Allemagne	11
3.1 Essais en laboratoire	11
3.1.1 Institut Bergbauforschung	11
3.1.2 «Institut für Steine und Erden» de la TH Clausthal	12
3.1.3 «Institut für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau» de la TH Aix-la-Chapelle	14
3.1.4 «Institut für Bauforschung» de la TH Aix-la-Chapelle	15
3.2 Essais à l'échelle semi-industrielle et industrielle	15
3.2.1 Valorisation du mâchefer de chaudières à fusion	15
3.2.2 Utilisation des cendres volantes	20
4. Travaux réalisés en France	24
4.1 Recherche en laboratoire	25
4.2 Utilisation des cendres volantes dans les travaux de terrassement et la construction de routes	26
5. Récapitulation	27

Avant-propos

Par rapport aux chaudières chauffées au fuel ou au gaz, le générateur de vapeur chauffé au charbon présente surtout, en dehors du fait que son fonctionnement est encore plus difficile à automatiser, l'inconvénient de produire des quantités considérables de résidus de charbon sous forme de poussières volantes et de mâchefer.

Ces résidus doivent être éliminés, c'est-à-dire que des sommes parfois considérables doivent être dépensées chaque année pour mettre au terriil les quantités de cendres volantes et de mâchefer produites, puisque jusqu'à présent on n'a réussi qu'en partie à les employer utilement et qu'aucune solution durable à ce problème n'a encore été trouvée

Pour employer de façon utile les cendres volantes et le mâchefer, il est nécessaire d'étudier sous tous ses aspects la matière première dont ils sont formés et de vérifier leur comportement dans le cadre des diverses possibilités d'emploi. A cet effet, la HA de la CECA accorde une aide financière, en France, aux travaux du CERCHAR et du CERILH, en Allemagne, à ceux du Steinkohlenbergbauverein et des instituts d'enseignement supérieur liés à celui-ci par contrat.

Les travaux des institutions précitées pendant la période comprise entre le 1.1.1965 et le 31.12.1968 font l'objet du présent rapport.

Introduction

Dans tous les pays de la Communauté, l'augmentation des résidus de combustion des centrales thermiques fonctionnant au charbon est une source croissante de difficultés et de dépenses. Tel est le cas notamment des centrales minières et des centrales implantées au voisinage des mines, qui brûlent aussi du charbon dont le taux de cendres atteint jusqu'à 30 %.

Dans la seule RFA, la quantité de cendres produite annuellement par les centrales thermiques fonctionnant au charbon atteint au total environ 6,2 millions de t, dont à peu près 0,9 million de t de cendres volantes, 0,8 million de t de cendres de foyer et environ 4,5 millions de t de cendres fondues. Dans la Communauté, ce total est d'environ 12 à 15 millions de t par an, dont 3,5 à 4 millions de t de cendres volantes rien qu'en France

Il est coûteux d'entreposer les cendres, les surfaces disponibles ne sont pas extensibles à l'infini, de sorte qu'il devient absolument nécessaire de chercher d'autres possibilités d'utilisation

Il se peut que, dans le bilan annuel d'une centrale, l'élimination des cendres n'intervienne pas pour un montant élevé, mais avec la tendance à construire des centrales de plus en plus grandes, la difficulté d'éliminer les cendres augmentera.

La France et l'Allemagne, ont produit en 1967 un total de 10 millions de t de cendres volantes, cendres de foyer et cendres de fusion dont une partie a été utilisée de la manière suivante :

1 – France

Cendres volantes

Production de ciment	837 000 t
Construction de routes	601.000 t
Béton destiné à la construction	78.000 t
Briqueterie	1 000 t
Matériau de remplissage pour chantiers	187.000 t
Divers	29.000 t

Total = 49 % du total de la production 1.733.000 t

2 – Allemagne

a) *Cendres volantes*

Production de ciment	70.000 t
Construction de routes	200.000 t
Béton léger	50.000 t
Béton destiné à la construction	100.000 t
Briqueterie	150.000 t
Divers	10.000 t

Total = 64 % du total de la production 580.000 t

b) *Cendres de foyer*

Construction de routes	100.000 t
Matériau de remplissage pour chantiers	300.000 t
Divers	200.000 t

Total = 75 % du total de la production 600.000 t

c) *Cendres de fusion (granulé de mâchefer)*

Construction de routes	700.000 t
Béton destiné à la construction	1.000.000 t
Briqueterie	700.000 t
Matériau de remplissage pour chantiers	500.000 t
Divers	200.000 t

Total = 69 % du total de la production 3 100.000 t

Ces chiffres ne font pas apparaître le problème de l'élimination des cendres sous son vrai jour. On souhaite, certes, des chiffres de vente élevés, mais les chiffres mentionnés ne doivent pas faire illusion, car il ne s'agit pas ici de commandes permanentes. Les chiffres varient beaucoup à quelques années de distance et l'emploi sans contrôle et sans discernement de ces matériaux pour les diverses utilisations mentionnées peut, en cas d'accident, entraîner

immédiatement une chute des ventes et supprimer pour longtemps le débouché qui représente le marché des matériaux de construction.

Les considérations qui précèdent montrent combien les recherches sur la valorisation et l'utilisation des

cendres et du mâchefer, auxquelles participent les institutions déjà citées, vont dans l'intérêt du producteur et du marché des matériaux de construction

Les travaux réalisés en France et en Allemagne sont décrits et examinés ci-après

Travaux en Allemagne

ESSAIS EN LABORATOIRE

Institut «Bergbauforschung»

L'exposé ci-dessous traite des essais réalisés en laboratoire en vue de la valorisation des granulés de mâchefer

Les granulés de mâchefer sont un verre de silicate d'alumine à forte teneur en oxyde de fer et contenant, en outre, des éléments alcalins et alcalino-terreux, des poussières volantes de coke finement réparties, de petites particules de fer, etc. Une composition aussi hétérogène réduit, de prime abord, les possibilités d'obtenir un verre relativement stable. La structure particulièrement défavorable du verre est due au fait qu'au moment de sa fabrication, on refroidit brusquement le granulé de mâchefer en dirigeant le jet de mâchefer liquide dans l'eau, ce qui a pour effet de figer instantanément toutes les structures ordonnées et tous les états liés. Le verre entre dans un état instable et se désagrège sous la moindre pression. Aussi apparaît-il opportun d'améliorer le mâchefer, c'est-à-dire de le dévitrifier dans une large mesure et d'en faire un produit cristallin.

C'est pourquoi on a essayé par divers moyens d'étudier les conditions de cristallisation du mâchefer de charbon acide. En dehors de séries d'essais purement empiriques, on a procédé à des recherches sélectives sur la plasticité et la fusibilité du mâchefer de chaudières. De plus, on a essayé de mesurer les températures exactes de cristallisation des phases obtenues.

Nous signalerons séparément les difficultés rencontrées avec les divers appareils utilisés.

Le rapport entre la composition chimique et la fusibilité a été étudié au microscope Leitz à réchauffement à partir de nombreux échantillons de granulé de mâchefer. Le mâchefer étudié provenait de la Sarre, du bassin d'Aix-la-Chapelle et du bassin de la Ruhr. Les chiffres obtenus montrent que les rapports éventuels entre la composition chimique et la fusibilité ne peuvent être dégagés directement de

l'analyse chimique par voie humide. De plus, l'analyse spectrométrique de fluorescence X a permis de déceler dans le mâchefer la présence d'oligo-éléments (Ba, Ca, Zn, Si, Ni, Mn, Zr, Rb, Pb et Cu). Leurs concentrations n'ont pas permis non plus d'établir un rapport très net avec la fusibilité.

La détermination de la fusibilité des cendres a posé certains problèmes; en effet, par suite de l'apparition de soufflures autour du point de fusion, il a souvent été impossible de déterminer celui-ci avec précision. Ces phénomènes se sont produits en atmosphère dite faiblement réductrice. On a pu les éliminer en modifiant l'atmosphère du four (atmosphère inerte d'argon).

Les essais réalisés ont servi à déterminer les points d'agglomération, de fusion et d'écoulement des divers types de mâchefer et ont fourni, en même temps, les premières grandeurs caractéristiques pour les essais de cristallisation effectués aussitôt après.

Pour connaître exactement la température de formation des phases minérales qui se séparent dans le mâchefer de chaudières, on a procédé à plusieurs séries d'essais à l'aide d'un appareillage de thermoanalyse différentielle (DTA) à haute température. Ces essais ont échoué devant l'impossibilité de maintenir le mâchefer dans les capsules d'essai en platine, celui-ci gonflant tellement aux températures voisines du point de fusion qu'il finissait par couler. Il n'a pas été possible de surmonter cette difficulté même en modifiant tous les autres paramètres variables.

Comme les essais DTA à haute température n'ont pas donné les résultats escomptés, on a utilisé à cet effet une table chauffante de microscopie perfectionnée pour éclairage par transparence avec mesure pyrométrique de la température. On a pu ainsi observer que, lors du refroidissement du mâchefer en fusion, à 1 500 °C, il se forme lentement de gros cristaux de mullite qui disparaissent si l'on réchauffe le mâchefer jusqu'à 1 600 °C.

En refroidissant le mâchefer à 1 400 °C, on a observé une cristallisation spontanée en petits cristaux de mullite, en éventail, à croissance rapide. A 1 340 °C, les cristaux de mullite forment des agrégats de bandes parallèles adhérant les unes aux autres, faciles à distinguer et qui, si le refroidissement se poursuit jusqu'à 1 250 °C, se transforment en un feutre dense de fibres de mullite.

Ces essais ont permis de jeter les bases des programmes d'essais spécifiques de dévitrification et de détermination des propriétés d'écoulement du mâchefer de chaudières.

Il est apparu qu'une installation Nernst-Tammann à haute température combinée à un viscosimètre rotatif convenait parfaitement aux essais. Cet appareil permet d'atteindre des températures de l'ordre de 1 880 °C. La limite d'utilisation du viscosimètre rotatif est d'environ 10⁷ poises. Le moule du creuset et l'agitateur sont en carbone.

La viscosité de plusieurs sortes de mâchefer a été étudiée dans le domaine de température compris entre 1 600 et 1 500 °C à intervalles de 50 °C. Il résulte des séries d'essais réalisés que la sensibilité du viscosimètre rotatif utilisé est manifestement insuffisante pour mettre en évidence les faibles différences de composition chimique du mâchefer sous forme de variations de viscosité. Aucune relation formelle n'apparaît entre les coefficients de viscosité mesurés et l'analyse chimique globale.

Les essais ont montré que la viscosité du mâchefer de chaudières était, à 1 600 °C, d'environ 50 poises, à 1 550 °C d'environ 90 poises et à 1 500 °C, d'environ 200 poises. Afin de voir à partir de quels pourcentages les additifs agissent sur la viscosité, on a procédé à des essais au moyen de CaO et de SiO₂. On a pu ainsi observer que les additions de CaO réduisent la viscosité du mâchefer jusqu'à une valeur limite correspondant à environ 25 à 30 % de CaO ajouté. Lorsque ce chiffre est dépassé, l'addition de CaO augmente fortement la viscosité. De plus, on a constaté qu'il fallait ajouter environ 10 % de SiO₂ pour neutraliser l'effet sur la viscosité d'une addition d'environ 1 % de CaO. Cette constatation est valable pour tous les types de mâchefer étudiés.

La détermination de la viscosité du mâchefer et la possibilité d'influencer celle-ci jouent un rôle important dans les problèmes de valorisation du mâchefer, en ce sens que, dans le mâchefer très fluide, les germes cristallins peuvent mieux s'agréger, ce qui facilite la cristallisation.

Sur la base des recherches mentionnées jusqu'ici, on a procédé, d'abord à l'échelle la plus réduite, à des essais tendant à provoquer la cristallisation du mâchefer et à déterminer les paramètres nécessaires

à cet effet : vitesse de refroidissement et durée de recuit à la température de cristallisation principale des phases minérales obtenues. Ces essais de dévitrification ont montré que, lorsque la durée de recuit est assez longue dans le domaine de la température de cristallisation, ou lorsque la courbe de refroidissement est très plate, on peut obtenir un matériau qui est cristallin jusqu'à la limite assignée par le chimisme du mâchefer. Afin de réduire la durée de recuit nécessaire à cet effet dans l'intervalle compris entre 1 100 et 1 300 °C, on a essayé d'accroître la tendance à la cristallisation des scories par l'addition de minéralisateurs. Ces essais n'ont cependant pas donné les résultats escomptés. Il a rarement été possible d'obtenir que les produits ajoutés soient fondus et absorbés entièrement par le mâchefer.

Au cours des essais au four à haute température Nernst-Tammann, il est apparu que le fer réduit, qui s'était déposé au fond du creuset, contenait jusqu'à 20 % de Si. Or, pour obtenir un produit marchand, il est nécessaire de porter le taux de Si bien au delà de 20 %. On a donc procédé à des essais en laboratoire pour remplir cette condition.

Le programme comprenait plusieurs séries d'essais sur des granulés de mâchefer que l'on avait traités à des températures de 1 600 et 1 700 °C afin de vérifier l'influence de la température sur la quantité et la composition du fer silicié. Des essais à différentes durées de recuit ont eu lieu ensuite. On a appliqué à cette occasion un programme de durées de recuit (30, 120, 180 minutes) fixé pour les deux domaines de température.

On a constaté que le niveau de température exerce une influence beaucoup plus forte sur la quantité du fer silicié que la durée de recuit.

En portant cette durée de 30 à 120 minutes, à une température de 1 600 °C, on a pu doubler la quantité de fer silicié sans augmenter le taux de Si. Il en va de même pour les essais réalisés à 1 700 °C. En revanche, la température des essais ayant été portée de 1 600 à 1 700 °C, le taux de Si obtenu dans le fer fut beaucoup plus élevé. Il en résulte que si ces essais de laboratoire sont réalisés à l'échelle technique, il faudra opérer uniquement à des températures de plus de 1 700 °C pour obtenir un produit commercialisable, ce qui, bien entendu, fait passer au premier plan les problèmes techniques des matières réfractaires.

**Institut für Steine und Erden der Th,
Clausthal** (Institut des pierres et terres
de TH Clausthal)

Les recherches effectuées jusqu'à présent dans cet institut se subdivisent en deux catégories :

- 1) Recherches sur la valorisation du mâchefer de chaudière ;

2) Recherches sur les utilisations possibles des poussières volantes

Au sujet du point 1), il convient de dire qu'il y a eu naturellement des chevauchements avec les travaux de recherche minière déjà décrits. Comme, toutefois, il s'agit ici de mâchefer qui n'a pas été étudié dans le cadre de cette recherche, les résultats, en grande partie concordants, ont été précieux, en ce sens qu'ils ont montré qu'il était parfaitement possible d'extrapoler au mâchefer de chaudière les caractéristiques dégagées par l'étude d'un petit nombre de types de mâchefer.

En outre, l'Institut des pierres et terres a étudié les possibilités d'emploi du mâchefer pour la fabrication d'agrégats légers puisque, grâce à leur composition chimique, à leur aptitude au ramollissement et à leur fusibilité, il apparaît possible d'utiliser le mâchefer à cette fin soit directement, soit en combinaison avec d'autres matières premières, telles que l'argile. On a déterminé, à cet effet, la teneur en carbone du mâchefer. Celle-ci est importante, car, en présence d'oxydes de fer, il peut se produire dans le mâchefer des réactions accompagnées de dégagements de gaz. Les résultats des recherches montrent que, dans le mâchefer relativement bien gonflant, la teneur en carbone atteint 0,5 % en poids, alors que, dans le mâchefer moins gonflant, cette teneur n'est que de 0,1-0,2 % en poids. Il était facile de concevoir que l'on pourrait utiliser un tel mâchefer bien gonflant en le mélangeant aux matières premières servant à la fabrication de l'argile cellulaire. On a donc essayé de remplacer, dans des proportions croissantes, l'argile employée dans le mélange d'argile cellulaire par du mâchefer broyé à moins de 90 μm .

Au total, 3 mélanges cuits à des températures de 1 200, 1 250 et 1 300 °C ont été produits :

Mélange I 50 % mâchefer – 50 % argilite
Mélange II 75 % mâchefer – 25 % argilite
Mélange III 87,5 % mâchefer – 12,5 % argilite

Les recherches ont permis de relever de grandes différences entre les divers mélanges. Il est apparu que le meilleur mélange est celui qui contient 50 % de mâchefer et 50 % d'argilite. Les critères déterminants pour l'appréciation des essais étaient la compacité brute du grain, l'indice de gonflement et l'état de surface des grenailles. Les recherches ont encore montré qu'il est possible d'utiliser le mâchefer broyé en le mélangeant aux matières premières. Des proportions atteignant jusqu'à 75 % de mâchefer donnent encore de bons résultats. Toutefois, il apparaît très douteux que ceux-ci puissent trouver une application technique, car, en raison de la forte usure des broyeurs, les frais de broyage ôteraient

toute rentabilité à l'emploi d'un tel matériau qui, même étant mélangé aux matières premières, serait de peu de rapport.

Les essais réalisés dans ce même but par l'Institut des pierres et terres sur des cendres volantes apparaissent plus intéressants, puisque dans ce cas il n'y aurait pas de frais de broyage.

Toutefois, le simple remplacement de mâchefer broyé par des cendres volantes dans le mélange d'argile cellulaire n'a pas donné d'aussi bons résultats. Aussi a-t-on procédé à des recherches poussées sur les diverses cendres volantes pouvant servir de matière première. En l'espèce, on a étudié de plus près l'influence de la granulométrie, celle de la teneur en C et de l'aptitude au ramollissement.

Les conditions fondamentales suivantes ont alors été établies pour définir les cendres gonflantes ou peu gonflantes :

- 1 Les cendres sont peu gonflantes lorsque leur teneur en carbone dépasse environ 5 % et qu'une faible part a une granulométrie inférieure à 60 μm . En outre, un domaine de ramollissement peu important (domaine situé entre le point de ramollissement et le point de fusion), situé au-dessous de 50 °C, a des effets défavorables.
2. Les cendres gonflantes sont celles qui comprennent une forte proportion de matière de granulométrie inférieure à 60 μm , dont la teneur en carbone est faible et qui ont un domaine de ramollissement situé au-delà de 100 °C.

En outre, les cendres ont été classées en 8 catégories granulométriques à l'aide d'un séparateur à vent. La détermination de la teneur en carbone en % par fraction a montré que cette teneur est généralement plus forte dans les catégories à forte granulométrie et qu'elle diminue constamment à mesure qu'on passe vers une granulométrie plus fine. On a constaté que plus de 70 % de la teneur totale en carbone des cendres volantes se situent dans la fraction de granulométrie supérieure à 60 μm et que l'indice de gonflement des diverses catégories diminue à mesure que la granulométrie est plus forte.

Si l'on réussissait effectivement à mettre au point un procédé rentable de séparation de la fraction de granulométrie supérieure à 60 μm , on aurait trouvé le moyen d'utiliser d'une manière économiquement rentable les cendres volantes comme produit de mélange pour la production d'argile cellulaire et, d'autre part, de recycler purement et simplement dans les chaudières les granulométries supérieures à 60 μm . On peut certainement estimer que les chances d'y parvenir sont très bonnes, d'autant plus que, jusqu'à présent, il est constamment apparu que le principal

obstacle à l'emploi, sur une grande échelle, des cendres volantes, réside dans leur teneur variable en carbone. On peut admettre que la solution proposée (séparation par élutriation des cendres de granulométrie supérieure à 60 μm) ne coûtera certainement pas plus cher que l'homogénéisation des cendres volantes souvent pratiquée aujourd'hui.

Institut für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau de la TH, Aix-la-Chapelle

L'Institut für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau de la TH, Aix-la-Chapelle s'est donné pour tâche d'étudier les conditions dans lesquelles le mâchefer, valorisé ou non, peut être utilisé dans la construction de routes et les travaux de terrassement. Son programme de travail est le suivant :

1. Etude des propriétés du granulé comme matériau pour la construction de routes. Cette étude porte sur la composition granulométrique, la forme du grain, la structure, la résistance aux agressions des agents extérieurs et la résistance mécanique.
2. Comportement du granulé en combinaison avec d'autres matériaux de construction de routes (sans liant), à savoir mélanges de sables et de granulés, gravillons et cailloux avec granulés – granulé utilisé comme agrégat de béton minéral (filler), granulé pour la stabilisation du sol (influences sur la portance et le compactage).
3. Affinité du granulé pour les liants bitumineux, à savoir bitumes, goudrons et émulsions.
4. Propriétés du mélange bitumineux constitué de granulé ou combiné à d'autres agrégats. En l'espèce ont été étudiés revêtements bitumineux, béton asphaltique de gravillons et de cailloux et asphalte coulé.

Seront étudiés ici : miscibilité, besoins en liants et fillers et stabilité des mélanges.

Les résultats obtenus jusqu'ici concernent essentiellement les points 1 et 2 et sont résumés brièvement ci-dessous.

Les études de résistance du granulé dans les gammes de 8-12 mm et de 2-5 mm montrent nettement que, dans cette tranche granulométrique, le matériau n'atteint nullement les coefficients de fragmentation et d'abrasion admissibles pour les grenailles utilisées dans la construction des routes. C'est seulement dans le domaine de la granulométrie du sable que les coefficients de résistance du granulé correspondent à peu près à ceux des sables de concassage provenant des roches naturelles, de telle sorte

que, dans cette tranche granulométrique, la qualité du granulé peut être assimilée à celle des sables de concassage normalement utilisés dans la construction des routes.

Des résultats aussi bons ont été obtenus avec des granulés broyés à moins de 2 mm dans un broyeur à marteaux. Cette étude a été entreprise à la suite des résultats obtenus lors de l'examen de la composition granulométrique selon DIN 1996, qui ont montré que la plus grande partie du granulé était d'un calibre de 2 à 5 mm (environ 45-60 % en poids) et que de 20 à 30 % en poids seulement relevaient du domaine de la granulométrie du sable. Le domaine des gravillons (5-8 mm) correspond à 10-20 % du poids de l'ensemble. Par conséquent la plus grande partie du granulé échapperait à un simple criblage à moins de 2 mm.

Comme nous l'avons dit, le sable broyé de granulé non valorisé provenant du broyeur à marteaux présentait de bonnes caractéristiques. A tous les niveaux de charge, ses coefficients de fragmentation et d'abrasion sont meilleurs que, par exemple, ceux du sable broyé à base de roche calcaire. Pour ce qui est de la résistance aux chocs, on peut en dire autant du sable broyé à base de basalte qui, néanmoins, s'est révélé un peu plus résistant à l'épreuve de pression et d'abrasion (test de Los Angeles) dans les domaines de charge plus élevés.

Le comportement favorable du granulé dans cette tranche granulométrique est également confirmé par les résultats de l'essai d'écoulement, qui montrent que le sable de broyage à base de granulé est constitué par des grains à arêtes vives et que son coefficient indice de temps (Zeitwertindex) de 1,99 est supérieur à ceux des sables de broyage de qualité comparable.

Des études comparatives sur des granulés broyés à la même granulométrie au moyen d'un broyeur à chocs ont donné à peu près les mêmes valeurs, mais la forme un peu plus arrondie des grains due au type de broyage est gênante pour différentes utilisations.

Selon les résultats des recherches, la résistance au gel des matériaux mentionnés jusqu'ici peut être considérée comme suffisante, l'éclatement des divers fragments en pourcentage pondéral et le coefficient de fragmentation par choc étant du même ordre que ceux des pierres naturelles de type comparable (par ex. grauwacke).

Sur la base de ces résultats positifs, nous allons examiner à présent le comportement de ces substances dans des mélanges bitumineux.

Si l'on considère que, pour la construction des routes, il convient d'employer autant que possible un agrégat

uniforme, l'intérêt des recherches décrites apparaît immédiatement, car la dispersion des centrales thermiques permet de satisfaire au mieux à cette condition. En outre, les travaux de terrassement et de construction de routes ouvrent un débouché massif aux matériaux en question.

Institut für Bauforschung der TH, Aachen (Institut de recherches sur la construction de la TH, Aix-la-Chapelle)

L'Institut für Bauforschung de la TH, Aix-la-Chapelle étudie les possibilités d'employer les cendres volantes pour la fabrication d'un agrégat léger.

Les recherches ont pour but de mettre au point un béton léger dense, à agrégat broyé, poreux, provenant d'une bande de frittage ou à agrégat arrondi, poreux, provenant d'un four rotatif. Compte tenu de la concurrence d'autres produits tels que le ponce de laitier, l'argile cellulaire et le schiste expansé, les exigences de qualité imposées aux agrégats légers fabriqués à partir de cendres volantes provenant d'une bande de frittage ou d'un four rotatif sont élevées. On attache notamment la plus grande importance au contrôle de la résistance propre du matériau, au volume de vide, à la forme du grain et aux qualités de surface de celui-ci.

Les premiers essais de fabrication de béton à base de cendres volantes pelletisées et agglomérées par frittage ont donné des résultats très positifs. En raison de leur structure poreuse, les pellets provenant de la bande de frittage ont une forte tendance à absorber l'humidité. C'est là un inconvénient, qui peut être évité en utilisant un four rotatif.

Les valeurs de résistance du béton à la compression obtenues jusqu'ici se situent dans les limites des prescriptions en vigueur pour les agrégats légers ainsi que le montre le diagramme suivant :

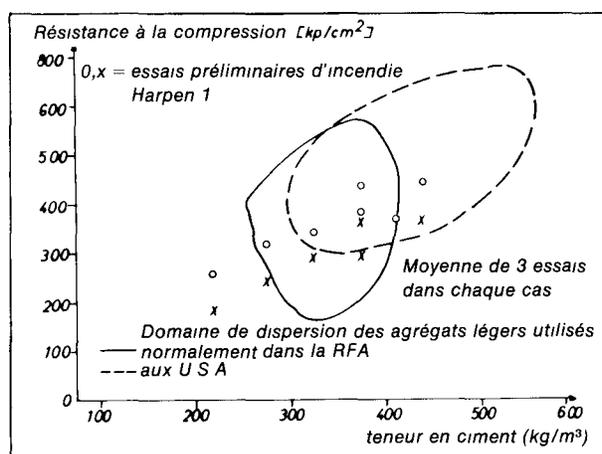


Fig. 1 — Domaines de dispersion des agrégats légers d'emploi courant en Allemagne et aux U.S.A.

Le schéma indique les domaines de dispersion des agrégats légers normalement utilisés, en fonction de la résistance à la compression et de la teneur en ciment. Le trait continu indique le domaine de dispersion admissible pour la RFA, le pointillé celui des U.S.A. Le diagramme montre que les agrégats légers satisfont pleinement aux exigences de l'industrie du bâtiment.

Les recherches de l'institut doivent être appréciées compte tenu des chiffres suivants :

Aux U.S.A. il existait en 1954, 33 usines fabriquant des agrégats légers céramiques et dont la production totale atteignait 1,2 mil. de t par an. Le nombre d'usines était passé, en 1963, à 60 avec une production totale qui atteignait déjà 3 millions de t par an. A l'heure actuelle, aux U.S.A., environ 250 installations produisent à peu près 18 millions de t d'agrégats céramiques légers, dont environ 60 % sont destinés à la fabrication de briques (succédané de pierre ponce dont le volume de vides est supérieur à 50 %); 40 % ont un volume de vides de 30 à 50 % et sont utilisés dans les constructions en béton.

L'Allemagne produit actuellement 0,5 million de t par an d'agrégats céramiques légers. On peut prévoir que, dans les prochaines années, cette production sera portée à environ 7 millions de t par an. Toutefois, les prix ne devront pas dépasser le niveau actuel. Le prix de vente à l'usine des agrégats céramiques légers est actuellement d'environ 30 DM le m³.

Pour des raisons de coût, les bétons confectionnés à partir de ces agrégats sont assez peu compétitifs. Mais on ne peut prévoir que la demande augmenterait considérablement si l'on parvenait à offrir, à qualité égale, un agrégat léger meilleur marché.

Les prix de vente relativement élevés des produits employés jusqu'ici (argile cellulaire, schiste expansé) résultent de la préparation très coûteuse des matériaux de base. Les recherches de l'Institut des pierres et terres et de l'Institut de recherches sur la construction, ont montré que l'on pourrait parfaitement utiliser de grandes quantités de cendres volantes, d'une part comme additif dans les matières premières (il n'aurait pas besoin de préparation spéciale), d'autre part comme matériau de base à 100 % pour la production d'agrégats légers.

ESSAIS À L'ÉCHELLE SEMI-INDUSTRIELLE ET INDUSTRIELLE

Valorisation du mâchefer de chaudières à fusion

Les recherches de laboratoires décrites jusqu'ici, et notamment celles de la Bergbau-Forschung et de

l'Institut des pierres et terres du TH, Clausthal ont montré qu'il était parfaitement possible de fabriquer, à partir du mâchefer, un produit cristallin et, par conséquent, utilisable. En principe trois méthodes peuvent être employées

- 1) valorisation du mâchefer par refroidissement lent
- 2) réduction et récupération des éléments ferreux contenus dans le mâchefer, ce qui permet d'améliorer les qualités de cristallisation
- 3) modification de la composition chimique du mâchefer en vue d'améliorer la tendance à la cristallisation par
 - a) addition de minéralisateurs;
 - b) évaporation de SiO_2 excédentaire à températures élevées (arcs)

Comme jusqu'à présent on n'opérait, en laboratoire, que sur des granulés refondus, on a été amené naturellement, pour les essais de refroidissement lent du mâchefer, à recueillir celui-ci directement dans des creusets placés sous les chaudières

De nombreux essais de ce genre ont été exécutés par la Bergbau-Forschung, avec l'appui de différentes centrales thermiques; ils ont permis d'obtenir les premières données caractéristiques concernant la durée nécessaire du refroidissement, le nombre de phases de séparation à l'état cristallin et la nature du matériau ainsi constitué. Toutefois, tous ces essais ne doivent être considérés que comme des tâtonnements et ils n'ont fourni que des points de repère

Les creusets utilisés ont été fabriqués à la Bergbau-Forschung à partir d'un pisé en carbure de silicium; leur contenance était de 2 l environ. Dans tous les essais, ces creusets ont été refroidis à l'air libre. Des additions ont été faites, soit directement dans le creuset vide, soit par saupoudrage dans le mâchefer, une fois le creuset rempli. De plus, des agents minéralisants ont pu être insufflés directement dans le jet de mâchefer, au-dessus du creuset, par un dispositif spécial

On a employé comme minéralisants des composés d'aluminium, des schistes de lavage et des cendres volantes.

A ce sujet, il convient de dire que ces essais ont toujours donné du mâchefer cellulaire. Dans certains essais, il a été possible, par cristallisation, de réduire le mâchefer à un tiers de son volume. Si l'on retarde le dégagement de chaleur, la masse cristalline obtenue est presque optimale.

On a constaté que le fait d'insuffler des poussières volantes comportant peu d'imbrûlés favorisait la cristallisation, mais le matériau obtenu était peu homogène, car il est presque impossible, vu la haute

viscosité du mâchefer, de mélanger les additifs de façon homogène

De plus, on a observé que, même si l'on fait passer un excédent de mâchefer liquide sur des schistes de lavage gros et fins, ceux-ci ne fondent pas, mais restent pour la plupart presque inchangés

Quant aux composés d'aluminium, il faut en ajouter de telles quantités que, compte tenu du coût de ces matériaux, il semblait a priori impossible d'appliquer ce procédé à l'échelle industrielle

A partir de ces essais et des connaissances qu'ils ont permis d'acquérir, une installation expérimentale, simple et peu coûteuse, permettant d'exécuter des essais à l'échelle industrielle, a été conçue et réalisée, en coopération avec la centrale thermique d'une société minière. Il s'agit essentiellement d'un récipient de fonte dont les dimensions ont été calculées de telle manière que la chaleur du mâchefer recueilli permette d'obtenir une courbe de refroidissement aussi plate que possible.

Par suite de la conductibilité thermique élevée du récipient de fonte, le mâchefer se solidifie immédiatement au contact de la paroi de fonte; on obtient ainsi, à peu de frais, un isolateur à l'intérieur duquel le cœur de la masse se refroidit lentement.

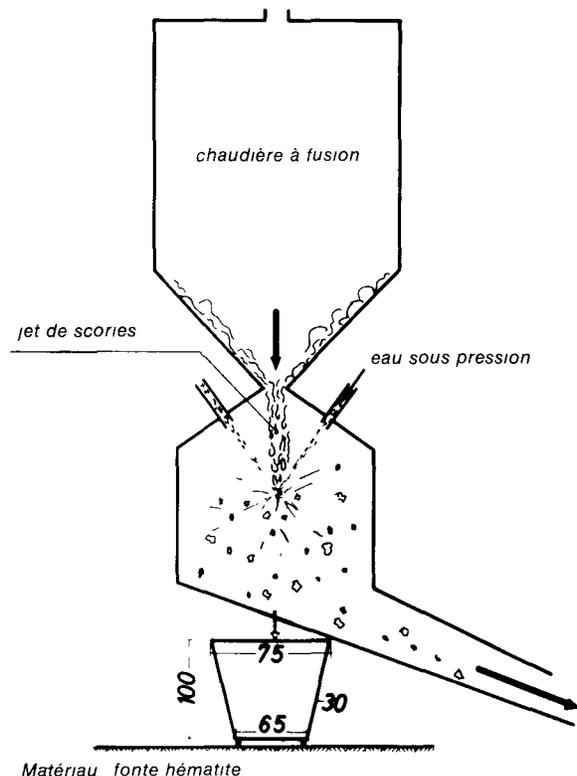


Fig 2 — schéma d'un dispositif expérimental de valorisation du mâchefer de chaudières par refroidissement contrôlé

La figure 2 représente un schéma de l'installation d'essai. Le réservoir d'évacuation des cendres, placé normalement sous la chaudière, a été muni d'une trappe située exactement à la verticale du trou d'écoulement du mâchefer. On a disposé en dessous le récipient en fonte, légèrement conique, d'une capacité de 0,5 m³ environ. Dès que le robinet d'eau sous pression se fermait, la trappe placée au fond du réservoir sous pression s'ouvrait et le jet de mâchefer s'écoulait dans le récipient froid. Des thermocouples scripteurs disposés à différents niveaux du récipient permettaient, une fois celui-ci rempli, de suivre sur une courbe les progrès du refroidissement naturel. Le taux de refroidissement obtenu avec ce récipient était 1-1,4 °C/min.

Les essais ont été réalisés avec une chaudière en exploitation normale et n'ont jamais entraîné de perturbations.

Le mâchefer s'écoulait dans le récipient à la température d'environ 1 450 °C. Conformément aux résultats des études effectuées par la Bergbau-Forschung en vue de déterminer la température de cristallisation des principaux minéraux obtenus, il fallait alors refroidir jusqu'à 1 000 °C, la cristallisation étant achevée à cette température, c'est-à-dire que le refroidissement devait durer environ 7 à 8 heures. Il pouvait ensuite intervenir brusquement. Toutefois, en raison de la bonne isolation thermique assurée par le mâchefer rapidement solidifié au contact de la paroi de fonte, il est possible de vider le récipient dès le moment où cette croûte est suffisamment solide pour retenir le noyau pâteux qui refroidit lentement.

L'Institut für Straßenwesen (Institut des routes) du TH d'Aix-la-Chapelle a étudié les matériaux ainsi fabriqués, pour vérifier s'ils étaient utilisables dans la construction des routes. Ces matériaux ont été reconnus d'aussi bonne qualité que les pierres naturelles de type comparable.

Le prix de vente possible indiqué pour ce matériau est de 8 DM/t. Les calculs de rentabilité effectués par la centrale thermique ayant participé aux essais ont abouti à un résultat favorable, de telle sorte que cette centrale est en train d'établir et de réaliser, à ses frais, une installation technique, en liaison avec un fabricant de chaudières.

Ce résultat, positif en soi, ne doit tout de même pas être surestimé et considéré comme la vraie solution du problème «utilisation du mâchefer», car la quantité de mâchefer ainsi valorisé produite par une chaudière de 250 t, suffit à couvrir les besoins routiers dans un vaste périmètre. Néanmoins, ce procédé permet aux constructeurs de routes de disposer, dans presque toute l'Allemagne, d'un agrégat de qua-

lité toujours égale, ce qui est une condition sur laquelle on insiste constamment à chaque réunion consacrée à ce secteur d'activité.

Un autre procédé de valorisation du mâchefer de chaudière est celui de la réduction et de la récupération des éléments ferreux contenus dans le mâchefer, ce qui a pour effet d'améliorer les qualités de cristallisation de celui-ci.

Les travaux de la Bergbau-Forschung, basés sur les résultats des essais au four Tammann, ont permis de porter à 30 % la teneur en silicium du fer obtenu. Les études de marché effectuées ensuite ont dégagé des perspectives si favorables quant aux débouchés qui s'ouvriraient pour un tel matériau que l'on a décidé de construire une installation de réduction des éléments ferreux contenus dans le mâchefer. Cette réduction du fer silicié contenu dans le mâchefer favorise en même temps, par la diminution du taux de SiO₂ qu'elle entraîne, la tendance à la cristallisation du reste des matières en fusion. En coopération avec une entreprise et avec la centrale thermique d'une société minière, on a construit un four à barreaux de graphite pour la valorisation de 6 t/h de mâchefer. Le four et ses annexes ont dû être construits sur une installation mobile de manière à pouvoir, en cas de perturbations, être retirés immédiatement sous la fosse de récupération du mâchefer.

Nous ne décrivons pas dans tous les détails les essais effectués avec cet appareil, d'autant plus que trop de difficultés devraient être surmontées pour en faire un procédé au point et peu sujet aux dérèglements. Indiquons seulement ici brièvement les principales de ces difficultés.

Les barreaux de graphite se sont consumés très vite et il était impossible d'introduire des matières inertes dans le four et de stopper ainsi la combustion. De plus, le chauffage par barreaux de graphite est un chauffage indirect et qui n'a donc pas un très bon rendement. Le mâchefer est en outre très mauvais conducteur de la chaleur, de sorte que seule la couche placée directement sous les barreaux a pu être maintenue à la température voulue, tandis que les couches intermédiaires refroidissaient et ralentissaient ainsi le flux continu de mâchefer. Ce système a donc été abandonné et on a essayé de trouver un procédé capable de réduire le fer contenu dans le mâchefer par un système de chauffage plus efficace et plus maniable. On a pu ici tirer parti de l'expérience acquise par l'industrie du verre dans le chauffage de bains de verre en fusion au moyen d'électrodes immergées, le bain s'échauffant en vertu de sa résistance électrique plus élevée lorsqu'on fait passer dans chaque électrode un courant de tension et d'intensité convenables et de signe contraire.

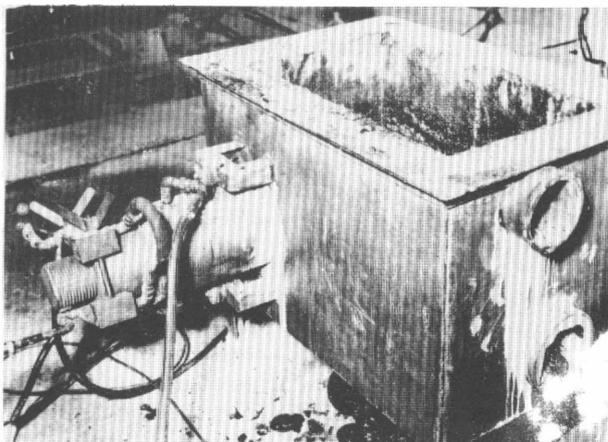


Fig. 3 — Four expérimental pour le chauffage direct du mâchefer de chaudières. Vue d'ensemble.

La fig. 3 représente un four expérimental de la taille d'un bureau, grâce auquel ce principe a pu être expérimenté avec des électrodes de grandeur naturelle (200 mm Ø).

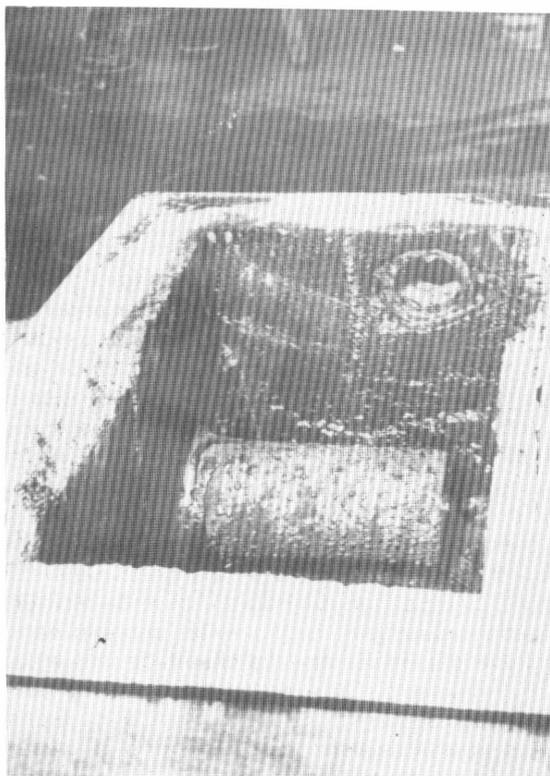


Fig. 4 — Four expérimental pour le chauffage direct du mâchefer de chaudières. Vue partielle.

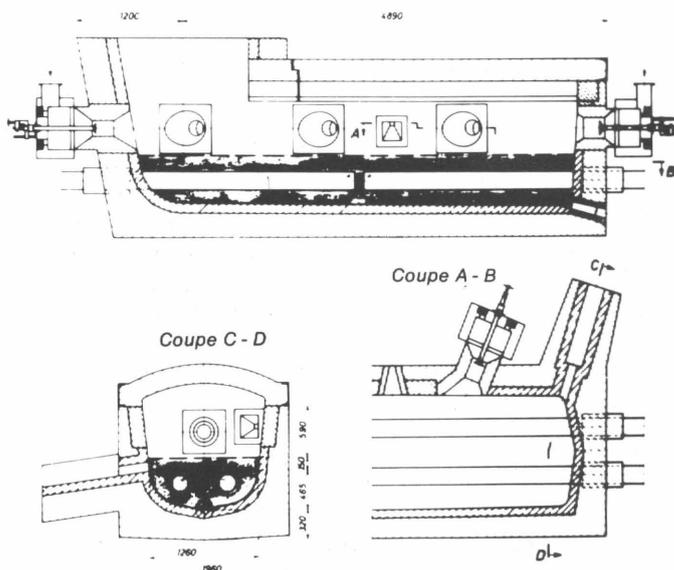


Fig. 5 — Schéma du four de refonte à chauffage électrique direct.

On distingue, à l'extrémité arrière gauche du four, le porte-électrode refroidi à l'eau et, émergeant de celui-ci, l'électrode munie d'un filetage et de raccords électriques refroidis à l'eau. Au premier plan, on voit les deux trous de coulée superposés, le trou supérieur permettant l'écoulement du trop-plein et le trou inférieur la vidange complète du four. Du côté droit, mais non visible sur la photographie, l'électrode opposée plonge, immédiatement derrière les trous de coulée, dans le four, la distance de celle-ci par rapport à la paroi opposée étant également d'environ 100 mm.

La figure 4 permet de voir l'intérieur du four expérimental. On distingue le trop-plein, l'électrode plongeant dans le four, le revêtement damé en SiC qui se détache légèrement de l'isolement. Des recherches préalables avaient montré qu'à l'état froid le mâchefer n'est pas conducteur de l'électricité et qu'on n'obtient une certaine conductibilité que lorsque les températures augmentent considérablement. Pour l'exécution d'essais au moyen de l'appareil représenté sur la photographie, il a donc fallu chauffer préalablement le mâchefer et celui-ci n'a été versé qu'à l'état liquide, à des températures de l'ordre de 1.500 °C, dans le four expérimental. Les essais, réalisés dans des conditions parfois fort difficiles, ont montré qu'en principe, le système de chauffage décrit pouvait fonctionner, mais ils ont fait aussi apparaître la faible amplitude de variation possible des paramètres d'exploitation.

La figure 5 est un schéma du four à barreaux de graphite transformé selon les principes décrits ci-dessus. La coupe longitudinale reproduite en haut montre les deux couples d'électrodes introduites dans la cuve du four à travers les parois avant et arrière, plongeant dans les scories représentées en teinte sombre, et les cinq brûleurs à mazout supplémentaires prévus, à toutes fins utiles, pour le fonctionnement expérimental, dont un monté sur chacune des parois avant et arrière, et trois montés sur la paroi latérale. La fosse d'écoulement du four que l'on voit dans la partie gauche, en haut de la coupe longitudinale, a été ajustée exactement au niveau et à la section de la cuve de déversement du mâchefer afin d'éviter l'entrée d'air parasite.

Sur la coupe A-B on distingue un brûleur à mazout latéral — immédiatement au-dessous de l'inscription AB — à droite de celui-ci la rigole d'écoulement du mâchefer et sous celle-ci, le couple d'électrodes opposées de la face avant. Chaque électrode est longue de 2.500 mm et son diamètre est de 200 mm. La coupe C-D est une section transversale de l'appareil.

La figure 6 présente le four terminé, vu de face. On distingue à droite le trop-plein du mâchefer et, au

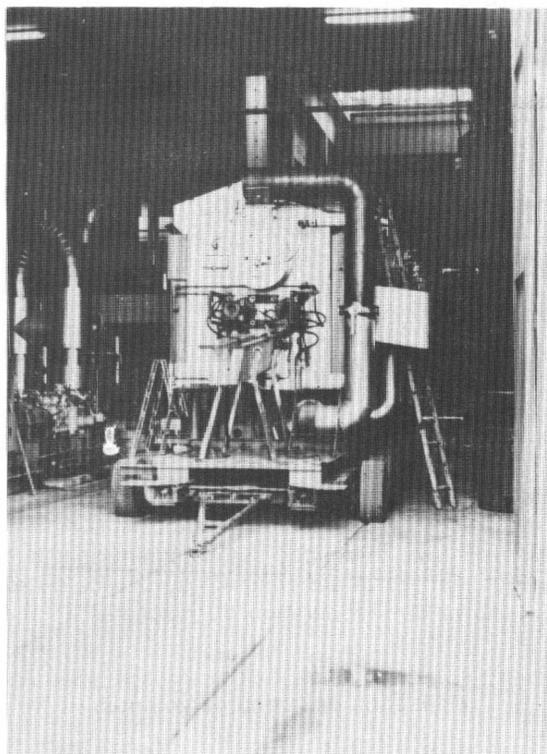


Fig. 6 — Four de refonte à chauffage direct par électrodes. Vue de face.

milieu de la face avant, le couple d'électrodes muni de ses câbles, le brûleur à mazout au-dessus, et en dessous, le trou de coulée du fer. Une fois surmontées les quelques difficultés posées par le pilonnage, le séchage et le chauffage du matériau réfractaire, le premier essai à l'échelle de la tonne devait montrer si l'équilibre instable entre la température du mâche-

fer, sa conductibilité électrique, qui dépend de la température, et le réglage du courant et de la tension dans les électrodes qui, à son tour, dépend de cette conductibilité, pouvait être maintenu. Il fallait en outre démontrer qu'il était possible d'extraire séparément du mâchefer le fer ségrégé. Pour cet essai, le four a été rempli de verre vert broyé, fondu sous l'action des brûleurs à mazout et qui recouvrait les électrodes sous forme de bain liquide conducteur. Celles-ci devaient ensuite être connectées, les brûleurs à mazout éteints, et la chaudière séchée entre-temps devait laisser écouler le mâchefer dans le bain de verre. Du fait de leur différence de densité, les deux milieux devaient ensuite se séparer, le verre en fusion s'écoulant par le trop-plein, tandis que le mâchefer, formant un bain relativement bon conducteur, enveloppait progressivement les électrodes connectées. On avait choisi ce système relativement complexe au début de l'essai pour éviter que le mâchefer ne forme, autour des électrodes, des zones relativement froides qui auraient ensuite empêché la mise en marche du chauffage électrique.

Le fait de n'avoir pas réussi, en laboratoire, à mesurer exactement la conductibilité électrique du mâchefer jusqu'à la température d'écoulement a été un grave inconvénient lors de cet essai.

La seule solution était donc d'extrapoler les données probables de conductibilité du mâchefer à haute température à partir des données correspondantes du verre, mesurées à des températures considérablement plus basses.

Au début de l'essai, on s'est aperçu que la plage de réglage des transformateurs d'alimentation des électrodes, qui devaient être réglés par paliers, ne s'étendait pas suffisamment vers le bas, de telle sorte que la différence de conductibilité entre le verre et le mâchefer était plus grande qu'on ne l'avait supposé. Il a donc fallu utiliser constamment le chauffage à mazout et le chauffage électrique n'a pu être branché que par intermittence.

La seconde difficulté a surgi lorsque le mâchefer s'est écoulé dans le four préchauffé avec le verre en fusion, dont la température atteignait 1.350 à 1.400°C. La séparation attendue du mâchefer et du verre, par différence de densité, ne se réalisa pas; en revanche, il se produisit un mélange dû probablement au fait que la température du verre était d'en-

viron 50 à 100 °C inférieure à celle du mâchefer. Cela n'aurait pas été très grave si l'on avait réussi ensuite à vidanger le four et à faire écouler le trop-plein, comme on le prévoyait. Mais c'est alors que se produisirent les plus graves difficultés, dues essentiellement à la faible durée de solidification du mâchefer mélangé au verre. Ces difficultés, aggravées encore par l'éclatement de deux douilles d'électrodes refroidies à l'eau, obligèrent à interrompre l'essai.

L'étude des dégâts causés a amené l'Institut à interrompre toute la série d'essais; on s'est aperçu en effet qu'il ne serait sans doute possible de mettre au point le procédé en question qu'au prix de très grands efforts et de dépenses considérables. Or, comme nous l'avons dit, seules des considérations d'ordre économique — et notamment le prix à la tonne que l'on pourrait retirer du fer contenant 25 à 30% de silicium — pouvaient justifier ces es-

sais. A l'heure actuelle, la situation sur le marché des ferro-alliages est telle qu'il est presque impossible d'écouler du fer contenant ces teneurs en silicium, obtenues au moyen du procédé ci-dessus. Les participants ont donc décidé d'arrêter l'installation expérimentale et d'abandonner ce procédé.

Un autre moyen de modifier la composition chimique du mâchefer consiste à l'exposer à des températures extrêmement élevées, de manière à laisser évaporer une partie des composés oxydés. Pour obtenir les températures nécessaires, le procédé le plus simple est d'employer un four à arc. Nous avons donc procédé à des essais aussi bien dans un four de recherche, de petites dimensions, que dans un grand four de fonderie. Ce procédé, certes, consomme beaucoup de courant et revient donc assez cher, mais le matériau obtenu peut très bien se comparer aux produits de haute qualité existant déjà sur le marché et dont le prix est élevé.

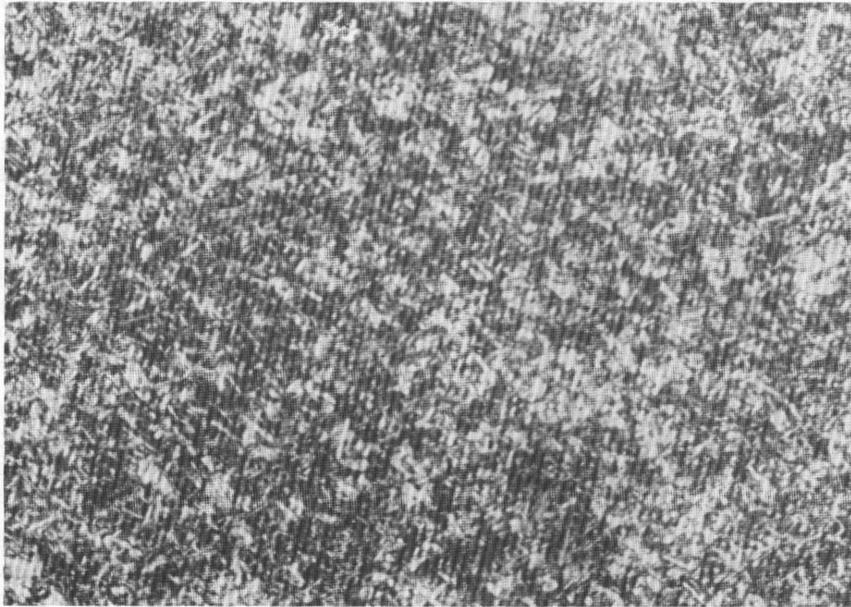


Fig. 7 — Mâchefer de chaudière valorisé obtenu dans un four à arc.

La figure 7 montre la section polie d'un matériau obtenu par fusion au four à arc. Il est entièrement dévitrifié et constitué par un feutre dense de mullite à cristaux fins. Ce résultat a été obtenu par l'évaporation d'une grande partie du SiO_2 contenu dans le mâchefer, à la suite de quoi la composition chimique du reste du bain s'est beaucoup rapprochée de celle de la mullite. La structure à grains non orientés de ce mâchefer valorisé explique en outre sa très forte résistance à la compression (environ 3.000 kg/cm²).

Cette méthode de valorisation du mâchefer ne pose pas de difficulté sur le plan technique, même à l'é-

chelle industrielle, mais elle n'a pu être appliquée dans la pratique parce qu'il a été impossible de trouver une centrale thermique suffisamment spacieuse pour loger un four à arc construit au-dessus du sol, sous la cuve de récupération du mâchefer.

Utilisation des cendres volantes

Les poussières volantes constituent l'ensemble des particules solides des fumées. Elles sont composées de deux sortes d'éléments: d'une part, des cen-

dres volantes, c'est-à-dire toutes les particules solides inorganiques telles que globules de mâchefer vitreux et les particules très fines d'oxydes, de sulfates et de phosphates de métaux tels que fer, alumi-

nium, calcium, magnésium, potassium et sodium et, d'autre part, des poussières volantes de coke composées de particules de coke éclatées et de sphérules de coke vides.

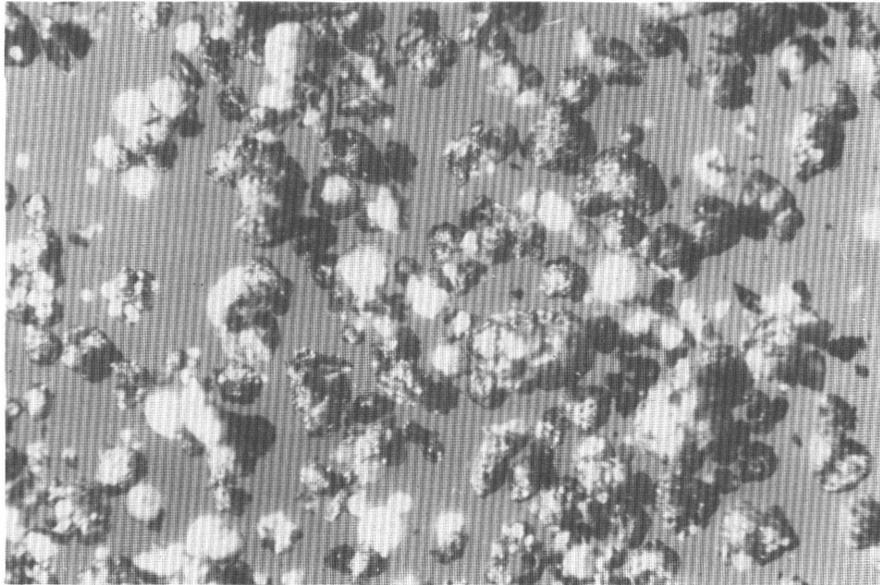


Fig. 8 — Poussières volantes de chaudière à fusion.

La figure 8 montre des poussières volantes grossies 50 fois au stéréomicroscope. Les particules sphériques de couleur claire sont des globules de mâchefer, les particules de couleur sombre sont des poussières volantes de coke éclatées ou en forme de sphère creuse.

A part la teneur en carbone, la composition chimique des poussières volantes correspond presque exactement à celle du mâchefer d'où elles proviennent. On peut fixer le début du frittage à environ 800 °C. La surface spécifique est d'environ 2 à 300 cm²/g et le poids spécifique est d'environ 2,65. On peut admettre que la granulométrie moyenne des poussières volantes est de 40 à 50 μm.

Afin de trouver une utilisation judicieuse à ces cendres volantes, l'Institut des pierres et terres de la TH, Clausthal a procédé à des recherches approfondies :

- a) en vue de déterminer les matières premières dont elles sont formées,
- b) en vue d'étudier leurs possibilités technologiques d'emploi.

Divers types de cendres volantes de la Ruhr, de la région d'Aix-la-Chapelle et de la Sarre ont été étudiés aux trois points de vue suivants :

1. Spectre granulométrique: sur ce point, les trois types de cendres volantes se sont révélés à peu près analogues.
2. Analyse chimique: ici encore on ne constate guère de différences.
3. Ramollissement et gonflement: ici on constate des différences très considérables. Dans chacune des régions mentionnées, un type de cendres volantes présentait un indice de gonflement que l'on pouvait qualifier de bon à très bon, tandis que d'autres cendres volantes des mêmes régions ne gonflaient guère ou pas du tout.

Des recherches encore plus poussées ont montré qu'il pouvait exister un rapport entre le gonflement et la teneur en carbone qui est plus ou moins élevée selon les fractions.

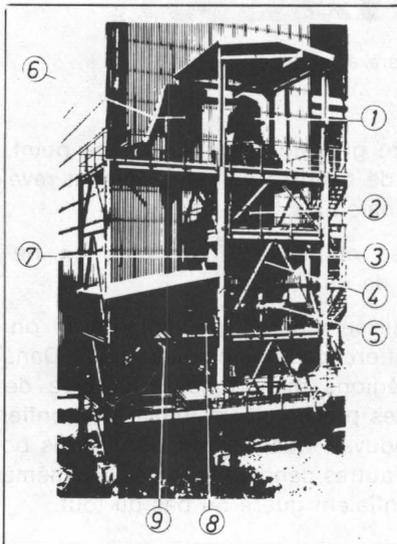
C'est ainsi que, dans le cas des cendres volantes de la Ruhr, on a constaté, dans la fraction granulométrique 0 - 60 μm, la proportion de carbone variait entre 2,5 et 6,5 en % pondéral, tandis que, au delà de 60 μm, plus de 70 % des cendres volantes étaient constituées par du carbone. Le test bien connu du pourcentage de matières combustibles a permis d'obtenir pour différents échantillons moyens de ces cendres volantes des chiffres allant de 8 à 12 %.

Les travaux à l'échelle technique effectués alors dans le même Institut, de même que les essais d'agglomération par frittage du Steinkohlenbergbauverein réalisés en coopération avec une entreprise, ont montré qu'il était possible d'obtenir, par pelletisation suivie de frittage, un agrégat léger répondant de façon optimale à toutes les conditions exigées.

Si un tel procédé réussissait à s'imposer et qu'une utilisation raisonnable devait ainsi être trouvée pour les cendres volantes, le fonctionnement du foyer des chaudières serait facilité et une contribution non négligeable serait ainsi apportée à la lutte contre la pollution atmosphérique.

En coopération avec une entreprise et la centrale thermique d'une société minière, les plans d'une installation d'agglomération par frittage des cendres volantes ont alors été dessinés. Cette installation a ensuite été construite et mise en service.

On trouvera ci-dessous une description succincte de la structure et du mode de fonctionnement de cette installation.



1. Broyeur
2. Crible classeur
3. Trémie des matières combustibles
4. Trémie des produits agglomérés à recycler
5. Transporteur à vibration
6. Dépoussiéreur à cyclone
7. Trémie des cendres volantes
8. Mélangeur à vis sans fin
9. Plateau de pelletisation.

Fig. 9 – Installation expérimentale d'agglomération par frittage de cendres volantes.

Les cendres volantes recueillies dans les électrofiltres d'une chaudière de 240 t/h à foyer-cyclone à cendres fondues, qui retournent normalement dans le foyer, sont envoyées par un système pneumatique dans une trémie collectrice (7). A côté de cette trémie, il existe deux autres trémies pour les matières combustibles et pour les agglomérés à recycler de granulométrie 0 - 4 mm (3 et 4). Comme, d'une part, le processus d'agglomération ne se déroule de façon optimale que lorsque les cendres volantes ont une teneur en carbone de 6 à 8 % (lorsqu'elle est moindre, on n'atteint pas la température nécessaire à l'agglomération; lorsqu'elle est supérieure, il se produit une fusion inopportune des cendres volantes) et que, d'autre part, par suite de l'allure de la chaudière, de la nature du charbon brûlé, etc., il est impossible d'éviter des variations de la teneur en carbone des cendres volantes, il faut mêler à ces cendres, pour obtenir une qualité constante des agglomérés, les quantités nécessaires de substances inertes (matières combustibles ou agglomérés à recycler). Les cendres volantes et le poussier de coke ou les agglomérés à recycler sont puisés dans les trémies au moyen d'un transporteur à vibrations (5) et mélangés dans une vis sans fin disposée en aval (8) avec addition de la quantité d'eau nécessaire. Le mélange passe ensuite, pour être aggloméré, sur un plateau de pelletisation (9), puis sur une bande transporteuse qui achemine les pastilles jusqu'au point de chargement de la bande de frittage. Deux autres trémies renferment, d'une part, les agglomérés de granulométrie supérieure à 15 mm, d'autre part, les agglomérés prêts pour la vente, de granulométrie comprise entre 4 et 15 mm. Tandis que cette dernière est déchargée sur un camion au moyen d'un plan incliné, les agglomérés de plus de 15 mm qui doivent servir de fausse grille pour protéger les barreaux de la grille de la bande contre les températures d'agglomération trop élevées, sont acheminés par une seconde bande transporteuse jusqu'au point de chargement de la bande de frittage. Celle-ci est disposée à proximité immédiate de la fosse où tombe le mâchefer de la chaudière à cyclone. L'énergie nécessaire à l'allumage est fournie, au choix, par un système de chauffage au gaz alimenté en gaz de cokerie, ou par des gaz chauds du foyer amenés par une conduite sur les matières à agglomérer.

Cette conduite est équipée d'un registre de gaz chaud, de telle sorte que la bande de frittage peut être arrêtée instantanément sans que la marche de la chaudière soit perturbée. Les gaz brûlés pendant le frittage sont évacués dans des canaux disposés sous la bande par un ventilateur de triage induit et amenés dans le circuit des gaz de fumées de la chaudière, en amont de l'électrofiltre.

Les pellets frittés sont amenés par un transporteur à plaques jusqu'à un broyeur (1) et de là, à travers un crible classeur (2), dans les trémies déjà mentionnées, où ils sont classés; ceux dont la granulométrie est supérieure à 15 mm servent de fausse grille, ceux de 4 à 15 mm constituent les agglomérés finis et ceux de 0 à 4 mm sont recyclés.

Lors de la mise en service de l'installation, on s'est d'abord, heurté aux difficultés à prévoir avec des installations pilotes et on a été obligé d'en modifier certains éléments. En l'espèce, les travaux suivants ont été effectués :

L'angle de déversement des trémies de cendres volantes et d'agglomérés à recycler était trop plat (45°, de telle sorte qu'il se produisait constamment des réactions de pontage qu'il fallait éliminer en secouant l'appareil. Mais cette manœuvre provoquait des avances brusques du matériau, qui engorgeait le mélangeur aval et le plateau de pelletisation. L'inclinaison des trois parois d'écoulement a été modifiée de telle manière que celles-ci puissent former un angle de 30° par rapport à la verticale, la 4e paroi étant verticale. Cette position angulaire s'est révélée optimale pour les cendres volantes.

Initialement, on avait installé, pour le dosage des quantités récupérées de cendres volantes et d'agglomérés à recycler, de petits tubes transporteurs à vibrations dont l'amplitude pouvait être modifiée progressivement. Toutefois, quelle que fût l'amplitude choisie, la quantité de produit qui passait correspondait toujours au maximum de la capacité des tubes

et de la trémie. Comme il n'était pas possible, au moyen de cette méthode, de doser avec précision les cendres volantes et les agglomérés à recycler, les transporteurs à vibrations ont été remplacés par des alimenteurs réglables à roues cellulaires. Ceux-ci laissent passer un débit maximal de 6 m³/h pour un intervalle de réglage de 1 à 6 m³/h. En ce qui concerne les pellets, il est apparu préférable de régler les trois racloirs disposés dans le quadrant supérieur droit du plateau de pelletisation à un niveau suffisant pour assurer la formation d'un dépôt d'environ 15 mm d'épaisseur. Sur ce dépôt relativement rugueux, le matériau s'agglomère plus facilement en pellets et, en outre, l'usure prématurée du fond de l'appareil est évitée.

Les essais ont montré que, si l'on observe exactement les paramètres qui régissent la grosseur et la qualité des pellets, tels que la vitesse de rotation du plateau, son inclinaison, le rapport cendres volantes/agglomérés à recycler et la quantité d'eau ajoutée, la pelletisation s'opère sans difficultés et n'exige donc que peu de surveillance. Comme nous l'avons déjà indiqué, il faut, pour que l'opération de frittage se déroule dans des conditions optimales, que la teneur en combustibles des pastilles crues soit de 6 à 8%. On a constaté, au cours des essais, qu'un dépassement de cette limite provoquait la formation de gâteaux agglomérés si solides qu'ils ne se brisaient même pas en tombant d'une hauteur de 1,50 m. Si la teneur en C est inférieure à 6%, le matériau chargé sur la bande de frittage n'est pas parfaitement aggloméré.

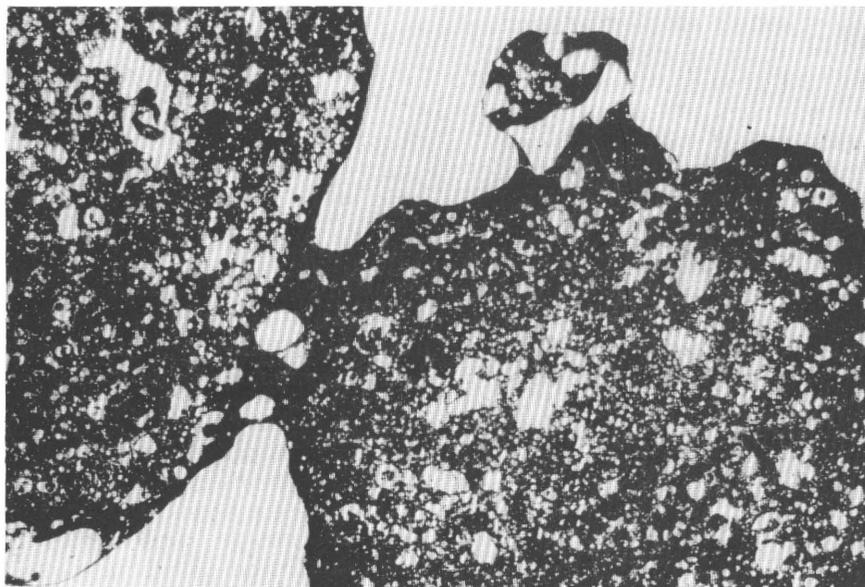


Fig. 10 — Assemblage de deux pastilles de cendres volantes agglomérées dans une brique creuse liée avec du ciment. — Coupe polie.

Ainsi que nous l'avons dit, l'étude des utilisations possibles des produits frittés obtenus a été effectuée par l'Institut für Bauforschung de l'AT, Aix-la-Chapelle

La figure 10 montre un assemblage de pastilles dans une brique creuse fabriquée à partir d'agglomérés finis. En ce qui concerne la résistance à la compression, des briques creuses soutiennent parfaitement la comparaison avec les agglomérés de pierre ponce. Mais elles présentent en outre l'avantage d'être un peu plus légères. Les séries d'essais n'étant pas encore achevées, on ne peut pour le moment donner de chiffres précis.

Les caractéristiques des agglomérés obtenus sont les suivantes :

- 1 Densité en vrac entre 0,6 et 0,7 t/m³
- 2 Bande granulométrique de 4 à 15 mm, dont environ 50 à 75 % correspondant à la taille souhaitée par les acheteurs (8 à 10 mm).
- 3 Possibilité de charge des pellets considérés isolément 150 à 200 kgf et
- 4 Résidu d'environ 85 %

Le prix de vente de ce matériau est actuellement de 13 à 15 DM/t, le prix de revient étant de l'ordre de 8 à 10 DM/t.

D'après les essais décrits, il est possible de trouver une utilisation économiquement intéressante, avec la garantie de débouchés réguliers, même s'il s'agit de grandes quantités, aux cendres volantes comprenant 6 à 8 % d'éléments combustibles et à celles qui ne s'écartent que peu de cette proportion, par excès ou par défaut. Actuellement, des essais sont en cours pour traiter également les cendres volantes qui ne répondent pas aux conditions indiquées, c'est-à-dire qui comprennent plus de 8 % d'éléments combustibles, de façon à produire également un agrégat léger par pelletisation suivie de recuit dans un four rotatif, ceci pour éviter que les pastilles ne s'agglomèrent en un gâteau et pour garder intacte la pellicule entourant les pastilles. L'avantage résiderait dans la suppression des dispositifs mélangeurs utilisés pour maintenir une certaine proportion de combustible et dans le fait que, grâce à la pellicule entourant les pellets, une quantité moindre de ciment suffirait pour lier les pellets employés par exemple dans la confection d'éléments préfabriqués en béton léger. Toutefois, ces essais en sont encore à un stade initial, de telle sorte qu'il serait prématuré d'indiquer ici certains résultats obtenus.

Les procédés appliqués jusqu'à présent en Allemagne pour valoriser et utiliser le mâchefer et les cendres volantes ont fait entrevoir des possibilités dont cer-

taines sont techniquement réalisables, mais, en même temps, ils ont fait apparaître nettement les difficultés qui s'opposent à l'application industrielle de ces procédés

Le problème des limites d'utilisation des matériaux réfractaires a, par exemple, joué un grand rôle dans le procédé du «four de refonte du mâchefer» et dans celui du «four à arc». De même, le risque accru de dérèglement des générateurs de vapeur, lié à l'emploi des procédés indiqués lorsque les appareils font partie intégrante de la chaudière est aussi, en fin de compte, un obstacle à l'emploi de tels procédés

On peut considérer comme prometteuse la possibilité de transformer le mâchefer, par refroidissement lent, en matériau utilisable, d'autant plus que ce procédé présente un grand avantage, en ce sens que les dépenses d'installation sont peu élevées, que le coût de l'énergie est nul et qu'il est absolument certain que le fonctionnement de la chaudière ne peut être perturbé

Le procédé de la «bande de frittage», bien que techniquement applicable, présente l'inconvénient d'exiger une matière première de qualité déterminée, car on a constaté que seules les cendres volantes ayant une teneur en carbone de 6 à 8 % permettent d'obtenir des agglomérés de qualité optimale

Dans ces conditions, il est douteux, si le prix du produit est fixé à 15 DM/t au maximum, que l'on puisse amortir dans un délai raisonnable le coût de l'installation d'homogénéisation, qui s'ajoute aux frais de construction de la bande de frittage

Si les expériences d'agglomération par frittage des cendres volantes réalisées par la Bergbau-Forschung dans un four rotatif devaient être couronnées de succès, le coût de fabrication serait notablement réduit par rapport au procédé utilisant la bande de frittage.

Les avantages et les inconvénients des divers procédés que nous venons d'esquisser sont récapitulés à la fin du présent rapport.

TRAVAUX RÉALISÉS EN FRANCE

Alors qu'en RFA les partisans de la chaudière à chambre de fusion et les partisans de la chaudière sèche continuent à s'affronter, en France presque tous les générateurs de vapeur chauffés au charbon sont conçus comme des chaudières sèches. Comme les cendres de foyer sont peu abondantes et que, du fait de leur composition chimique et de leurs caractéristiques physiques, elles peuvent être employées sans difficulté pour les usages les plus divers, le problème qui se pose dans les centrales thermiques françaises est celui de l'élimination des cendres volantes qui sont produites en grandes quantités.

Chaque centrale thermique en produit, en moyenne 200 t/j et les terrils dépassent actuellement 5 millions de tonnes.

Les règlements français en matière de construction des routes et de construction au-dessus du sol laissent à chaque entrepreneur plus de liberté dans le choix des matériaux que les règlements allemands, de sorte que l'on a pu, en France, entreprendre simultanément une étude fondamentale des cendres volantes et en expérimenter l'utilisation à l'échelle industrielle

En France, les recherches sur l'utilisation de cendres volantes ont lieu au «Laboratoire de minéralogie de la Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse» et au «Laboratoire du centre d'études et de recherches de l'industrie des Liants Hydrauliques», sous la responsabilité du «Centre d'études et de recherches des Charbonnages de France»

Les recherches se divisent en recherches chimiques, physico-chimiques et technologiques

En vue de l'utilisation simultanée des cendres volantes dans la construction des routes, un groupe d'étude composé de producteurs de cendres, de représentants des autorités compétentes et de ceux de l'administration des ponts et chaussées a été institué.

RECHERCHES EN LABORATOIRE

L'analyse chimique courante des cendres volantes de houille montre que leur composition est relativement constante. Des études de solubilité ont montré que diverses fractions des cendres réagissent différemment. En outre, on a pu constater, lors de prélèvements à la centrale thermique effectués dans la direction des fumées, que la teneur en Fe_2O_3 , CaO et MgO diminue à mesure qu'on s'éloigne de la chambre de combustion alors que la teneur en Al_2O_3 varie en sens contraire, de même que la solubilité dans la soude diminue avec l'éloignement de la chambre de combustion et que le rapport SiO_2/Al_2O_3 se réduit

Un autre fait marquant est le rapport qui existe entre une forte teneur en TiO_2 et une forte solubilité des cendres dans l'eau. Cette tendance à la diminution de la solubilité des cendres à mesure qu'on s'éloigne de la chambre de combustion a trouvé son explication à la suite d'essais par analyse thermique différentielle, qui ont montré que la proportion d'éléments vitreux contenus dans les cendres diminue d'autant. C'est cette proportion d'éléments vitreux qui semble être essentiellement responsable de l'effet pouzzolanique

Afin de déterminer la composition chimique de différents grains de cendre, et notamment celle des éléments vitreux, on s'est servi d'une micro-sonde, dite sonde Castaing

Cette sonde fonctionne par bombardement d'une particule de cendre au moyen d'un faisceau électronique, cette particule émettant ensuite des rayons X

Après étalonnage sur un témoin, il est possible de déceler ainsi la présence de tous les éléments du système périodique, à l'exception des quatre premiers

Il est possible de procéder à une détermination quantitative des éléments décelés, par comparaison de l'intensité du rayonnement avec celle d'un témoin. L'analyse des différents grains montre que la composition de la substance vitreuse varie d'un grain à un autre, et même à l'intérieur du même grain, ce qui est une conséquence de la rapidité du passage à travers la flamme, qui interdit toute diffusion. La phase vitreuse contient 0 - 7 % de K_2O et de MgO , en proportion variable. En outre, on a décelé la présence de minéraux, notamment du quartz et de la mullite

Le tableau suivant indique la composition chimique de différents grains de cendre

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO
58,0	36,1	3,0	2,0
53,1	33,1	6,3	—
51,1	42,9	5,1	—
43,5	24,2	9,6	18,4
42,5	30,2	12,9	7,0
42,1	29,3	17,9	4,6
42,1	24,2	26,8	—
42,0	29,5	20,8	—

Comme le montre le tableau, les chiffres de SiO_2 et Al_2O_3 varient dans les limites relevées lors de l'étude du mâchefer. Les chiffres du Fe_2O_3 et du CaO présentent de fortes différences, les teneurs en CaO ayant une importance particulière pour l'utilisation des cendres volantes en poudre dans le ciment

Le comportement de divers mélanges de ciment, dont certains contenaient jusqu'à 30 % de cendres, a été étudié en laboratoire

L'étude à la sonde électronique montre que les grains de cendre sont attaqués à leur périphérie et que la phase vitreuse est réactive à l'intérieur d'un large intervalle de composition différente. Dans le mélange de ciment, la chaux et l'alumine du clinker cristallisent rapidement dans les interstices qui, au début, sont remplis d'eau. La silice diffuse beaucoup plus lentement et seulement au bout de quelques

mois, ainsi que l'ont montré des études de mélanges de cendres et de chaux

Les ciments français normalisés peuvent contenir jusqu'à 20 % de cendres volantes :

CPAC	400	}	5 - 10 %
CPAC	325		
	ou		10 - 20 %
CPAC	250		

D'autres ciments, non normalisés, contiennent une proportion bien plus élevée de cendres volantes, notamment ceux qui sont composés d'un mélange de clinker, de laitier de haut fourneau, de cendres et de plâtre

Les 28 premiers jours, la résistance du béton diminue à peu près proportionnellement au pourcentage de cendres ajoutées au ciment. Elle augmente ensuite à nouveau et dépasse même les chiffres atteints sans addition de cendres

Au bout de 28 jours, le béton dans le ciment duquel on a incorporé 10 % de cendres est aussi résistant que celui dont le ciment ne contient pas de cendres. Si, pour la fabrication du béton, l'on utilise un ciment contenant 20 % de cendres, on obtient au bout de 3 mois un béton de même résistance que si l'on avait employé du ciment exempt de cendres; si l'on emploie un ciment contenant 30 % de cendres, on obtient cette résistance au bout d'un an

Si l'on ajoute au ciment des cendres volantes, la période au bout de laquelle se produit une fissuration dans la masse est prolongée et cette prolongation est en relation linéaire avec la quantité de cendres ajoutée.

L'addition de cendres volantes a pour effet de diminuer le retrait hydraulique après la prise du béton. Cela s'explique par le fait que le ciment contient presque toutes les bases solubles qui contribuent à augmenter le retrait, tandis que les cendres volantes les absorbent et les rendent insolubles.

La quantité d'eau absorbée par capillarité augmente d'environ 10 à 20 % lorsqu'on ajoute au ciment 10 % de cendres volantes. La résistance au gel diminue légèrement. Néanmoins, on peut l'améliorer par addition d'air.

Pour obtenir un même taux d'air dans le béton, il faut pourtant, lorsqu'il s'agit d'un béton contenant des cendres volantes, ajouter une dose un peu plus élevée de produit entraîneur d'air que lorsqu'il s'agit d'un béton exempt de cendres.

L'addition de cendres volantes améliore la résistance du béton à l'action des eaux corrosives, telles que l'eau de mer et les eaux sulfatées, ce qui est dû probablement à la diminution relative du taux de C₃A

(aluminat tricalcique) dans le mélange, ce produit étant attaqué surtout par les sulfates

Les recherches que nous venons de décrire ici montrent combien il est difficile d'expliquer les propriétés physiques et chimiques complexes des cendres volantes dans les domaines d'application les plus divers. L'explication de l'effet pouzzolanique, par exemple, est de la plus grande importance lorsqu'on utilise des cendres volantes dans les ciments et elle fait l'objet d'autres recherches dans les institutions déjà mentionnées

Utilisation de cendres volantes dans les travaux de terrassement et la construction de routes

Des cendres volantes sont utilisées en assez grandes quantités dans la construction de routes et les travaux de terrassement, tels que les remblais. Les premiers essais de remblayage à l'aide de grandes quantités de ces cendres ont eu lieu sur l'autoroute n° 25, entre Lille et Armentières

Dans le sous-sol de cette autoroute, on a constaté la présence de poches d'eaux au-dessus de la couche de schiste et du limon humide sous-jacent. La couche de schiste est presque imperméable, la roche s'effritant lors du compactage du sol et les éléments à grain fin devenant plastiques. Malgré une bonne compressibilité, la cendre répandue en couche épaisse sur cette couche de schiste était si perméable que, dans les 50 cm de la partie inférieure de la couche, on a relevé après une pluie une teneur en eau de 45 % environ. Pour éviter cet inconvénient, on a, immédiatement après la mise en place des nouveaux remblais, évacué l'eau accumulée par un réseau de tuyaux de drainage en béton poreux. Jusqu'à présent on n'a constaté aucun affaissement des remblais dont le sous-sol est saturé d'eau. On a pu observer qu'un remblai de 4 m de hauteur, assez mal compacté, se tasse de moins de 10 cm en l'espace d'un an et que l'affaissement est pratiquement terminé au cours de cette période.

Jusqu'à présent, le problème de la gélivité des remblais n'a pas été clarifié. L'expérience que l'on a des remblais qui ont résisté à l'hiver montre cependant que la couche supérieure imprégnée d'eau gèle jusqu'à une profondeur de quelques centimètres et que le dégel n'entraîne aucune déformation de la chaussée.

Dans la construction des routes, on a expérimenté jusqu'ici plusieurs mélanges en vue de la constitution des diverses couches: il s'agit de mélanges ternaires à faible taux de cendres, de mélanges ternaires à fort taux de cendres et de mélanges binaires composés de cendres et de ciment.

Dans la région du nord, on a obtenu jusqu'ici des résultats particulièrement satisfaisants dans la consolidation du sous-sol des routes en utilisant un mélange ternaire composé de cendres, de sable et de ciment. La proportion du mélange est de 10 kg de cendres et 5,5 kg de ciment Z 325 pour 100 kg de sable. Ce mélange se conserve 3 heures au maximum avant d'être utilisé, ce qui correspond à une distance de transport d'environ 100 km au plus.

En utilisant un outillage approprié, on obtient, pour une épaisseur de couche de 30 cm, un compactage de 90 % dans les couches supérieures, et de 83 % dans les couches inférieures.

On peut tout aussi bien utiliser des mélanges composés de cendres, de laitier de haut fourneau granulé et de ciment dans la proportion de 50 à 70 % de cendres, 20 à 40 % de laitier et 6 % de ciment, ainsi que des mélanges binaires dont la proportion de ciment est d'environ 7 kg pour 100 kg de cendres.

Ces mélanges permettent de constituer des couches dont le comportement est plutôt rigide qu'élastique. Jusqu'à présent ils ont été employés sans hérisson pour l'infrastructure des routes, en couches de revêtement de 15 à 25 cm d'épaisseur, sur des routes à grand trafic.

Comme nous l'avons dit, la France a l'avantage de pouvoir comparer directement les résultats obtenus en laboratoire avec ceux de la pratique.

La liberté dont jouissent les entrepreneurs dans l'emploi des matériaux de construction permet aux instituts de travailler en vue d'applications essentiellement pratiques et de contrôler immédiatement les effets de leurs essais.

Néanmoins, il ne ressort pas clairement des documents dont nous disposons que les entrepreneurs aient toujours profité de la possibilité qui leur était ainsi offerte.

Récapitulation

Les pays de la Communauté, et notamment la France et l'Allemagne, dépensent annuellement des sommes considérables pour se débarrasser des quantités énormes de cendres volantes et de mâchefer produites dans les générateurs de vapeur alimentés au charbon. En France, 3,7 millions de t de cendres ont été produites en 1967, dont 50 % environ ont pu trouver un emploi rentable. Une grande partie a été utilisée pour la production de ciment et continuera probablement à être absorbée par ce secteur industriel au cours des prochaines années. Aucun des autres domaines d'application déjà mentionnés ne peut être considéré comme un débouché sûr pour les cendres volantes. Si l'on peut citer le chiffre de 4,5

millions de t environ pour la production totale de cendres volantes en France en 1970, il est pratiquement impossible de fournir des précisions au sujet de la répartition du tonnage qui, sur ce chiffre, pourra être employé utilement.

Ceci s'applique également à la RFA, dont la production de cendres et de mâchefer sera, en 1970, de 6,5 millions de t environ, mais qui se trouve dans une situation bien plus mauvaise que la France, puisque aucun secteur industriel n'est disposé à en absorber en permanence de grandes quantités.

Les travaux visant, avec l'aide de la CECA, à rendre utilisables les cendres et le mâchefer ont été menés, en Allemagne et en France, dans une optique différente.

En France, pour les raisons déjà mentionnées, il a été possible de mener de front l'étude fondamentale et l'application pratique, de telle sorte que dans ce secteur, le risque d'accidents par suite de l'emploi incontrôlé et sans discernement de ces matériaux est bien moindre, d'autant plus que ces accidents auraient entraîné des difficultés prolongées d'écoulement. Les règles strictes qui, en Allemagne, s'appliquent à la construction des routes, aux travaux de terrassement et aux constructions au-dessus du sol, n'autorisent l'emploi de cendres et de mâchefer que dans les cas où ces matériaux satisfont aux conditions imposées par les normes.

Il faudrait donc que les travaux des institutions mentionnées, dont certaines sont représentées dans les commissions de normalisation, soient orientés vers la transformation des matériaux à base de cendres et de mâchefer, de manière que ceux-ci puissent répondre aux spécifications imposées par les normes, ces mêmes institutions pourraient également s'attacher à créer les préalables nécessaires à l'élargissement ou à la modification éventuelle des normes en vigueur, dans les secteurs où les cendres et le mâchefer peuvent être utilisés sans traitement préalable.

En France, les recherches ont porté jusqu'ici essentiellement sur les caractéristiques physiques et chimiques des cendres volantes. On s'est efforcé principalement d'expliquer l'effet pouzzolanique. Celui-ci, qui consiste en un durcissement ultérieur des cendres volantes, est d'une grande importance pour leur utilisation dans l'industrie du ciment et du béton, qui est le principal consommateur de cendres volantes.

L'effet en question qui, jusqu'ici, n'a pu être entièrement expliqué, fait l'objet d'autres travaux de recherche réalisés dans les instituts français participant au programme d'ensemble.

En dehors de ces recherches de laboratoire, une certaine expérience a été acquise en matière d'incorporation de cendres volantes dans les revêtements de routes, terrassements et remblais. Dans la construction des routes, des mélanges ternaires à faible taux de cendres, des mélanges ternaires à taux de cendres élevé et des mélanges binaires à base de cendres et de ciment ont déjà été essayés sur des routes à grand trafic, parfois même à titre permanent.

Les cendres volantes se sont de même révélées parfaitement utilisables dans les travaux de terrassement et les remblais, à condition d'appliquer des méthodes de traitement appropriées.

Dans la RFA, comme en France, on a procédé tout d'abord à une étude fondamentale sur le plan physico-chimique. En outre, une grande partie des travaux ont été consacrés à l'étude des conditions de cristallisation du mâchefer de chaudières et l'on peut d'ores et déjà considérer comme résolus les problèmes posés.

C'est ainsi, par exemple, que l'on a pu, par analyse thermique différentielle et en utilisant un microscope à table chauffante, déterminer exactement les températures de formation et le domaine de stabilité des minéraux du mâchefer. Toutes ces recherches en vue de la dévitrification du mâchefer de chaudières ont servi de point de départ aux essais à l'échelle industrielle qui ont été réalisés en coopération avec les firmes et les centrales thermiques intéressées.

Tous les procédés de valorisation du mâchefer de chaudières doivent être adaptés aux conditions particulières de la centrale thermique, c'est-à-dire qu'il ne faut pas perdre de vue que la tâche principale de la centrale consiste à produire du courant.

La sécurité de fonctionnement des chaudières reste donc toujours l'objectif primordial, quel que soit l'intérêt que présente l'élimination des déchets et le profit que l'on peut éventuellement en tirer. Si l'on considère de ce point de vue le procédé du «four de refonte», qu'il s'agisse du four à barreaux de graphite ou de la cuve chauffée directement au moyen d'électrodes plongeant dans le mâchefer, les considérations suivantes montrent clairement qu'il est extrêmement peu probable que les centrales adoptent un tel procédé.

Le four de refonte a été construit à une époque où le prix du fer contenant 25-30% de silicium était encore relativement élevé et où l'on ne pouvait ignorer les difficultés d'une extraction séparée de cet élément. De surcroît, l'enrichissement en silicium du fer obtenu au taux maximal réalisable de 30% exige des températures qui sont à la limite de ce que peu-

vent supporter les meilleurs produits réfractaires existant sur le marché.

Compte tenu de la consommation de courant nécessaire pour produire du ferro-silicium selon les procédés traditionnels — les chiffres indiquent 6 000 kWh/t environ pour un FeSi à 45% —, il n'en faudra pas beaucoup moins pour produire une tonne de fer silicié à 25-30%, soit 4 000 kWh/t environ, puisque la consommation augmente à mesure que s'accroît la proportion de silicium du FeSi.

La tendance à l'automatisation que l'on observe généralement dans les centrales thermiques et l'économie de frais de main-d'œuvre qu'elle permet de réaliser s'opposent à l'adoption de ce procédé, car le fonctionnement d'un tel four de refonte exige l'intervention d'équipes d'ouvriers qualifiés.

Le procédé «à l'arc», qui permet de produire un matériau de haute qualité et qui exige encore une consommation plus forte de courant, n'est pas non plus de nature à résoudre le problème de l'élimination des cendres et du mâchefer.

Le problème de l'encombrement, qui résulte de la nécessité de disposer le four à arc sous la fosse de récupération du mâchefer, ne peut être résolu de façon satisfaisante que dans les nouvelles centrales, où l'emplacement de ce four, qui doit être très haut, est déjà prévu dans les plans. Dans presque toutes les centrales déjà existantes, il y a trop peu de place sous la fosse à mâchefer pour y installer le four.

Le produit obtenu par ce procédé, bien que d'excellente qualité, n'a qu'un domaine d'application relativement réduit. Il ne semble guère possible d'écouler ne serait-ce que la production annuelle de mâchefer d'une seule unité de 1 000 MW. Les dépenses d'investissements et de fonctionnement d'un tel four sont très élevées et il faut prévoir un large délai d'amortissement.

Techniquement parlant, le procédé présente moins de difficultés qu'un four de refonte, mais il ne semble pas cependant qu'il doive susciter beaucoup d'intérêt parmi les exploitants de centrales.

Comme nous l'avons dit, il semble que les constructions au-dessus du sol et la construction de routes soient les secteurs industriels les mieux placés pour offrir un débouché durable au mâchefer et aux produits à base de mâchefer, même s'il s'agit de grandes quantités. Les matériaux obtenus par refroidissement lent et contrôlé du mâchefer rentrent certainement dans cette catégorie. Ce procédé présente les avantages suivants.

- 1) Les récipients traversent la fosse de récupération du mâchefer sans qu'il soit nécessaire d'enlever le dispositif de décrassage par voie humide,

c'est-à-dire que la sécurité de fonctionnement de la chaudière est assurée en cas de défaillance de l'installation

- 2) Les dépenses d'investissement sont si faibles qu'une installation prévue pour une chaudière de 250 t/h, permettant de tirer un profit de 8 DM/t de la vente du matériau, peut être amortie en un an au maximum
- 3) Grâce à l'originalité du procédé, les frais d'énergie et d'usure sont nuls et il semble qu'il n'y ait pas besoin de plus de personnel que n'en exige un dégraisseur par voie humide
- 4) Le produit obtenu n'est pas destiné à un usage spécifique; il s'agit d'un matériau qui, broyé et criblé, peut servir à 100 % aux usages les plus variés, et cela toujours en grandes quantités

Il convient naturellement de souligner que ce procédé ne constitue pas non plus une solution exclusive, car la production d'une seule grande unité thermique suffit à couvrir les besoins posés par la construction des routes et les constructions au-dessus du sol dans tout le voisinage immédiat; c'est là un inconvénient qui se fera sentir particulièrement dans les zones de concentration industrielles

C'est dans les centrales thermiques que ce procédé a les plus grandes chances d'être adopté, la meilleure preuve que l'on peut en fournir est le fait qu'une centrale thermique et un gros fabricant de chaudières construisent actuellement à leurs frais l'installation pilote

Ce qui a été dit jusqu'à présent des procédés de valorisation du mâchefer s'applique naturellement aussi à ceux qui visent à rendre utilisables les cendres volantes; la sécurité de fonctionnement de la chaudière doit être considérée comme prioritaire. C'est la raison pour laquelle il a fallu très vite abandonner l'idée de produire des agglomérés de cendres volantes à partir de cendres pelletisées sur une bande de frittage, en utilisant la chaleur dégagée par le mâchefer en fusion amené sur le chargement de pellets

L'essai a donc été poursuivi sur la bande de frittage à l'aide d'un chauffage au gaz de cokerie. Le procédé est techniquement applicable, mais seulement pour des cendres ayant une teneur en carbone de 6 à 8 %. La situation géographique d'une centrale thermique par rapport aux produits concurrents que sont la pierre ponce naturelle et le laitier expansé détermine, dans une large mesure, la rentabilité d'une bande de frittage qui serait installée à cet endroit.

Un grave inconvénient du procédé est la faible amplitude de variation de la teneur en carbone, qui doit être respectée si l'on veut obtenir un aggloméré de bonne qualité. En fait cette condition ne peut être remplie que par les centrales qui assurent en permanence la charge de base et dont l'approvisionnement en charbon ne varie que dans d'étroites limites. Comme ce n'est pas le cas pour la grande majorité des centrales, il semble que celles que le procédé intéressera ne seront pas nombreuses.

La Bergbau-Forschung examine actuellement s'il serait possible, à l'aide d'un four rotatif d'un type connu dans l'industrie du ciment, de traiter aussi des cendres volantes à teneurs en carbone plus fortes pour en tirer des agglomérés utilisables. Les premiers essais réalisés avec un tambour rotatif de petites dimensions ont donné des résultats encourageants. Si ces résultats devaient se confirmer dans un tambour de plus grandes dimensions, on disposerait d'un procédé permettant, moyennant des techniques et un mode de fonctionnement connus et au prix de quelques travaux de développement, de produire un matériau pouvant être employé non seulement à la fabrication d'agglomérés en béton léger, mais aussi comme élément entrant dans la composition du béton utilisé pour la fabrication des ouvrages d'art.

On peut dire en résumé que, malgré de nombreux mécomptes et au prix de dépenses élevées, les travaux entrepris jusqu'ici par les entreprises communautaires CERCHAR et Steinkohlenbergbauverein avec l'aide de la HA de la CECA, ont permis d'acquies en matière de cendres et de mâchefer de nombreuses connaissances et une expérience à laquelle les entreprises des États membres peuvent maintenant recourir en cas de besoin, sans devoir elles-mêmes entreprendre des recherches.

**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			
	Deuxième journée d'information du 10 février 1967 à Luxembourg	1967	a, f	2,50
13909	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			
11486/2/66/1	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 de 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 «Packard» à tube d'eau alimentée à charbon pulvérisé	1966	a, f	1,50
14057	N° 7 Dégagements instantanés I — CERCHAR	1966	a, f	1,50
14059	N° 8 Dégagements instantanés I — INOWAR	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 Télécontrôle 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			
	N° 17	1969	en préparation 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)		en préparation	
15745	N° 20 Recherches fondamentales sur la chimie et la physique des charbons et des cokes — Rapport de synthèse I	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 des 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
15791	N° 29 Recherches fondamentales sur la chimie et la physique des charbons et des cokes — Rapport de synthèse 1965-1967	1969	a, f	1,50
16353	N° 30 Essais d'explosion avec des arrêts-barrages et des barrages d'isolement	1970	en préparation	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

Des exemplaires supplémentaires du présent recueil tout comme les publications mentionnées plus haut peuvent être commandés à

Office des ventes des publications des Communautés européennes
37, rue Gleesener
LUXEMBOURG/Gare, Case postale 1003

