

Four à lit fluidisé en circulation *

par H. W. Schmidt, L. Plass,
P. Broedermann et V. Petersen

(Société Lurgi Chemie, Gervinusstrasse 17/19, B.P. 11 91 81,
D. 6 000 Francfort-sur-le-Main 2, R.F.A.)

1. Introduction

Malgré les efforts de recherches intensifs s'étendant sur plus de 50 années, le développement dans la technologie du lit fluidisé est loin d'être arrivé à son terme. Les publications et les brevets (il y en a plus de mille chaque année) dans les domaines les plus divers d'application et de recherche sont là pour en témoigner. Lurgi travaille depuis plus de 30 ans dans les multiples domaines de la technologie du lit fluidisé, les applications les plus connues étant les suivantes : grillages des pyrites et des concentrés de métaux non-ferreux, combustion des schistes bitumineux et incinération de différents types de boues industrielles.

Le lit fluidisé en circulation constitue, depuis le début des années 50, une nouvelle étape du développement entrepris chez Lurgi. La première application de la technique du lit fluidisé en circulation, à l'échelle industrielle, fut la calcination de l'hydroxyde d'aluminium en oxyde d'aluminium dans le cadre de la fabrication de l'aluminium.

Grâce à ce procédé, il est possible d'économiser jusqu'à 30 % d'énergie par rapport au procédé moderne utilisant un four rotatif. Du fait de ses avantages, après avoir fait ses preuves dans sept installations de l'industrie de l'aluminium, le lit fluidisé en circulation pénètre dans différents autres secteurs.

2. Vue d'ensemble des différents systèmes gaz-solide

Les différents types de lit fluidisé peuvent être caractérisés d'une manière qualitative selon le schéma représenté sur la figure 1. L'expansion du lit fluidisé croît en même temps que la vitesse moyenne du gaz de fluidisation. Ce faisant, le type de fluidisation évolue et passe du lit fluidisé classique avec une surface définie au lit fluidisé en circulation, puis au réacteur à transfert pneumatique, qui se caractérise par des vitesses de gaz extrêmement élevées.

Le « lit fluidisé en circulation », connu sous la désignation de « fast fluidized bed » chez les anglo-américains, est utilisé pour des particules fines ayant une taille moyenne comprise entre 50 et 800 microns. Le lit fluidisé en circulation est caractérisé par le fait que les vitesses des gaz sont notablement plus élevées que dans les lits classiques ; il en résulte que de grandes quantités de matières solides sont entraînées hors du réacteur avec les gaz. Dans le cyclone, en aval du réacteur, les solides et les gaz se séparent et les solides sont recyclés vers le réacteur.

* Conférence présentée aux Journées sur la technologie des lits fluidisés et dispersés (applications industrielles) organisées, les 22 et 23 octobre 1979, par la Section Centre-Est et les Groupes Chimie analytique et Informatique et automatisation en génie chimique de la Société de Chimie Industrielle.

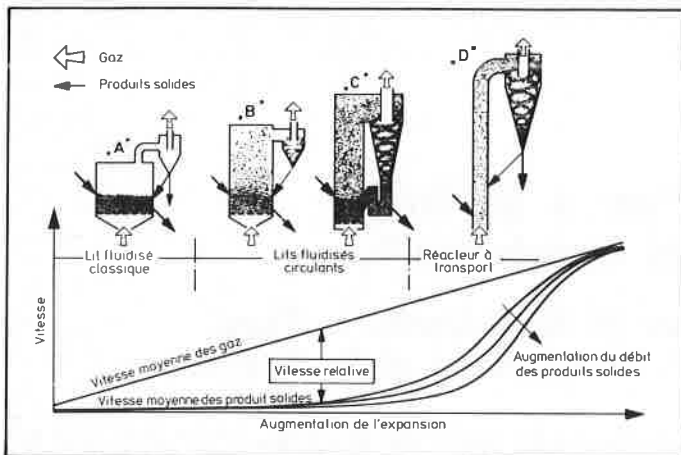


Figure 1. Les principaux systèmes de combustion à lit fluidisé.

La vitesse moyenne des matières solides dans un réacteur à lit fluidisé croît beaucoup plus lentement que la vitesse des gaz, ce qui fait que la vitesse relative s'en trouve augmentée à son tour. L'augmentation des vitesses des gaz entraîne l'instauration d'un régime d'écoulement correspondant à celui d'un réacteur à transfert pneumatique. Ce dernier fonctionne avec des vitesses de gaz extrêmement élevées, de très faibles concentrations en solides et une faible vitesse relative entre les gaz et les solides. Le « lit fluidisé en circulation » constitue ainsi la transition entre, d'une part, le lit fluidisé classique caractérisé par des vitesses réduites pour les gaz et

3. Principe du lit fluidisé en circulation

La figure 2 montre la structure du lit fluidisé en circulation. Ce dernier se compose d'une cuve de fluidisation entièrement remplie avec la suspension gaz-solides. En raison des vitesses élevées des

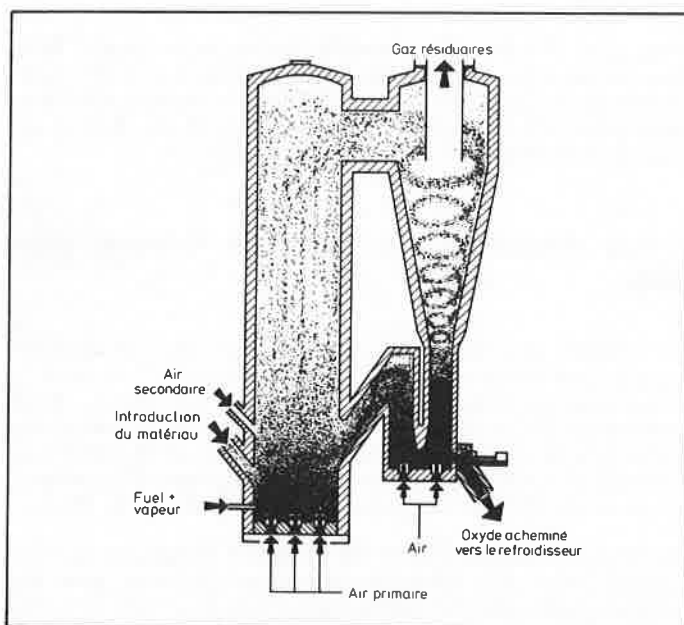


Figure 2. Combustion en deux étapes dans un lit fluidisé circulant.

4. Réactions endothermiques dans un lit fluidisé en circulation

4.1. Critères de sélection

Le point commun à toutes les applications est l'utilisation optimale de l'énergie libérée. Cette énergie est nécessaire pour mener à bien

par une surface de lit définie et, d'autre part, le réacteur à transfert qui se distingue par ses vitesses élevées pour les gaz.

Du fait des vitesses moyennes élevées et de l'importante vitesse relative entre les gaz et les solides, de la finesse des particules et de la densité en produits solides ajustables dans un large domaine, on bénéficie d'excellentes conditions de réaction pour les applications techniques les plus variées.

Si l'on considère le fait que, pour des particules sphériques ayant par exemples une densité de $1\,000\text{ kg/m}^3$, la surface spécifique est inférieure à $1\text{ m}^2/\text{kg}$ pour une granulométrie de 10 mm , et que cette surface spécifique dépasse $100\text{ m}^2/\text{kg}$ si la granulométrie des particules passe à 10 microns , on comprendra le rôle déterminant joué par la granulométrie des particules dans tous les phénomènes de transfert (transferts de chaleur et de matières). Dans chaque cas particulier, il faudra tenir compte de facteurs supplémentaires tels la surface interne des particules par exemple, la diffusion à travers les pores, des modifications dans la taille des particules ou dans leur structure comme c'est le cas dans les processus de calcination ou de combustion. Cependant, les avantages principaux, liés à l'utilisation de produits solides à fine granulométrie dans un système à lit fluidisé en circulation, sont en général les suivants :

- vitesse de réaction élevée en raison des surfaces spécifiques importantes; réduction ou suppression de l'effet inhibiteur sur la réaction, cet effet étant dû aux phénomènes de diffusion.
- vitesses de conversion élevées même avec des temps de séjour courts. On pourra, si nécessaire, choisir les appareils de manière à instaurer des temps de séjour plus longs.
- excellentes conditions pour le transfert de chaleur et de matière. Température très uniforme dans l'ensemble du système gaz-solides.
- débit spécifique élevé par m^2 de grille de lit fluidisé.

gaz, ceux-ci et les solides sont évacués ensemble à la partie supérieure de la cuve de fluidisation, la séparation étant opérée dans un cyclone monté à la sortie de la cuve.

Les solides séparés sont recyclés, en majeure partie vers le bas de la cuve de fluidisation, le reste étant évacué en tant que produit vers le refroidisseur. Selon le type d'applications, le combustible pourra être soit du gaz, soit du fuel, soit encore un combustible solide finement granulé tel que le charbon. La matière est introduite latéralement à la partie inférieure du four. Dans les cas de réactions exothermiques (combustion de schistes bitumineux ou de charbon par exemple) cette matière sert en même temps de combustible.

L'air de fluidisation et de combustion peut être introduit à deux niveaux. L'air primaire sert à la fluidisation dans la partie inférieure du four. Il est injecté d'une manière uniforme grâce à la grille à buses du lit fluidisé. L'air secondaire est introduit latéralement au dessus de cette grille. La combustion est amorcée, à la partie inférieure du four, avec un défaut d'air, autrement dit, le combustible est partiellement gazéifié. Ce n'est que grâce à l'injection d'air secondaire que la combustion est complète dans la partie supérieure du four. Il est ainsi possible de travailler avec un excès d'air très faible, ce qui permet d'obtenir une combustion très douce. La combustion en deux étapes permet, en outre, de réduire considérablement la formation des oxydes NO_x . Le temps de séjour des solides, dans le système constitué par le four et le cyclone de recyclage, est ajustable dans une large plage par l'intermédiaire de la variation de la densité du lit fluidisé.

Après avoir présenté le principe de la calcination, nous allons passer aux domaines d'applications correspondant, selon que les réactions sont endo- ou exothermiques.

la calcination à la température fixée à l'avance sur la base des considérations thermodynamiques. Il en résulte que le produit comme les gaz résiduaires se trouvent à la température de calcination quand ils quittent le système. La chaleur contenue dans

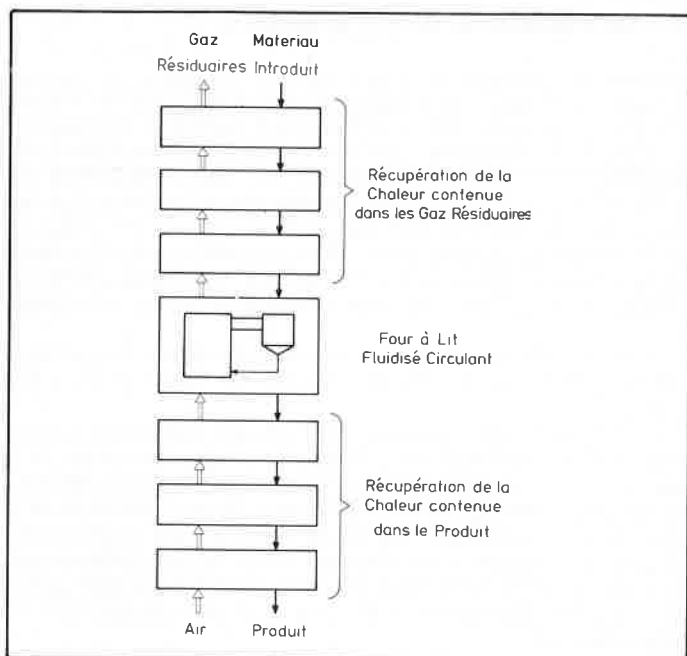


Figure 3. Récupération de la chaleur résiduaire.

les gaz résiduaires sert à préchauffer la matière entrante ; la chaleur contenue dans le produit sert à chauffer l'air de combustion (figure 3).

Les gaz résiduaires circulent à contre-courant par rapport à la matière entrante, et ce, dans un nombre plus ou moins grand d'étages. Ils cèdent ainsi leur chaleur aux solides. Chaque étage se compose d'un réacteur Venturi jouant le rôle d'élément de contact pour le transfert de la chaleur (gaz résiduaires-solides). Un séparateur est monté à la sortie du réacteur Venturi, qui peut être constitué, soit par un cyclone, soit par un électrofiltre au niveau de l'étage d'alimentation. Le nombre d'étages est fixé en fonction des équilibres thermodynamiques, autrement dit sur la base de l'équilibre des températures et des chaleurs de réaction au cas où des réactions chimiques auraient lieu dans les différents étages.

A titre d'exemples, on peut citer le nombre d'étages d'échangeurs de chaleur pour la récupération de la chaleur des gaz résiduaires, dans les cas suivants :

- 1 étage : calcination de l'argile
- 2 étages : l'hydroxyde d'alumine
- 3 étages : magnésie calcaire, dolomie

La chaleur contenue dans le produit est transférée par échange de chaleur direct et indirect dans un lit fluidisé refroidisseur à plusieurs étages. La chaleur est ensuite cédée à l'air de fluidisation froid, injecté par buses dans des chambres en série. Cet air de fluidisation est utilisé dans le processus de calcination en tant qu'air secondaire. Des faisceaux de tubes sont immergés dans les différentes chambres. L'air de combustion primaire s'échauffe en circulant à contre-courant par rapport au flux de matière. La chaleur résiduaire, qui n'est plus utilisable dans le processus de calcination est cédée à l'eau qui circule dans les faisceaux de tubes se trouvant dans les dernières chambres.

La récupération de chaleur résiduaire du processus que nous venons de décrire, permet d'atteindre, dans de nombreux cas, des chiffres de consommation de chaleur défiant toute concurrence et ce pour des domaines d'application les plus divers. Il convient cependant d'adapter le système de calcination dans le lit fluidisé en circulation, qui vient d'être décrit, aux exigences posées aux produits ainsi qu'aux conditions inhérentes aux processus. Pour ce faire, on a le choix entre les solutions suivantes (figure 4) :

- four équipé d'une grille à buses
- four équipé d'une grille à Venturi
- four équipé d'une chambre de combustion et d'une grille à Venturi.

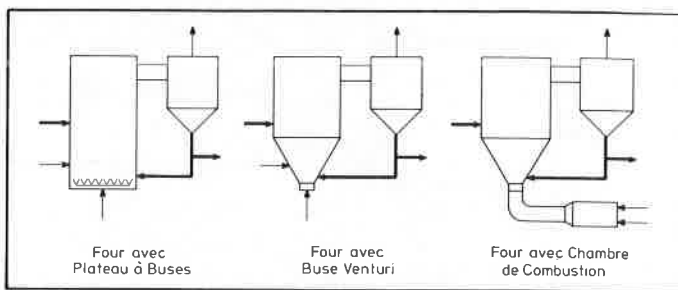


Figure 4. Systèmes de fours à lit fluidisé circulant.

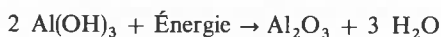
Le four équipé d'une chambre de combustion et d'une grille à Venturi est utilisé lorsqu'il n'est pas possible de faire brûler, d'une manière autonome, le combustible dans le four. La chaleur de réaction nécessaire est alors fournie au four par l'intermédiaire des gaz résiduaires chauds provenant d'une chambre de combustion. Dans les deux autres cas (four avec grille à buses et four avec grille à Venturi) le combustible est injecté directement dans le four pour y être brûlé.

Si l'on exige que le temps de séjour de la matière dans le réacteur soit court, on utilisera une grille à Venturi. A ce système correspond une densité plus faible de la suspension contenue dans le réacteur.

Si l'on exige des temps de séjour prolongés et une grande souplesse de la part du système de calcination, on choisira le réacteur équipé d'une grille à buses. Grâce à la possibilité de faire varier, dans une large mesure, la densité de la suspension dans le four, le temps de séjour de la matière réactive dans le four pourra toujours être adapté aux exigences les plus diverses.

4.2. Application à la calcination d'alumine

Comme nous l'évoquions au début de cet exposé, le principe du procédé que nous décrivons ici avait déjà fait l'objet de travaux de la part de la Metallgesellschaft à Francfort. La coopération qui s'est instaurée, par la suite, entre les Sociétés Lurgi et les Vereinigten Aluminiumwerken (VAW) devait conduire aux premières réalisations à l'échelle industrielle, en passant par une installation pilote à l'échelle semi-industrielle. Du fait de la coopération avec VAW, le premier domaine d'application correspondit à la calcination de l'hydroxyde d'aluminium au cours de laquelle :



L'hydroxyde d'aluminium finement granulé, obtenu par précipitation d'une lessive fortement concentrée en aluminat, est acheminé vers la calcination après avoir été filtré et lavé. (Schéma figure 5). L'eau superficielle et une partie de l'eau d'hydratation liée par voie chimique sont évaporées dans l'un des deux étages de préchauffage. L'eau d'hydratation restante est éliminée dans le four proprement dit et l'oxyde prend sa forme cristalline. La chaleur contenue dans le produit sert à préchauffer l'air primaire et l'air secondaire. Cette chaleur peut, en outre, être utilisée pour préchauffer l'eau de process.

L'application de ce système, dans le domaine que l'on vient de présenter, a permis, outre l'amélioration de la qualité du produit, d'importantes économies d'énergie par rapport au système de calcination classique, le four rotatif. Depuis 1968, sept installations ont été construites dans le monde, d'une capacité totale d'environ 1,8 M.t d'oxyde d'aluminium par an. Sept autres installations d'une capacité totale d'environ 2,5 M.t/an d'oxyde sont en projet.

On peut citer, à titre d'exemple, les chiffres de consommation spécifique de chaleur suivants :

- four rotatif sans récupération de chaleur : env. 5 020 kJ/kg Al_2O_3
- four rotatif avec récupération de chaleur : env. 4 200 kJ/kg Al_2O_3
- système Lurgi de lit fluidisé en circulation : env. 3 140 kJ/kg Al_2O_3

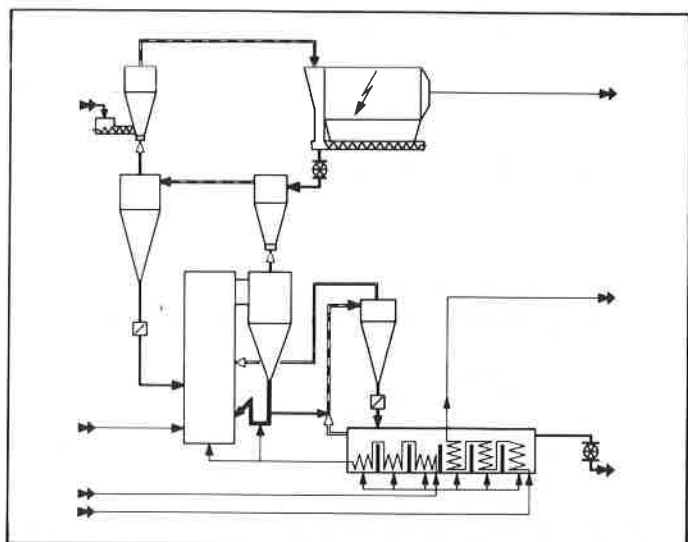


Figure 5. Schéma de principe pour une installation de calcination à couche fluidisée circulante.

Les autres principaux avantages du système Lurgi sont :

- produit de qualité uniforme.
- simplicité d'exploitation de l'installation conjuguée à une grande souplesse au cours des variations des différents paramètres.
- longue durée de vie du briquetage.

Cette brève description de l'application du lit fluidisé en circulation à la production de l'oxyde d'aluminium a été décrite plusieurs fois d'une manière détaillée dans les revues spécialisées.

Les avantages, qui ont été mis en évidence au cours de l'exploitation des installations, montrent que ce procédé pouvait être appliqué avec les mêmes avantages à d'autres matériaux finement granulés, la granulométrie de ceux-ci devant être comprise entre 10 et 1,5 mm.

Outre le domaine d'application considéré ici, le système est également utilisé pour la calcination d'autres matériaux tels que l'argile et le chlorure d'aluminium. Des études relatives à d'autres applications ont été effectuées.

4.3. Décomposition du chlorure d'aluminium

Aluminium Pechiney et Alcan ont mis au point un procédé « acide » permettant de produire de l'oxyde d'aluminium à partir d'argile ou de kaolin. Au cours du développement de ce processus, le système de calcination dans un lit fluidisé en circulation a été appliqué avec succès. La capacité de cette installation est aujourd'hui de 15 tonnes d'oxyde d'aluminium par jour en partant du chlorure d'aluminium hexahydraté. L'exploitation, en continu, de cette installation pendant plus d'un an a montré que la disponibilité, la sécurité d'exploitation et la souplesse vis-à-vis des différentes charges de l'installation en constituaient les avantages principaux.

L'acide chlorhydrique, formé au cours du processus de calcination de $\text{AlCl}_3 + 6\text{H}_2\text{O}$, est absorbé puis recyclé vers l'unité de lixiviation (figure 6).

La poursuite du développement de ce procédé a conduit à adopter une méthode indirecte pour fournir la chaleur nécessaire à la décomposition du chlorure d'aluminium. Ceci a pour conséquence le fait que la concentration en HCl dans les gaz résiduaux de la réaction est sensiblement plus élevée et que ces gaz résiduaux ne contiennent presque plus d'inertes. Il en résulte d'importantes économies au niveau des investissements et des coûts d'exploitation de l'unité d'absorption d'HCl en aval de l'installation de décomposition.

4.4. Calcination de roches carbonatées (figure 7).

Pour la calcination des roches carbonatées finement granulées telles que la magnésite, la dolomie et le calcaire, on utilise le système de calcination équipé d'une grille à buses, comme cela a été indiqué plus haut. Les considérations thermodynamiques montrent qu'il faut trois étages d'échangeurs de chaleur pour récupérer la chaleur contenue dans les gaz résiduaux.

Dans notre installation, à l'échelle semi-industrielle, faisant partie de notre centre d'essais, nous avons calciné ces matériaux pour le compte de différents clients. Les propriétés les plus diverses, exigées pour les produits, ont été obtenues en faisant varier le temps de séjour et la température de calcination. Si l'on compare la calcination classique de la magnésite, telle qu'elle est effectuée dans un four à étages, avec celle qui a lieu dans un lit fluidisé en circulation, les consommations spécifiques de chaleur sont respectivement 6 300 contre 4 200 kJ/kg de MgO, soit une économie d'énergie d'un tiers.

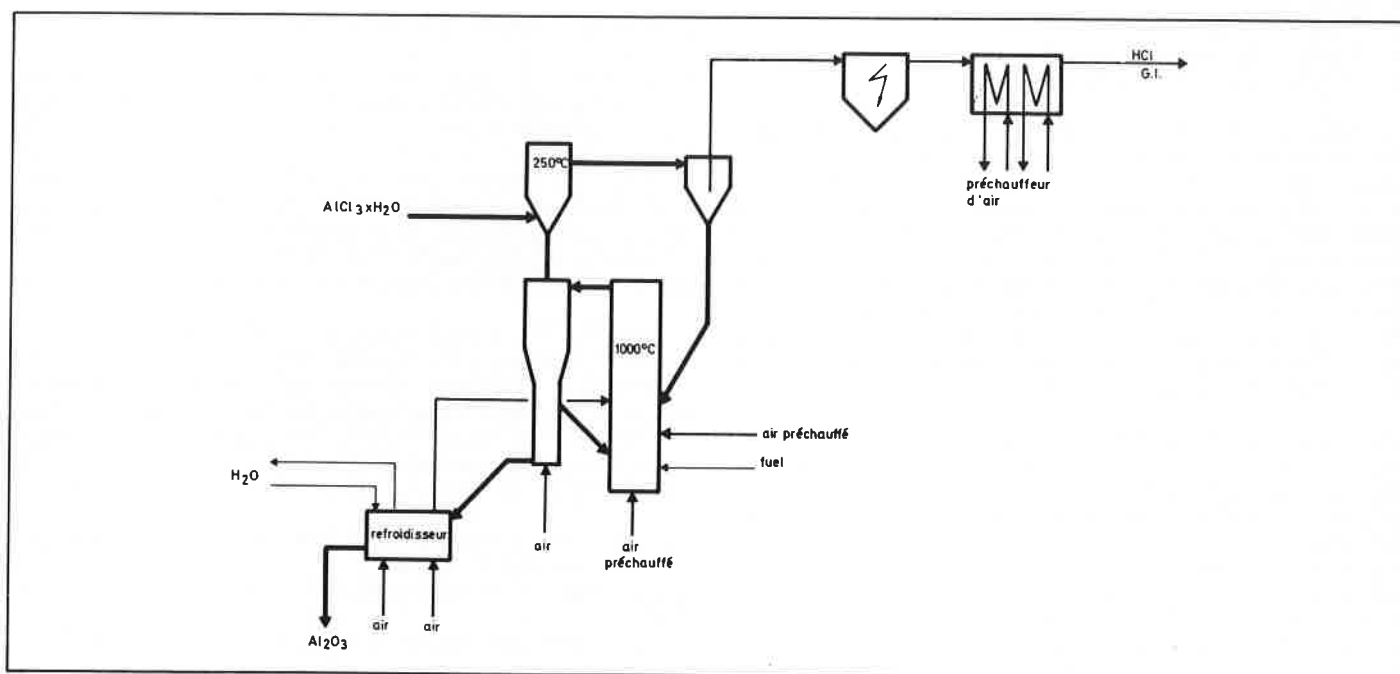


Figure 6. Décomposition-chauffage direct de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

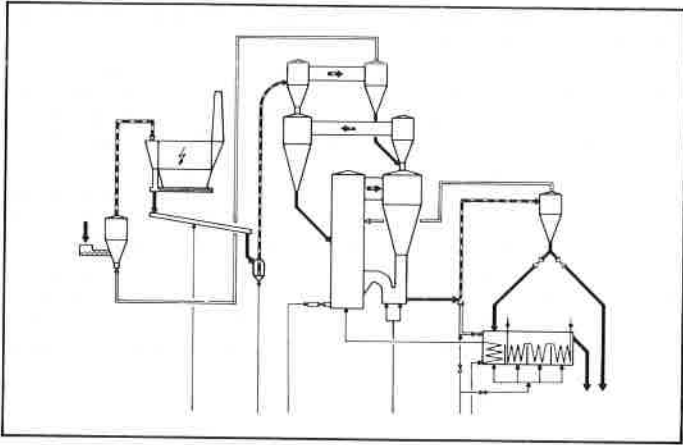


Figure 7. Schéma de principe pour une installation de calcination à couche fluidisée circulante pour le traitement de roches carbonatées.

4.5. Calcination de l'argile

L'argile provenant d'opérations de déblaiement est souvent mélangée à des débris organiques. Ces débris doivent être éliminés

5. Réactions exothermiques dans le lit fluidisé en circulation. Combustion en vue de la production d'énergie

L'expérience que l'on vient d'évoquer, concernant la combustion dans le lit fluidisé en circulation en vue de réalisation des processus endothermiques, conduit à appliquer ce principe aux procédés de production d'énergie basés sur des réactions exothermiques. La tension qui s'est instaurée depuis quelques années sur le marché de l'énergie a fait croître, de plus en plus, l'importance des combustibles fossiles de qualité inférieure. De fait, les hautes teneurs en cendres et en soufre de ces combustibles soulèvent des difficultés si l'on veut utiliser des foyers classiques, et ce pour des raisons qui sont inhérentes à la combustion et aux soucis de protection de l'environnement. On illustrera les avantages du foyer à lit fluidisé et particulièrement ceux du lit fluidisé en circulation par deux exemples caractéristiques.

5.1. Combustion de schistes bitumineux

Le problème qui se pose, en Suède, est d'utiliser des schistes bitumineux contenant entre 75 et 85 % de stériles, avec des pouvoirs calorifiques d'environ 7 500 kJ/kg, de manière à exploiter et à optimiser aussi bien l'énergie latente que les produits minéraux de valeur (aluminium, uranium, soufre, autres métaux) contenus dans ces schistes. Avec une teneur en soufre pouvant aller jusqu'à 7 % et une teneur en carbone d'environ 15 %, ce type de schiste constitue un combustible tout à fait singulier si on le considère par rapport à nos conceptions actuelles. En effet, le comportement de sa combustion se situe entre celui d'un résidu de charbon avec une teneur en soufre et une faible teneur en volatil, celui d'un minerai contenant du soufre et celui des schistes courants. Si l'on voulait brûler ce schiste suédois selon les techniques fondées sur un lit fluidisé actuellement appliquées pour le charbon, avec addition de chaux, il serait nécessaire d'ajouter 0,45 t de calcaire par tonne de schiste pour obtenir un taux de désulfuration de 80 %, en admettant que le rapport moléculaire Ca/S soit égal à 2,5. Abstraction faite de la question de la disponibilité de telles quantités de calcaire, il en résulterait des frais considérables pour la désulfuration ; la totalité du soufre serait liée sous forme de plâtre, une partie non négligeable de l'énergie serait consommée par la calcination du calcaire et la quantité de produits solides à lixivier s'en trouverait sensiblement accrue.

Ces considérations montrent clairement qu'en présence d'un combustible possédant cette composition et si l'on veut atteindre le but du procédé correspondant à l'exploitation intégrale des matières premières, il faut que la combustion se traduise par la libération du soufre sous forme de SO₂, tout comme dans les

au cours d'un traitement ultérieur afin d'améliorer l'aptitude de l'argile à ce traitement. Ceci peut être effectué par calcination à des températures relativement basses. Une autre raison pour entreprendre la calcination consiste en la conversion du kaolin contenu dans l'argile en métakaolin avec élimination des groupements hydroxyles. On modifie ainsi les propriétés de l'argile, ce qui facilite ensuite la lixiviation de celle-ci. Le nombre des étages d'échange de chaleur qu'il convient de prévoir dépend de la température de calcination. On prévoit d'en installer un ou deux.

4.6. Calcination des minerais d'uranium

La calcination des minerais d'uranium constitue une autre application du procédé. Pour ce faire, on calcine le minerai à environ 400 °C afin d'augmenter sa lixivibilité au cours du processus auquel il sera soumis. En raison de la faible température de calcination, qui se trouve en deçà du point d'inflammation de n'importe quel combustible, on utilisera le système du réacteur à Venturi équipé d'une chambre de combustion.

Dans ce cas, le matériau est introduit directement dans le four et calciné. Les gaz résiduels chauds sont acheminés vers une unité de broyage à sec, l'air de combustion est préchauffé dans un lit fluidisé de refroidissement grâce à la chaleur contenue dans le produit. L'air de combustion chaud est envoyé dans une chambre dont les gaz résiduels servent à fournir la chaleur nécessaire à la calcination.

réacteurs de grillage. En ajoutant de l'oxygène à l'air de combustion, il est possible d'augmenter à un tel point la concentration en SO₂ dans les gaz résiduels que ceux-ci seront traités avec un taux de conversion supérieur à 95 % dans une unité de production d'acide sulfurique travaillant suivant le procédé de catalyse à double contact, ce qui permet une désulfuration quasi intégrale des gaz résiduels. La figure 8 montre le schéma de principe de ce procédé.

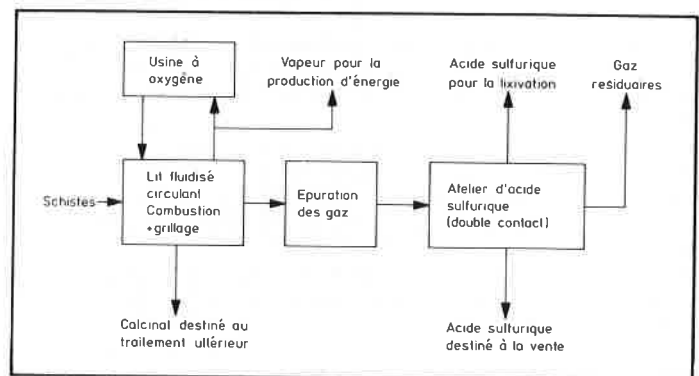


Figure 8. Schéma du procédé de récupération d'énergie et de production d'acide sulfurique à partir des schistes.

Dans le cadre d'essais contractuels effectués pour le compte du groupe suédois LKAB, Lurgi a pu montrer, au moyen d'une installation pilote faisant partie de son centre d'essais et fonctionnant selon le principe du lit fluidisé, que, même en utilisant de l'air de combustion fortement enrichi en oxygène, il était possible de brûler complètement le schiste suédois avec des températures de combustion fixées à l'avance, très uniformes et comprises entre 700 et 950 °C.

Les résidus de combustion obtenus dans ces conditions convenaient très bien au traitement ultérieur par lixiviation. L'exploitation intégrale de l'énergie et des matières premières, contenues dans le schiste dont il vient d'être question, pourrait donc être menée à bien selon le schéma de la figure 9.

Le procédé se caractérise par les points suivants : combustion du schiste au moyen d'air enrichi en oxygène, en deux

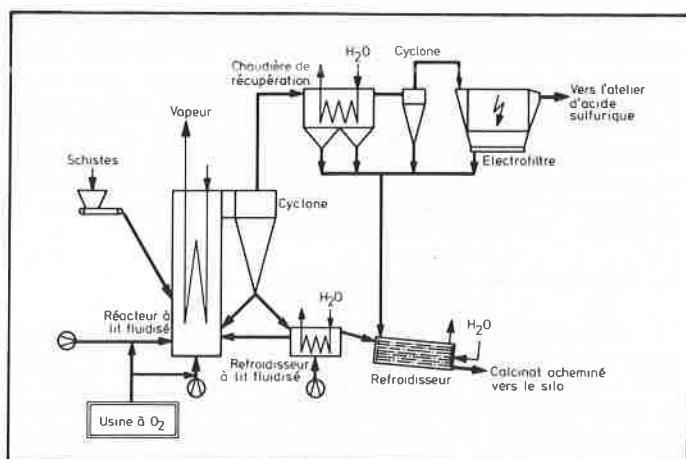


Figure 9. Installation de grillage à lit fluidisé circulant.

étapes dans un lit fluidisé en circulation, le refroidissement des gaz étant assuré par une chaudière de récupération et les résidus de combustion étant refroidis dans un refroidisseur à lit fluidisé équipé de tubes immergés. Le dépoussiérage des gaz résiduels a également été prévu et le traitement de ceux-ci est pris en charge par une unité de production d'acide sulfurique.

La répartition du préchauffage de l'eau, de l'évaporation et de la surchauffe entre les trois sources de chaleur, à savoir le lit fluidisé, le refroidissement des gaz résiduels et le refroidissement des résidus de combustion est fixée de manière à assurer à l'installation une souplesse qui soit aussi grande que possible. Le schéma de principe montre comment la combustion dans le lit fluidisé, en présence d'air enrichi en oxygène, permet d'atteindre les objectifs suivants au cours du traitement des schistes :

1. Exploitation intégrale de la chaleur contenue dans les composants organiques et dans le soufre provenant du schiste, ceci en vue de la production d'énergie (résidu de combustion 0,5 % C, 1 % S).
2. Traitement du schiste à une température uniforme et faible en vue de l'obtention de résidus de combustion se prêtant facilement à la lixiviation et permettant ainsi l'extraction des métaux contenus dans le schiste.
3. Extraction optimale du soufre sous forme utilisable dans le cadre du même processus ou commercialisable.
4. Gaz résiduels en quantités aussi faibles que possible, avec des teneurs en SO_2 et SO_3 faibles, donc peu nocives pour l'environnement.
5. Faibles émissions de NO_x grâce à l'addition, selon une procédure échelonnée, de l'air de combustion, à une température de combustion faible.

Les études de rentabilité ont mis en évidence l'intérêt du schéma de procédé que nous avons présenté. Il semble que l'on soit en droit d'attendre des résultats prometteurs de l'expérimentation à l'échelle industrielle de la technique du lit fluidisé en circulation appliquée à la combustion des schistes. En effet, celle-ci n'a jusqu'à présent pas été entreprise dans une installation de taille suffisamment importante.

5.2. Combustion de charbon

Du fait de la pénurie croissante et de l'augmentation des prix du gaz naturel et du pétrole, on assiste actuellement dans le monde entier à une multiplication des travaux en vue d'utiliser à nouveau le charbon en tant que combustible. A cet égard, il convient cependant de tenir compte de la sévérité accrue de la législation en matière d'émissions de substances nocives.

La combustion dans un lit fluidisé en circulation de charbon à teneurs relativement élevées en cendres et en soufre a déjà été expérimentée avec succès à l'échelle semi-industrielle. Elle possède les avantages suivants :

- 5.2.1. Combustion à basse température (entre 850 et 950 °C), d'où

absence de fusion complète et réduction des effets de corrosion liés aux températures élevées.

- 5.2.2. Le soufre, libéré au cours de la combustion sous forme de SO_2 , est fixé directement par le calcaire ou la dolomie aux températures comprises entre 800 et 950 °C qui sont celles du lit fluidisé. De la sorte, la désulfuration a lieu au sein même du lit fluidisé, rendant ainsi superflue une épuration supplémentaire des gaz résiduels. Il est donc possible de brûler également des charbons à forte teneur en soufre dans des conditions de prix de revient tout à fait acceptables. A cet égard, le lit fluidisé en circulation offre des conditions encore plus favorables que le lit fluidisé classique. En effet, la totalité du réacteur est remplie d'une matière en suspension caractérisée par sa fine granulométrie. Dans ces conditions, les temps de contact gaz-solides prolongés et les surfaces spécifiques importantes conduisent à des taux de désulfuration supérieurs avec de faibles additions de calcaire.

- 5.2.3. La faible température de combustion permet d'abaisser la formation thermique de NO_x . En outre, la répartition de l'air de combustion, au sein du lit fluidisé en circulation, conduit à l'instauration d'une atmosphère réductrice dans la partie inférieure du réacteur et d'une atmosphère oxydante dans sa partie supérieure. L'expérience montre qu'une telle situation entraîne une réduction supplémentaire des émissions de NO_x .

- 5.2.4. Les transferts de chaleur entre le lit fluidisé composé de fines particules et les parois tubulaires ou les faisceaux immergés sont très importants.

- 5.2.5. Comme la vitesse des gaz est particulièrement élevée dans le réacteur, il est possible de maintenir dans des limites relativement modeste la section de la grille.

- 5.2.6. L'excellent brassage radial et axial du produit solide permet de réduire à un minimum les points d'alimentation en charbon et en calcaire.

La figure 10 présente le schéma de principe d'un générateur de vapeur dans lequel la combustion du charbon est assurée par un lit fluidisé en circulation. Dans ce schéma de principe, la partie inférieure de la chambre de combustion est briquetée et équipée de parois tubulaires, jouant le rôle de surface de chauffe de l'évaporateur. Selon le mode d'utilisation, il est toutefois possible de briqueter l'ensemble du four et d'assurer le refroidissement depuis l'extérieur grâce à la circulation des produits solides.

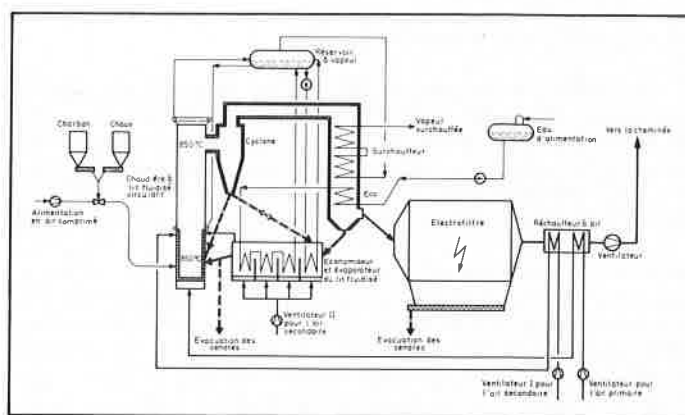


Figure 10. Schéma de principe d'une chaudière à lit fluidisé circulant.

Les paramètres d'exploitation du lit fluidisé en circulation (particules de faible taille, transfert intense de matière, temps de séjour par recyclage des produits solides) garantissant un excellent pourcentage de carbone effectivement brûlé, de sorte que, dans le lit composé de cendres, de chaux et de plâtre, les teneurs en carbone résiduel sont très faibles.

Dans la conduite de recyclage qui ramène en permanence vers le réacteur les produits solides retenus dans le cyclone, on prélève un flux partiel et on l'achemine vers un lit fluidisé de refroidissement. Les solides qui entrent dans le refroidissement avec une température correspondant à celle de combustion, soit 850 °C, sont fluidisés

par de l'air, traversent des chambres équipées de faisceaux assurant l'échange thermique et sont ramenés vers le réacteur à une température de 400 °C par exemple. Le transfert de chaleur entre ce lit fluidisé classique et les tubes est excellent, la finesse des particules jouant dans ce cas un rôle particulièrement favorable. Les surfaces de chauffe du lit fluidisé de refroidissement servent, dans le cas présent, comme évaporateur (circulation forcée) pour la partie chaude et comme économiseur pour la partie plus froide. D'autres configurations sont également possibles.

Grâce aux transferts de chaleur qui ont lieu en partie à travers les parois des tubes et en partie par l'intermédiaire du lit fluidisé refroidisseur, le comportement de la chaudière en charge partielle est meilleur qu'avec un lit fluidisé classique car la combustion et l'évacuation de la chaleur sont partiellement indépendantes. Ceci concerne aussi bien la vitesse de changement de régime que l'intervalle de charge, l'installation pouvant être maîtrisée jusqu'à un seuil de 40 %. Le transfert de chaleur au niveau du refroidisseur est aisément réglable grâce au flux de produits solides alimentant le refroidisseur.

L'air de fluidisation du lit de refroidissement entre dans le réacteur à l'état préchauffé en tant que flux partiel de l'air secondaire. Une partie des produits solides est extraite en aval du refroidisseur, en fonction de la quantité de calcaire introduite et de la quantité de cendres produites. Il est possible, en outre, d'éliminer au niveau du passage des fumées les poussières retenues, les fractions qui sont produites aux différents endroits dépendant du comportement des cendres et de la composition des produits solides aux différents points d'évacuation.

On ne s'attardera pas ici sur les différents éléments de la chaudière

placés sur le passage des fumées, non plus que sur les installations de dépoussiérage électriques qui s'inspirent de techniques classiques. La figure 11 montre une vue en perspective d'un générateur de vapeur d'une puissance électrique de 100 MW. Il y a de bonnes chances pour que des installations de conversion d'énergie fonctionnant suivant le principe soient construites dans un proche avenir.

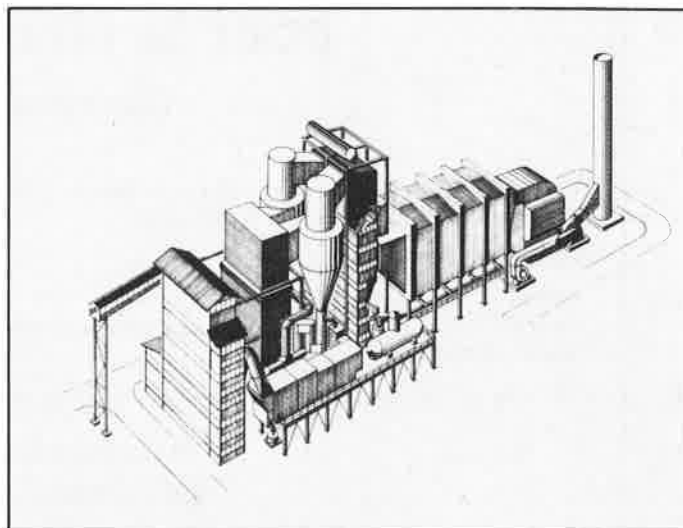


Figure 11. Disposition d'une chaudière de 100MW équipée d'un lit fluidisé circulant.

Bibliographie

- L. Reh, *Verfahrenstechnik* 1977, **11**, N° 6, 381 et n° 7, 425.
 A. Berg, « Roasting of sulfide ores in fluid bed roaster ». Communication au Symposium de la métallurgie des non ferreux, Goldfields of South Africa Ltd, Johannesburg le 19.2.1976.
 H. W. Schmidt, H. Beisswenger, F. Kaempf, H. J. Ernst, « Practical experience with the operation of LurgiVAW-fluid bed calciners », 105 th AIME Annual Meeting, 22-26 février 1976, Las Vegas (Nevada, USA).
 H. W. Schmidt, H. Beisswenger, F. Kaempf, « Flexibility of fluid bed calciner process in view of changing demands in the alumina market », publication dans *Ertmetau*, 1979, n° 7/8.
 P. Marchesseaux, L. Plass, L. Reh, « Light metals » 1979; TMS proceedings AIME Meeting, New Orleans, Vol. 1, p. 189.
 L. Reh, L. Plass, M. Hirsch, *VDI - Berichte* 1978, **322**, 29.
 L. Reh, *Kemisk Tidskrift*, 1978, **10**, 30.
 L. Reh, « Fluid, bed combustion in processing, environmental protection and energy supply ». Communication présentée au Symposium international de la combustion en lit fluidisé, le 30 mai 1979, à Boston (USA), organisé par l'American Flame Research Committee.

Electrophoresis

is one of the most important methods for the investigation of biological materials and also the name of a new international journal published by Verlag Chemie. Research reports are described with particular emphasis on advanced methods of electrophoresis. Topics include new and improved analytical and preparative methods and theoretical aspects. Electrophoresis publishes articles predominately in English, but also accepts contributions in German and French.

1981. Volume 2. Published bimonthly. Annual Subscription rate DM 176,— plus postage and handling.

P. O. Box 1260/1280, D-6940 Weinheim

