



## Possibilités d'utilisation de chaînes à molettes pour le havage des roches en carrières

## Gebruiksmogelijkheden voor kettingen met kabelschijven voor het ondersnijden van stenen in steengroeven

J. BRYCH \*, B. NEERDAEL\* et M. PILATI \*\*

### RESUME

*Au mois de mars 1974, MM. Brych et Došek ont déposé en Belgique un brevet d'invention « Outil pour les machines à découper les roches » (Brevet n° 811806), envisageant l'introduction d'outils rotatifs sur les chaînes de haveuse.*

*Suite à de nombreux essais effectués, d'une part au laboratoire de forage profonds, techniques exploratoires et mécanique des roches de la Faculté Polytechnique de Mons et, d'autre part, au Centre T.S.I.R.A. à Charleroi, ce dernier a pris en charge le développement du prototype de la chaîne à molettes. A l'heure actuelle, un certain nombre de problèmes technologiques restent à résoudre avant de pouvoir envisager l'industrialisation de ce procédé.*

\* Respectivement Professeur et Chercheur à la Faculté Polytechnique de Mons, rue du Joncquois, 53, B-7000 Mons.

\*\* Assistant, responsable technique du Centre T.S.I.R.A., boulevard Rouillier, 1, B-6000 Charleroi.

### SAMENVATTING

*Tijdens de maand maart 1974 hebben de heren Brych en Došek in België een uitvindingsoctrooi neergelegd « Werktuig voor machines voor het doorsnijden van gesteenten » (Octrooi nr. 811806), waarmee wordt beoogd, ronddraaiende werktuigen op de kettingen van ondersnijmachines aan te brengen.*

*Als gevolg van tal van proefnemingen die enerzijds in het laboratorium voor diepe boringen, exploratietechnieken en gesteentemechanica van de « Faculté Polytechnique de Mons » en anderzijds in het TSIRA-Centrum te Charleroi werden uitgevoerd, werd laatstgenoemd centrum belast met de ontwikkeling van het prototype van de ketting met kabelschijven. Op dit ogenblik dienen nog een aantal technologische problemen opgelost te worden vooraleer aan de productie op industriële schaal van dit procédé kan gedacht worden.*

\* Respectievelijk Professor en Vorseer aan de « Faculté Polytechnique de Mons », Rue du Joncquois 53, B-7000 Mons.

\*\* Assistent, technisch verantwoordelijke van het TSIRA-Centrum, Boulevard Rouillier 1, B-6000 Charleroi.

## ZUSAMMENFASSUNG

*Im März 1974 haben die Herren Brych und Došek in Belgien ein Patent (Nr. 811806) angemeldet mit dem Titel « Werkzeug für die Gesteinschneidmaschinen », das die Einführung von Rotationswerkzeugen auf den Schrämmaschinenketten vorsieht.*

*Im Anschluß an zahlreiche Versuche, die einerseits im Laboratorium für Tiefbohrungen, Ausbeutungstechniken und Mechanik des Gesteins der Polytechnischen Fakultät von Bergen, und andererseits im T.S.I.R.A.-Zentrum in Charleroi durchgeführt wurden, hat dieses letztere Zentrum die Entwicklung des Prototyps der Molettenkette übernommen. Gegenwärtig ist noch eine gewisse Anzahl von technologischen Problemen zu lösen, bevor an eine Industrialisierung dieses Verfahrens gedacht werden kann.*

L'idée d'introduire un outil rotatif sur une chaîne de haveuse en carrières fait son apparition au moment où un certain nombre de problèmes sont soulevés par les exploitants des carrières de roches très résistantes utilisant des haveuses, dont les chaînes sont équipées de pics classiques en carbure de tungstène.

A l'époque, le faible métrage réalisé entre deux affûtages de ces chaînes, la puissance nécessaire au découpage sans cesse croissante en fonction du temps et un prix de revient du mètre scié assez élevé étaient en effet des éléments suffisamment parlants pour que l'on doive chercher d'autres solutions pour le découpage des roches dures en carrières.

En utilisant les pics classiques en carbure de tungstène, la géométrie du tranchant se modifie très rapidement, dès les premiers contacts du pic avec la roche ; la dépouille s'use plus vite que l'avant de la dent, et la poussée nécessaire sur la chaîne doit nécessairement augmenter si la performance de découpage doit être maintenue constante.

L'ampérage dû à la rotation de la chaîne et à la translation de la machine augmente pour atteindre la limite de déclenchement des moteurs. Le processus de découpage s'arrête, la poussée nécessaire sur la chaîne dépasse la capacité de la haveuse, et l'on doit procéder au réaffûtage des pics.

Une amélioration importante du processus de découpage devait nécessairement apporter l'introduction sur le marché, des pics autoaffûtants, signalés par J. Brych dans les Annales des Mines de Belgique (février 1975) [1].

## SUMMARY

*In March 1974, Brych and Dosek lodged in Belgium a patent for « A tool for rock-cutting machines » (Patent N° 811806), which envisaged the use of rotating tools on cutter chains.*

*A large number of trials has been carried out by 1) the deep-drilling, exploration methods and rock mechanics laboratory of the Polytechnic Faculty of Mons and 2) by the T.S.I.R.A. Centre at Charleroi; the latter has now begun development of the prototype of a roller-bit chain. A number of technological problems still have to be solved before industrial production can be envisaged.*

De idee om een ronddraaiende beitel aan te brengen op een ketting van een ondersnijmachine in steengroeven is opgedoken op het ogenblik dat een aantal problemen te berde werden gebracht door uitbaters van steengroeven met zeer harde gesteenten, waar ondersnijmachines worden gebruikt waarvan de kettingen uitgerust zijn met klassieke beitels uit wolframcarbide.

Op dat ogenblik waren de geringe lengte tussen twee scherpingen van deze kettingen, het vermogen dat nodig was voor het snijden dat steeds toenam naargelang van de tijd, en een vrij hoge kostprijs per gezaagde meter immers voldoende sprekende elementen om andere oplossingen te zoeken voor het snijden van harde gesteenten in steengroeven.

Door gebruik te maken van de klassieke beitels uit wolframcarbide wordt de geometrie van de snijkant snel gewijzigd vanaf de eerste contacten van de beitel met het gesteente ; de schuurtrommel verslijt veel vlugger dan de voorkant van de tand, en de nodige druk op de ketting dient noodzakelijkerwijze te worden opgevoerd wil men de snijprestaties op peil houden.

De stroomsterkte als gevolg van het ronddraaien van de ketting en de overbrenging van de machine neemt toe tot de grens waarbij de motor wordt uitgeschakeld. Het snijdingsproces valt stil, de nodige druk op de ketting overschrijdt de capaciteit van de snijmachine en de beitels dienen opnieuw te worden aangescherpt.

Een belangrijke verbetering van het snijdingsproces diende noodzakelijkerwijze te komen van het op de markt brengen van zelfscherpende beitels, waarvan J. Brych melding maakt in de Annalen der Mijnen van België (februari 1975) [1].

Il va sans dire qu'au départ, l'outil autoaffûtant suscitait un certain nombre de contestations, parce que l'introduction sur la chaîne, de pics apparemment désaffûtés déjà au départ de leur travail, n'était pas quelque chose de très courant dans le domaine du découpage de la pierre en carrières, bien que le principe du travail des outils autoaffûtants ait pu être démontré par quelques modestes expérimentations en carrières dont les résultats ont fait l'objet de publication (cf. J. Brych, Annales des Mines de Belgique, février 1975) [1].

Ce n'est que grâce à l'effort considérable de la société « General Electric » que des plaquettes très minces en matériaux très durs, brasées sur un support en carbure, ont pu être fabriquées et que l'industrialisation dans le domaine des pics autoaffûtants a véritablement commencé.

L'introduction industrielle des pics autoaffûtants sur les chaînes de haveuse est un progrès très important dans le domaine du sciage des roches. Mais en analysant le processus de découpage de ces derniers, on se rend vite compte que le frottement joue toujours un rôle très important et que de ce fait, surtout en ce qui concerne la catégorie des roches très résistantes, les problèmes de rentabilité liés à l'utilisation de ce type de chaîne peuvent de nouveau poser un certain nombre de problèmes et cela, malgré les performances très favorables enregistrées jusqu'à présent.

Grâce à la bienveillance et la grande compréhension de la direction des carrières Gauthier-Wincqz à Soignies, le petit granit a pu être étudié d'une manière très détaillée au point de vue de sa destructibilité par les outils de coupe, tant au laboratoire qu'in situ.

Nous profitons de cette occasion pour rappeler quelques données fondamentales concernant son comportement mécanique [2].

En interprétant l'essai de poinçonnage (fig. 1 et tabl. I) dont la moyenne générale a été déterminée sur base de 50 essais, on déduit les valeurs numériques des différents paramètres de poinçonnage.

Quant à sa résistance au cisaillement par poinçonnage et au volume de la roche détruite en fonction de la distance de la rainure, le petit granit a pu être caractérisé comme suit (fig. 2).

A titre de comparaison, une série d'essais de découpage du petit granit, sur un banc d'essais au laboratoire, a été effectuée, d'une part, sur les pics autoaffûtants (fig. 4) munis de plaquettes de 0,8 mm d'épaisseur et de 8 mm de côté (il s'agit des pics utilisés auparavant pour les essais in situ) et sur des pics classiques à angle de coupe positif et négatif, et, d'autre part, sur les outils autoaffûtants rotatifs (moulettes suivant le brevet de J. Brych et J. Došek [3]).

Het spreekt vanzelf dat het zelfscherpende werktuig in het begin betwistingen uitlokte, aangezien het aanbrengen op de ketting van beitels die reeds op het ogenblik dat ze in werking treden blijkbaar ongescherp zijn, niet erg gebruikelijk was op het vlak van het snijden van stenen in steengroeven, hoewel het principe van de werking van zelfscherpende werktuigen kan worden aangetoond door enkele eenvoudige proeven in steengroeven. De resultaten hiervan werden gepubliceerd (cfr J. Brych, Annalen der Mijnen van België, februari 1975) [1].

Dank zij het opzoekingswerk van de maatschappij « General Electric » konden er zeer dunne plaatjes uit zeer harde materialen, gelast op een onderstel uit metaalcarbide, worden vervaardigd. Van dan af is de echte toepassing op industriële schaal van zelfscherpende beitels begonnen.

Het aanbrengen van zelfscherpende beitels op de kettingen van ondersnijmachines, toegepast op industriële schaal, betekent een belangrijke vooruitgang op het vlak van het doorzagen van gesteenten. Bij het analyseren van het snijdingsproces van deze laatste geeft men zich evenwel vlug rekenschap dat de wrijving nog steeds een zeer belangrijke rol speelt, en dat er bij de categorie zeer harde gesteenten opnieuw een aantal problemen kunnen rijzen met betrekking tot de rentabiliteit van het gebruik van dit soort kettingen, zelfs ondanks de zeer gunstige resultaten die tot nu toe werden opgetekend.

Dank zij de welwillende medewerking en de begrijpende houding van de directie van de steengroeven Gauthier-Wincqz te Soignies kon de hardsteen zeer nauwkeurig worden bestudeerd op het vlak van de afbouw mogelijkheden met behulp van snijwerktuigen, zowel in het laboratorium als in situ.

Wij maken van de gelegenheid gebruik om te herinneren aan enkele fundamentele gegevens over het mechanische gedrag [2].

Uit de interpretatie van de indringingsproeven (fig. 1 en tabel I) waarvan het algemeen gemiddelde werd bepaald op grond van 50 proeven, worden cijferwaarden afgeleid van de verschillende indringingsparameters. Voor wat zijn breeksterkte bij indringing, en het gesteentevolume dat in functie van de afstand van de groef werd vernietigd betreft, kan de hardsteen als volgt worden gekenmerkt (fig. 2).

Ter vergelijking werd een reeks snijproeven op hardsteen uitgevoerd op een proefbank in het laboratorium. Deze proeven werden enerzijds uitgevoerd op zelfscherpende beitels (fig. 4) met plaatjes met een dikte van 0,8 mm en met 8 mm zijde (de beitels werden vooraf bij de in situ-proeven gebruikt) en op klassieke beitels met positieve en negatieve snijhoek, en anderzijds werden ze uitgevoerd op zelfscherpende draaiende werktuigen (kabelschijven volgens het octrooi van J. Brych en J. Došek [3]).

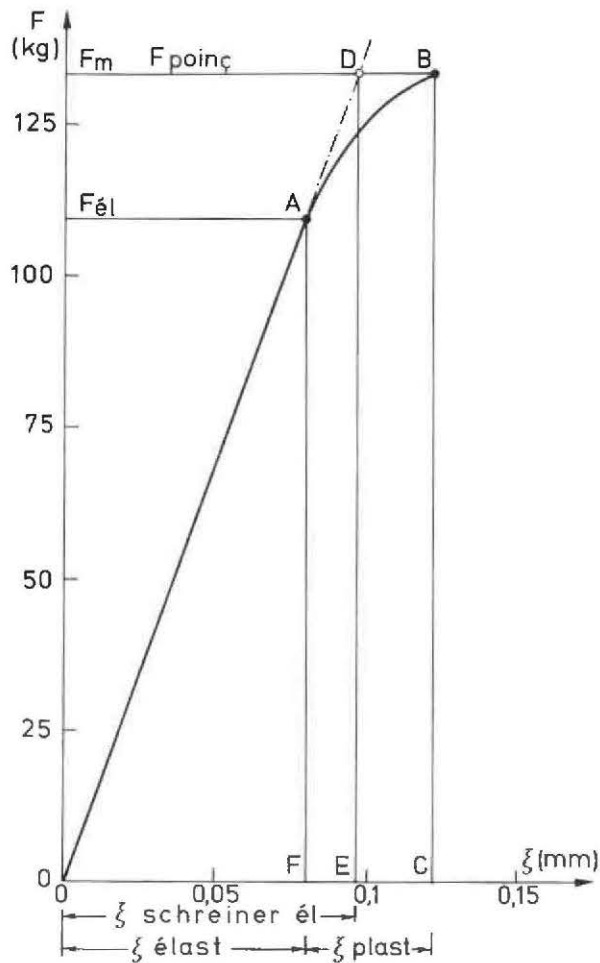


Fig. 1 — Petit granit de Soignies - résistance au poinçonnage (courbe moyenne)

Hardsteen van Soignies - indringingsweerstand (gemiddelde curve)  
 VMCH =  $571,41 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{s}$   
 Poinçon = stempel  $\phi$  1,1 mm  
 $\sigma_{\text{schr.}} = 139,93 \text{ kg/mm}^2$

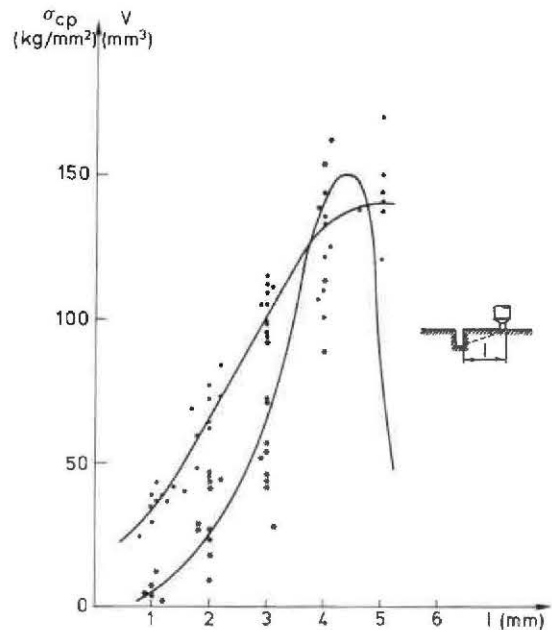


Fig. 2 — Petit granit de Soignies - résistance au cisaillement par poinçonnage

Hardsteen van Soignies - breekweerstand door indringing  
 VMCH =  $571,41 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{s}$   
 Poinçon = stempel  $\phi$  1,1 mm

TABEAU I

Interprétation des essais de poinçonnage du petit granit (sur base de 50 essais)

Symbole	Désignation	Valeur
$\sigma_p$	Résistance au poinçonnage	139,93 kg/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{el}$	Limite élastique	115,07 kg/mm <sup>2</sup>
$E_{st}$	Module d'élasticité	133.800 kg/cm <sup>2</sup>
$T_{el}$	Travail élastique	0,005272 kgm
$T_{TD}$	Travail total de destruction	0,008863 kgm
$T_{spec}$	Travail spécifique de contact	0,0105 kgm/mm <sup>2</sup>
$T_{vD}$	Travail volumétrique de destruction	0,018062 kgm/mm <sup>3</sup>
$C_{pl}$	Coefficient de plasticité	1,890
$\sigma_{Red} (*)$	Résistance réduite au poinçonnage $\sigma_{Red} = \sigma_p \sqrt{C_{pl}}$	182,4 kg/mm <sup>2</sup>

(\*) Des essais précédents basés sur un plus petit nombre d'échantillons avaient donné pour

$\sigma_{Red}$  la valeur de 215 kg/mm<sup>2</sup> [1].

TABEL I

Interpretatie van de indringingsproeven bij hardsteen (op grond van 50 proeven)

Symbool	Betekenis	Waarde
$\sigma_p$	Indringingsweerstand	139,93 kg/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{el}$	Elasticiteitsgrens	115,07 kg/mm <sup>2</sup>
$E_{st}$	Elasticiteitsmodulus	133.800 kg/cm <sup>2</sup>
$T_{el}$	Elasticiteitswerk	0,005272 kgm
$T_{TD}$	Totaal destructiewerk	0,008863 kgm
$T_{spec}$	Specifiek contactwerk	0,0105 kgm/mm <sup>2</sup>
$T_{vD}$	Volumetrisch destructiewerk	0,018062 kgm/mm <sup>3</sup>
$C_{pl}$	Plasticiteitscoëfficiënt	1,890
$\sigma_{Red} (*)$	Verminderde indringingsweerstand $\sigma_{Red} = \sigma_p \sqrt{C_{pl}}$	182,4 kg/mm <sup>2</sup>

(\*) Voorafgaande proeven die steunden op een kleiner aantal monsters leverden voor

$\sigma_{Red}$  de waarde van 215 kg/mm<sup>2</sup> op [1].

Le processus de découpage a été suivi et enregistré au moyen d'un enregistreur oscillographique UV-Visicorder de Honeywell. Sur base de 5 à 10 essais par outil, on a calculé pour chaque angle de coupe l'effort moyen et l'effort maximum (fig. 3).

Les figures 4bis, 5, 6, 7, 8, 9, 10 et 11, 11bis donnent l'évolution des efforts de coupe lors du découpage d'un bloc de petit granit au laboratoire (la longueur N des blocs découpés était de 20 cm, la vitesse de découpage de 0,25 m/s et la profondeur de passe de 0,216 mm).

Het snijproces werd met een oscillografisch registreertoestel UV-Visicorder van Honeywell gevolgd en geregistreerd. Op basis van 5 tot 10 proefnemingen per werktuig werd voor elke snijhoek de gemiddelde en de maximumbelasting berekend (fig. 3).

De figuren 4bis, 5, 6, 7, 8, 9, 10 en 11, 11bis geven de evolutie van de snijbelastingen bij het doorsnijden van een blok hardsteen in het laboratorium (de lengte N van de doorsneden blokken bedroeg 20 cm, de snijsnelheid bedroeg 0,25 m/s en de snijdiepte bedroeg 0,216 mm).

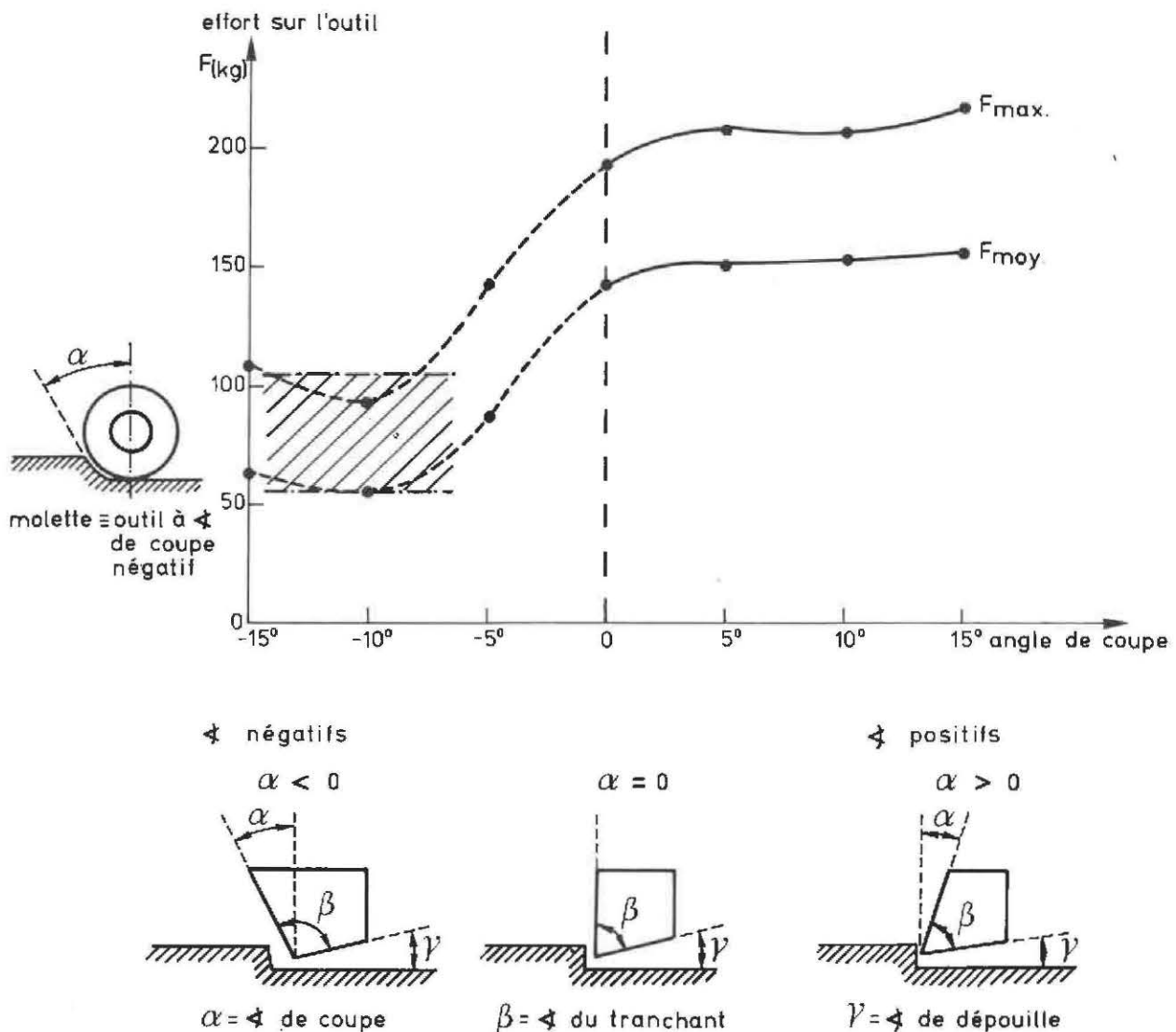


Fig. 3 — Petit granit de Soignies - efforts de coupe en fonction des angles de coupe

Hardsteen van Soignies - snijbelastingen in functie van de snijhoeken

Effort... = belasting op het werktuig

Molette... = kabelschijf - werktuig met negatieve snijhoek

$\alpha = \angle$  snijhoek —  $\beta = \angle$  van de snijkant —  $\gamma = \angle$  stelhoek

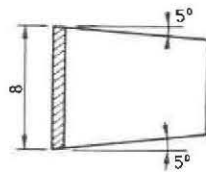
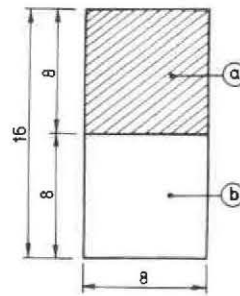
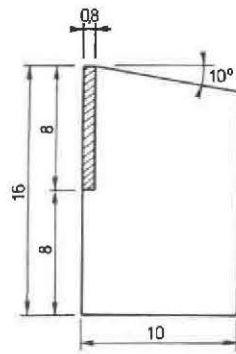


Fig. 4 — Pics autoaffûtants expérimentaux  
 a - plaquette CTGST brasée sur l'acier  
 b - support en acier à 45-50 kg/mm<sup>2</sup>  
 Experimentele zelfslipende beitels  
 a - CTGST-plaatje dat op het staal gelast is  
 b - stalen onderstel van 45-50 kg/mm<sup>2</sup>

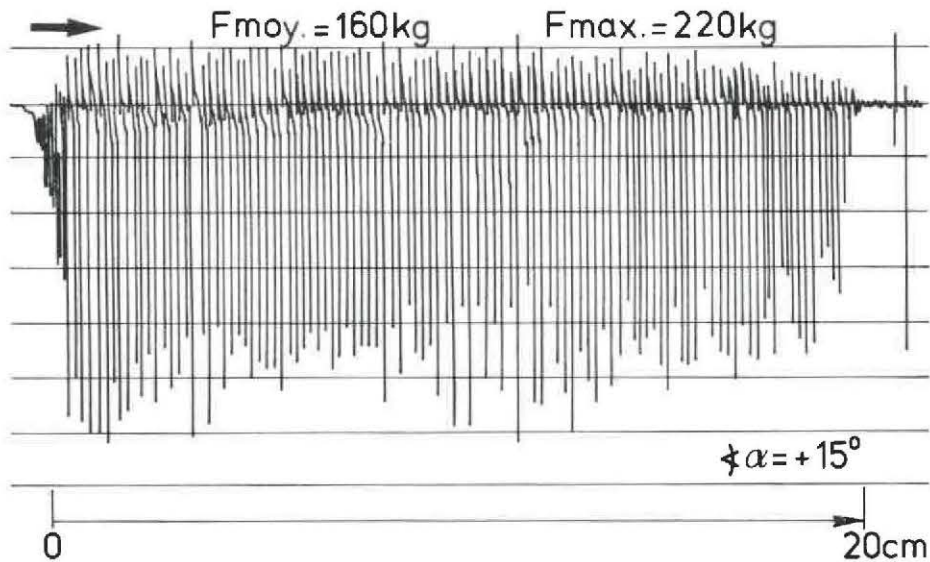


Fig. 4bis — Petit granit de Soignies - efforts de coupe par outils dont l'angle est de + 15°  
 Hardsteen van Soignies - snijbelastingen voor werktuigen waarvan de hoek verandert met + 15°

Pour chaque outil testé, on obtient un profil bien caractéristique représentant la répartition de l'effort sur l'outil, tout au long de la roche découpée. Les enregistrements suivants illustrent les phénomènes de découpage pour une vitesse de déroulement du papier de 2 cm/s (avec un effort de 33,50 kg/cm en ordonnée).

On y remarque que, pour les angles de coupe nuls (fig. 7) (130 à 170 cycles), l'effort est plus ou moins uniformément réparti. Dans le cas des angles positifs (fig. 4bis, 5, 6) (80 à 100 cycles), on constate une certaine homogénéité des efforts.

Voor elk werktuig dat beproefd wordt verkrijgt men een apart profiel waarop de belasting van het werktuig over de hele lengte van het doorsneden gesteente wordt weergegeven. De volgende opnamen illustreren de doorsnijdingsverschijnselen bij een rolsnelheid van het papier die 2 cm/s bedraagt (met een belasting van 33,50 kg/cm in de ordinat).

Er kan in opgemerkt worden dat de belasting min of meer gelijkvormig verdeeld is wanneer de snijhoeken gelijk zijn aan nul (fig. 7) (130 tot 170 cyclussen). Wanneer de snijhoeken positief zijn (fig. 4bis, 5, 6) (80 tot 100 cyclussen) kan een zekere gelijkheid van de belastingen vastgesteld worden.

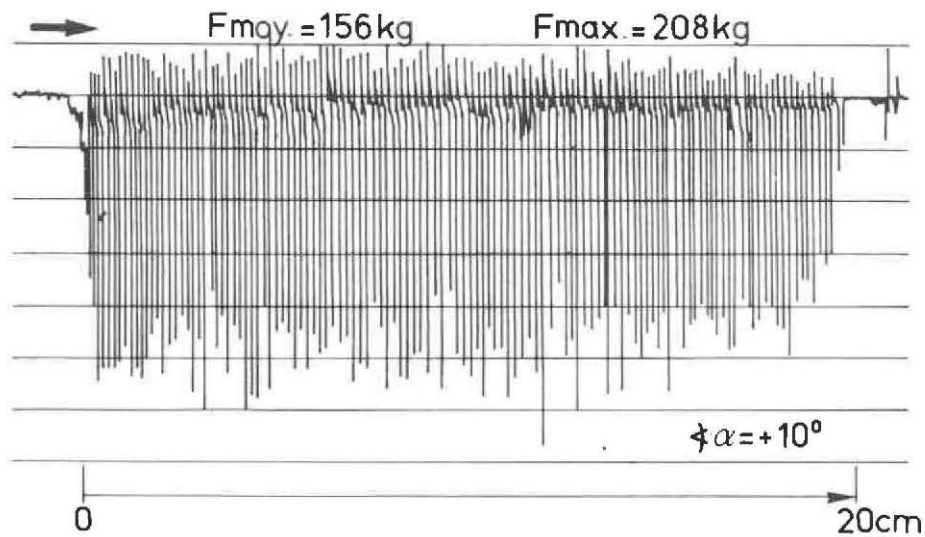


Fig. 5 — Petit granit de Soignies - les efforts de coupe par outils dont l'angle est de  $+ 10^\circ$   
*Hardsteen van Soignies - snijbelastingen voor werktuigen waarvan de hoek verandert met  $+ 10^\circ$*

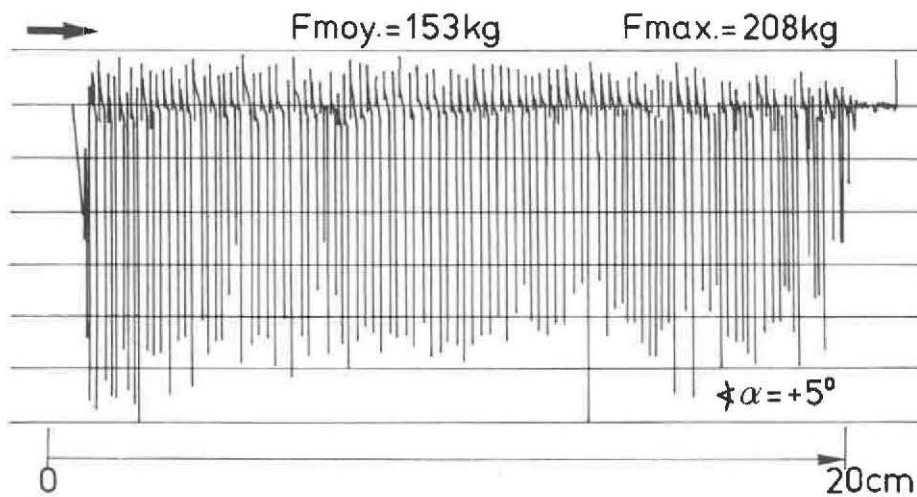


Fig. 6 — Petit granit de Soignies - les efforts de coupe par outils dont l'angle est de  $+ 5^\circ$   
*Hardsteen van Soignies - snijbelastingen voor werktuigen waarvan de hoek verandert met  $+ 5^\circ$*

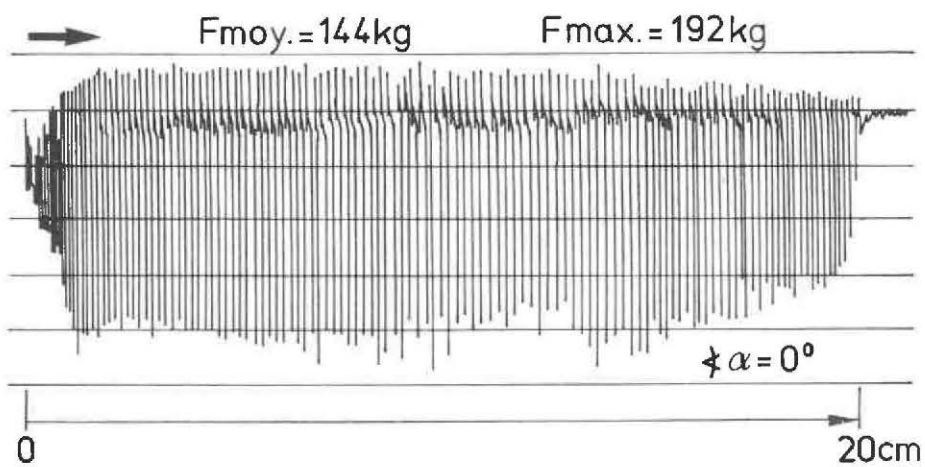


Fig. 7 — Petit granit de Soignies - les efforts de coupe par outils dont l'angle est de  $0^\circ$   
*Hardsteen van Soignies - snijbelastingen voor werktuigen waarvan de hoek verandert met  $0^\circ$*

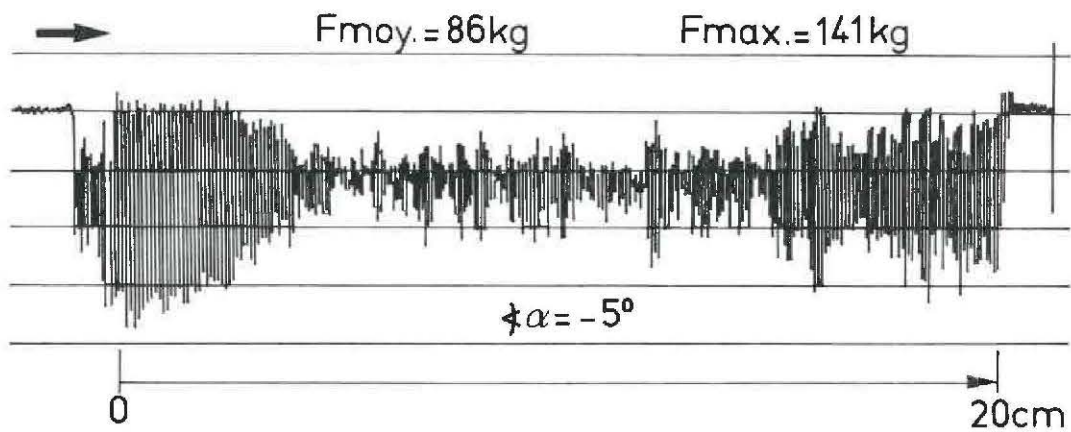


Fig. 8 — Petit granit de Soignies - les efforts de coupe par outils dont l'angle est de  $-5^\circ$   
 Hardsteen van Soignies - snijbelastingen voor werktuigen waarvan de hoek verandert met  $-5^\circ$

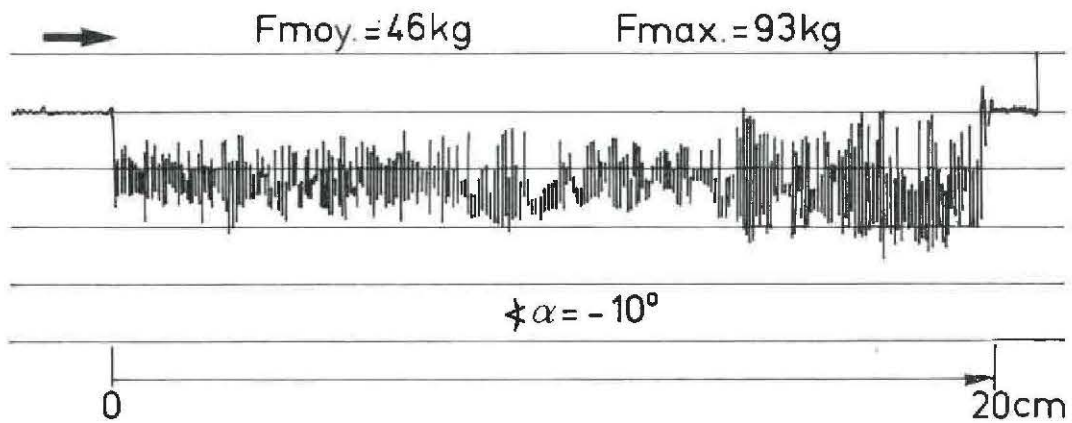


Fig. 9 — Petit granit de Soignies - les efforts de coupe par outils dont l'angle est de  $-10^\circ$   
 Hardsteen van Soignies - snijbelastingen voor werktuigen waarvan de hoek verandert met  $-10^\circ$

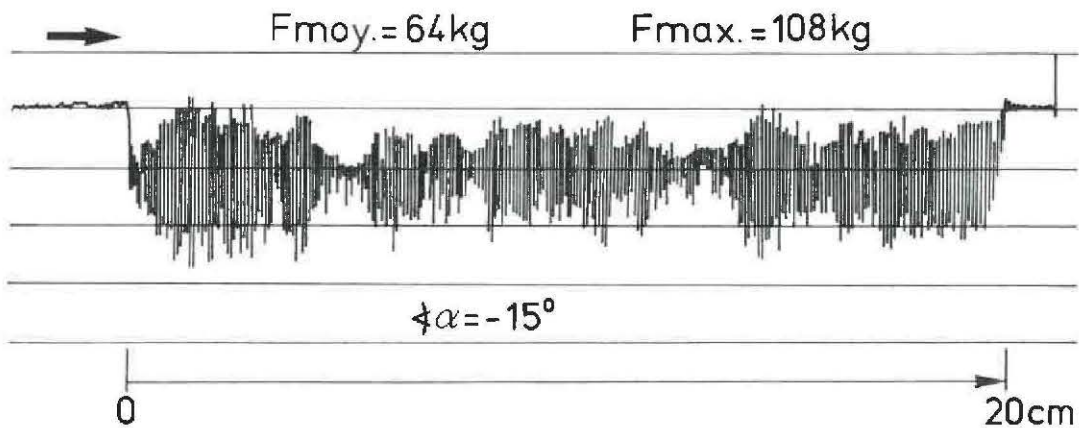


Fig. 10 — Petit granit de Soignies - les efforts de coupe par outils dont l'angle est de  $-15^\circ$   
 Hardsteen van Soignies - snijbelastingen voor werktuigen waarvan de hoek verandert met  $-15^\circ$



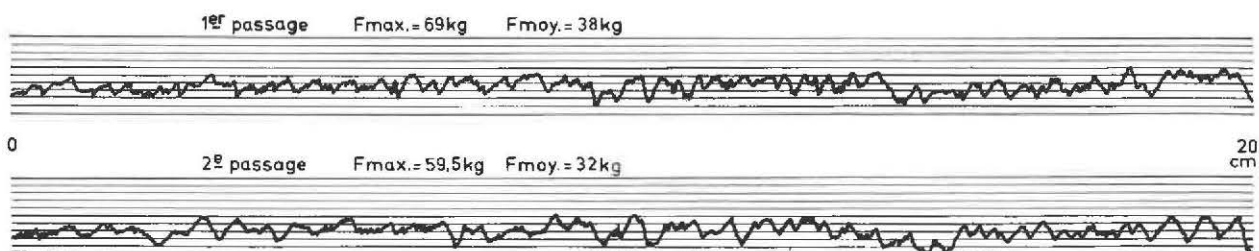


Fig. 11 — Petit granit de Soignies - les efforts de coupe par outil à molettes  
*Hardsteen van Soignies - snijbelastingen door werktuig met kabelschijven*

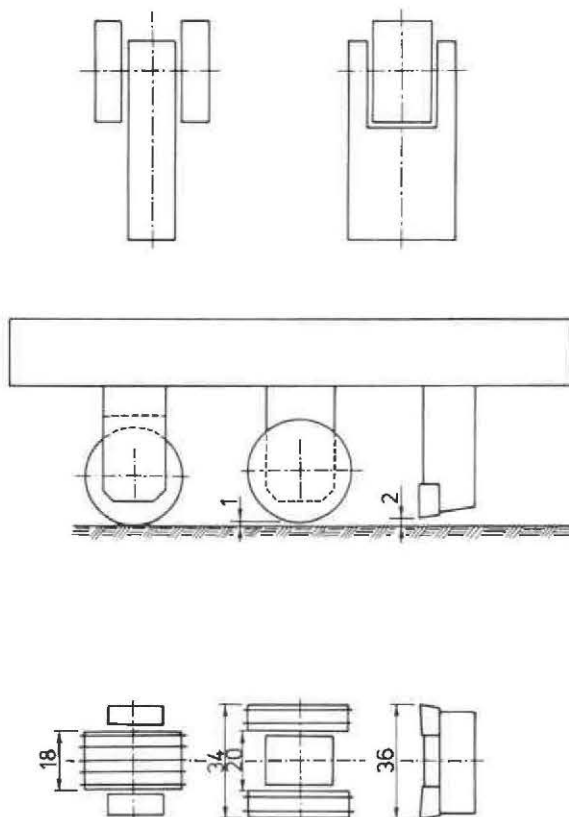


Fig. 11 bis — Les outils à molettes n° 1 et n° 2 testés sur banc d'essais au laboratoire  
*Werktuigen met kabelschijven nr. 1 en nr. 2, beproefd op proefbank in het laboratorium*

Dans le cas des angles négatifs (fig. 8, 9, 10) (300 oscillations environ), on constate une irrégularité des efforts tout au long de la roche découpée (surtout pour les angles de  $-5^\circ$  et  $-15^\circ$ ).

Quant aux outils à molettes (fig. 11), ils se comportent d'une façon analogue aux outils à angle de coupe négatif, ce qui confirme, dans ce cas précis, la valeur de l'effort de coupe qui a été mesurée lors d'expérimentations en laboratoire de forages, techniques exploratoires profondes et mécanique des roches de la Faculté Polytechnique de Mons.

Bij negatieve hoeken (fig. 8, 9, 10) (ongeveer 300 trillingen) wordt een zekere regelmaat van de belastingen over de hele lengte van het doorsneden gesteente vastgesteld (vooral voor de hoeken van  $-5^\circ$  en  $-15^\circ$ ).

De werktuigen met kabelschijven (fig. 11) van hun kant vertonen een gelijkaardig gedrag als dat van de werktuigen met negatieve snijhoek. Hierdoor wordt in dit geval de waarde van de snijbelasting bevestigd, die gemeten werd tijdens proeven in het laboratorium voor boringen, exploratietechnieken op grote diepte en gesteentemechanica van de « Faculté Polytechnique de Mons ».

A la figure 2, nous avons montré, pour le petit granit de Soignies, la variation de la résistance au cisaillement par poinçonnage, en fonction de l'éloignement du poinçon par rapport au bord de la rainure.

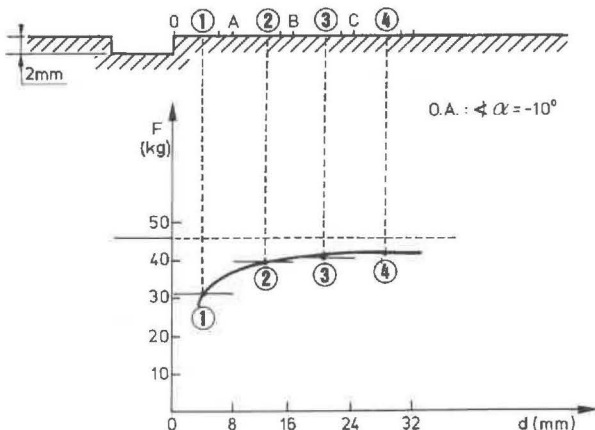
Pour démontrer la liaison entre ce test relativement simple de laboratoire et le processus de découpage, on a choisi l'outil autoaffûtant (plaquette 0,8-8 mm) à angle de coupe négatif ( $-10^\circ$ ). Une rainure de base de 2 mm de profondeur a été préalablement exécutée. On a mesuré l'effort nécessaire au découpage d'une passe de 0,216 en surface, successivement au bord de la rainure et à des distances égales à 1, 2 et 3 fois la largeur de l'outil. Ces essais effectués un assez grand nombre de fois ont permis le calcul d'une moyenne valable.

On obtient le graphique de la figure 12 où l'on retrouve une courbe analogue au cisaillement par poinçonnage (de la figure 2), ce qui peut être considéré comme vérification expérimentale dans ce domaine.

Nous basant sur les considérations théoriques et les résultats expérimentaux qui viennent d'être exposés, nous pensons que la chaîne à molettes doit trouver une place dans la gamme d'outils de havage, à condition de pouvoir résoudre encore quelques problèmes d'ordre technologique liés à l'industrialisation de ce procédé.

Le Centre T.S.I.R.A. a pris en charge la transposition semi-industrielle d'une chaîne prototype munie d'outils rotatifs, suivant le brevet de J. Brych et J. Došek (fig. 13-14).

Le programme de transposition a été subdivisé en plusieurs phases. Après avoir étudié dans une première phase (fig. 11 bis) la géométrie, la résistance et la disposition des poinçons, et dans une deuxième phase, la confirmation in situ de l'efficacité du processus de destruction du petit granit de Soignies, le Centre T.S.I.R.A. a entrepris dans les phases III et IV l'étude d'une première chaîne expérimentale industrielle.



In figuur 2 hebben we de wijziging van de breeksterkte bij indringing in functie van de afstand van de stempel tot de rand van de groef gegeven voor de hardsteen van Soignies.

Ten einde het verband tussen deze relatief eenvoudige laboratoriumproef en het versnijdingsproces aan te tonen werd het zelfscherpend werktuig (plaatje 0,8-8 mm) met negatieve snijhoek ( $-10^\circ$ ) gekozen. Er werd vooraf een basisgroef met een diepte van 2 mm gemaakt. De kracht die nodig is voor het doorsnijden van een diepte van 0,216 vanaf het oppervlak werd achtereenvolgens gemeten op de rand van de groef en op afstanden die 1, 2 en 3 keer de breedte van het gereedschap bedroegen. Deze proeven werden vrij dikwijls uitgevoerd, en ze maakten de berekening van een goed gemiddelde mogelijk.

Wij krijgen de grafiek van figuur 12 waarin we een curve vinden met een verloop dat gelijkaardig is met de snijding door indringing (van figuur 2) hetgeen als een proefondervindelijke controle op dit vlak kan beschouwd worden.

Uitgaande van de theoretische beschouwingen en van de proefondervindelijke resultaten waarover hier een uiteenzetting werd gegeven menen we dat de ketting met kabelschijven zeker haar plaats verdient in de reeks ondersnijwerktuigen. Hiervoor moeten evenwel nog enkele technologische problemen in verband met de toepassing op industriële schaal van dit procédé opgelost worden.

Het Centrum TSIRA heeft de verwezenlijking op semi-industriële schaal van een prototype van een ketting met draaiende werktuigen volgens het octrooi van J. Brych en J. Došek (fig. 13-14) op zich genomen.

Het programma hiervoor werd in verschillende fasen verdeeld. In een eerste fase (fig. 11 bis) bestudeerde het Centrum TSIRA de geometrie, de weerstand en de plaatsing van de stempels, en in een tweede fase werd de doeltreffendheid van het proces van de vernietiging van de hardsteen van Soignies in situ nagegaan. In de fasen III en IV werd dan de studie van een eerste experimentele ketting op industriële schaal uitgevoerd.

Fig. 12 — Petit granit de Soignies - variations de l'effort de coupe en fonction de la distance de la saignée de 2 mm de profondeur effectuée par l'outil n° 1

Hardsteen van Soignies - schommelingen van de snijbelasting in functie van de afstand tot de insnijding van 2 mm diepte die door werktuig nr. 1 werd uitgevoerd

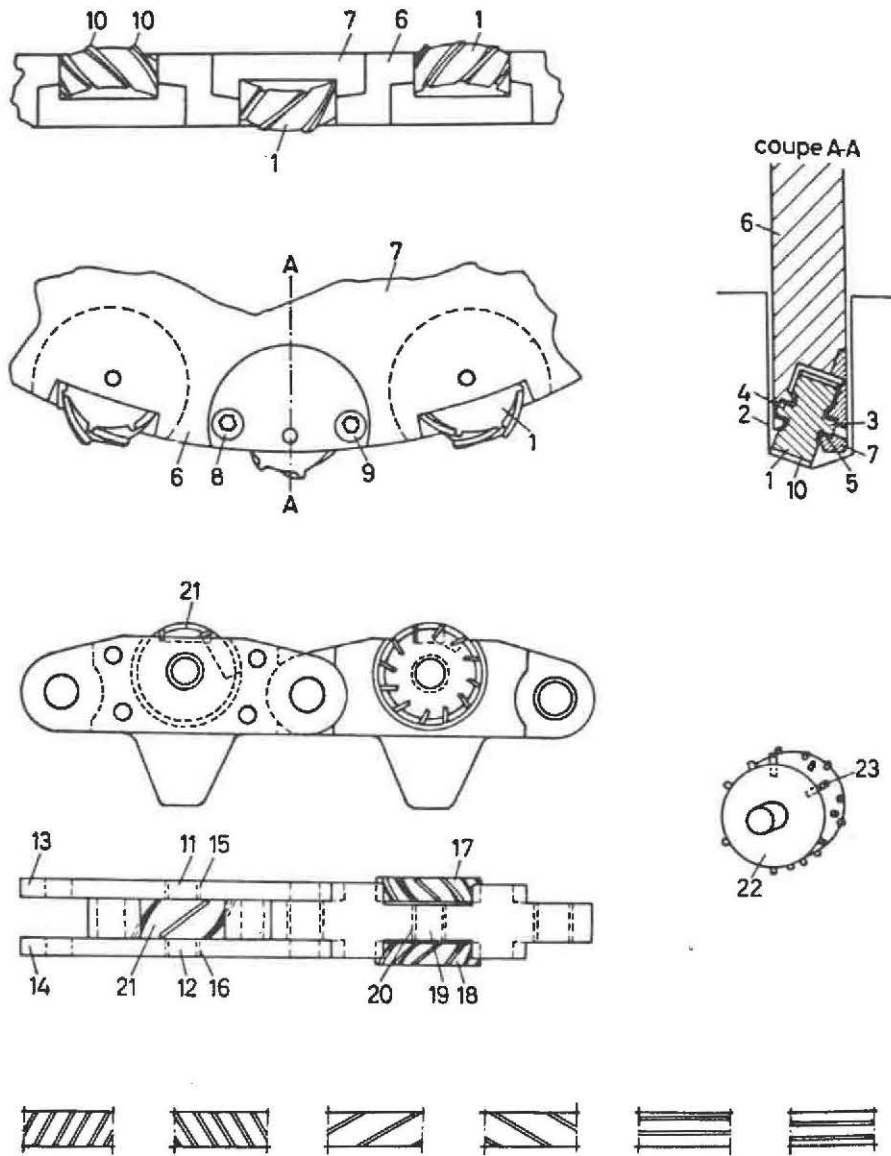


Fig. 13 et 14 — Chaîne à molettes - différentes variantes de construction (d'après Brych et Došek)  
 Ketting met kabelschijven - verschillende bouwvarianten (volgens Brych en Došek)

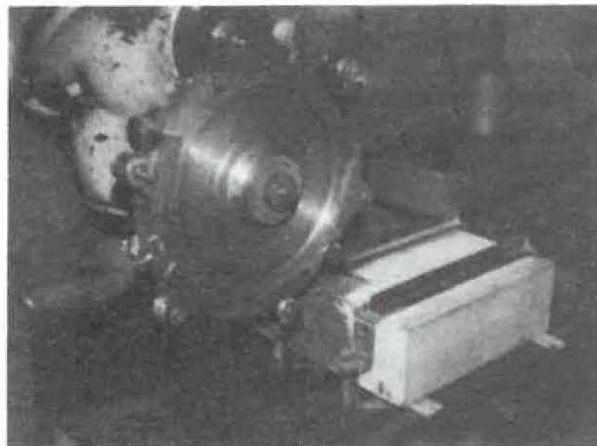


Fig. 15 — Disque muni des molettes monté sur une fraiseuse  
 Schijf met kabelschijven gemonteerd op een freesmachine

Les résultats des phases I et II étant pleinement encourageants, il a été décidé en troisième phase de réaliser un disque muni de molettes, afin de résoudre le problème d'usure des axes des molettes observée en phase II (fig. 15).

Le problème était, en effet, de trouver un coussinet capable de résister aux pressions s'exerçant sur l'axe de la molette, et pouvant travailler sans lubrification in situ (eau + poussière de roche).

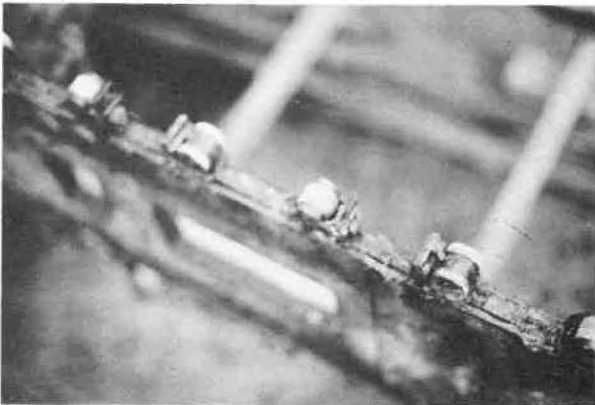
Le disque a été monté sur une fraiseuse et le découpage de blocs de petit granit ou de marbre avait le caractère d'un travail de coupe continu.

Actuellement, ce dispositif expérimental nous a permis d'estimer la longueur de vie des paliers, des molettes et du dispositif de raclage de la saignée. On constate que la durée de vie des coussinets est de 40 heures (ce qui représente une semaine de travail). Les molettes, les poinçons et le système de raclage résistent actuellement à plus de 150 heures de travail, sans être complètement détériorés.

Parallèlement à ces travaux expérimentaux aux laboratoires du Centre T.S.I.R.A., viennent de commencer dans une quatrième phase, les essais en carrières de la chaîne expérimentale (fig. 16 et 17). Qu'il nous soit permis de rendre publiquement hommage à la direction des carrières Gauthier-Wincqz à Soignies, et plus particulièrement à MM. Abraham, Gauthier et Tacquet qui, de par leur disponibilité et leur esprit d'avant-garde, nous ont permis d'entreprendre ces essais in situ.

Le but de ces premiers essais n'est pas d'établir une performance, mais seulement de démontrer la fiabilité du procédé et la bonne tenue mécanique in situ de l'ensemble.

Actuellement, le métrage réalisé en carrière est au total de l'ordre de 10 m<sup>2</sup> (2 essais de reprise de saignées existantes, 1 essai avec pénétration), avec une vitesse de rotation de la chaîne de  $\pm 1,5$  m/s.



Aangezien de fasen 1 en 2 erg hoopgevend waren werd beslist, in de derde fase een schijf met kabelschijven te verwezenlijken, teneinde het probleem van de slijtage van de kabelschijfassen, dat in de 2de fase werd waargenomen, op te lossen (fig. 15).

Het was namelijk moeilijk om een lager te vinden die bestand is tegen de druk op de as van de kabelschijf, en die zonder smering in situ kan werken (water + gesteentestof).

De schijf werd op een freesmachine gemonteerd, en het doorsnijden van hardsteen of marmer verliep als een doorlopend snijwerk.

Door dit experimentele toestel konden we de levensduur van de lagers, van de kabelschijven en van het schraaptoestel voor de insnijding schatten. De levensduur van de lagers bedraagt 40 uren (hetgeen overeenkomt met een werkweek). De kabelschijven, de stempels en het schraapsysteem gaan op dit ogenblik meer dan 150 werkuren mee, zonder volledig versleten te zijn.

Parallel met deze proefondervindelijke werkzaamheden in de laboratoria van het Centrum TSIRA werd zopas in een vierde fase begonnen met het uittesten van de experimentele ketting in groeven (fig. 16 en 17). We wensen de directie van de groeven Gauthier-Wincqz te Soignies, meer bepaald de heren Abraham, Gauthier en Tacquet, te danken omdat ze deze in situ-proefneming door hun welwillende medewerking en hun dynamisme hebben mogelijk gemaakt.

Deze eerste proefnemingen hebben niet de bedoeling een prestatie te verrichten ; ze moeten enkel de betrouwbaarheid van het procédé en de goede mechanische werking in situ aantonen.

Op dit ogenblik worden in de groeve alles tezamen ongeveer 10 m<sup>2</sup> verwerkt (twee proeven waar reeds bestaande insnijdingen werden gebruikt, 1 proef met indringing), met een draaisnelheid van de ketting die  $\pm 1,5$  m/s bedraagt.



Fig. 16 et 17 — Premiers essais en carrières de la chaîne à molettes expérimentale

*Eerste proefnemingen in groeven met de experimentele ketting met kabelschijven*

Nous attirons l'attention sur le fait qu'un très faible ampérage a été enregistré pendant le travail de la chaîne. Ce dernier reste *constant* pendant toute la durée de l'essai (ampérage à vide  $\pm 20$  A — ampérage en pleine charge  $\pm 25$  A, haveuse Perrier installée aux carrières Gauthier-Wincqz à Soignies).

La vitesse de sciage de 2 à 2,5 m<sup>2</sup>/h n'est pas limitative, elle n'est fonction que des possibilités d'utilisation de la machine.

En effet, elle est directement liée au nombre de passages des molettes sur la roche, c'est-à-dire à la vitesse de rotation de la chaîne.

Pour atteindre des rendements de sciage supérieurs, il suffit d'augmenter la vitesse de rotation de la chaîne ; on estime que, pour atteindre des vitesses de sciage de 4 à 5 m<sup>2</sup>/h, la chaîne devrait tourner à une vitesse de 3 m/s.

Il est à remarquer que le procédé de découpage par chaîne à molettes est très différent du découpage classique, quant à la conduite de la machine. Les réactions entre roches et outils, tant en direction qu'en intensité, sont telles que toute augmentation de la poussée au-delà de la nécessité de poinçonnage peut être néfaste et que c'est sur la vitesse de rotation de la chaîne qu'il faut agir.

Plusieurs problèmes technologiques, liés à l'industrialisation de cette chaîne, restent encore à résoudre ; nous espérons que d'ici quelques mois, tous ces problèmes seront surmontés et que nous pourrions alors commencer les essais de performances.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. BRYCH. Les outils autoaffûtants au service de havage des roches dures. Annales des Mines de Belgique, n° 2, 1975.
- [2] B. NEERDAEL. Contribution à l'étude de la destructibilité des roches dures telles que les calcaires crinoïdiques de Soignies. Faculté Polytechnique de Mons — Travail de fin d'études, juin 1975.
- [3] J. BRYCH et J. DOŠEK. Outil pour les machines à découper les roches (brevet d'invention n° 811806 du 28.03.1974).

We vestigen de aandacht op het feit dat tijdens het werken van de ketting een zeer geringe stroomsterkte werd genoteerd. Deze stroomsterkte blijft gedurende de hele proefneming *constant* (stroomsterkte onbelast  $\pm 20$  A — stroomsterkte bij volle belasting  $\pm 25$  A, ondersnijmachine Perrier, geplaatst in de groeven Gauthier-Wincqz te Soignies). De zaagsnelheid van 2 tot 2,5 m<sup>2</sup>/u. is niet beperkend ; zè wordt enkel bedongen door de gebruiksmogelijkheden van de machine.

Ze staat immers rechtstreeks in verband met het aantal doortochten van de kabelschijven op het gesteente of, met andere woorden, met de draaisnelheid van de ketting.

Om hogere zaagrendementen te verkrijgen moet enkel de draaisnelheid van de ketting verhoogd worden ; volgens de ramingen moet de ketting tegen een snelheid van 3 m/s draaien om zaagsnelheden van 4 tot 5 m<sup>2</sup>/u. te bereiken.

Er dient opgemerkt dat het snijprocédé van de ketting met kabelschijven wat de bediening van de machine betreft sterk verschilt van de klassieke snijmethode. De reacties tussen het gesteente en het werktuig zijn zowel in richting als in intensiteit van die aard, dat elke drukverhoging boven de noodzakelijke indringingsdruk erg nadelig kan zijn, en dat op de draaisnelheid van de ketting moet ingegrepen worden.

Er moeten nog veel technologische problemen opgelost worden die met de toepassing op industriële schaal van deze ketting verband houden ; we hopen dat deze problemen over enkele maanden zullen opgelost zijn, en dat we dan met de prestatieproeven kunnen beginnen.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] J. BRYCH : Zelfslijpende werktuigen voor het ondersnijden van harde gesteenten. Annalen der Mijnen van België, nr. 2, 1975.
- [2] B. NEERDAEL : Bijdrage tot de studie van de afbreekbaarheid van harde gesteenten als de crinoïdenkalksteen van Soignies. Faculté Polytechnique de Mons - Eindverhandeling, juni 1975.
- [3] J. BRYCH en J. DOŠEK : Werktuig voor machines voor het doorsnijden van gesteenten. (Uitvindingsoctrooi nr. 811806 van 28.03.1974).



Nos remerciements vont d'abord à l'I.R.S.I.A. pour le concours et l'aide financière qu'il nous a apportés et sans lesquels cette importante étude n'aurait pu être menée à bien.

Ils s'adressent ensuite à la Société de la Vieille Montagne, ainsi qu'aux centres ayant si fructueusement participé aux recherches et à leurs représentants au sein de notre Commission de Coordination, pour le souci apporté dans la réalisation de leur contrat et pour les avis et conseils précieux qu'ils n'ont cessé de nous prodiguer au long de ces deux années d'étroite collaboration. Nous citerons pour le C.R.R. : Messieurs J. Reichert, J. Huet et F. Choquet ; pour le C.S.T.C. : Messieurs H. Motteu, C. De Pauw et E. Rousseau ; pour la F.S.A.E. : Messieurs R. Impens et R. Paul ; pour l'INIEX : Messieurs P. Ledent et R. Bonsang ; pour la S.A. Dumont-Wautier : Madame Mignolet, et pour l'U.C.C.D. : Messieurs Ph. Dumont, A. Dispas et P. Amand.

\*\*\*

Il nous est agréable de pouvoir dire que la réalisation de cette étude a permis à l'U.C.C.D. d'atteindre ses objectifs :

- d'une part, la découverte de divers procédés d'utilisation et/ou de transformation des boues sulfiteuses qui, transposés au plan industriel, permettront la valorisation de ces sous-produits ;
- d'autre part, la promotion de la technique de désulfuration des gaz à la chaux auprès des administrations et des industries concernées.

Nous voulons croire que la modeste pierre que nous apportons à l'immense édifice que représente la sauvegarde de l'environnement puisse, dans un avenir proche, contribuer à une amélioration de cette qualité de la vie que nous poursuivons tous.

## 1. AVANT-PROPOS

Dans la plupart des pays industrialisés, le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) est considéré comme un des plus dangereux polluants atmosphériques. Les effets néfastes du SO<sub>2</sub> sur la santé sont bien connus. Il est admis qu'une concentration moyenne annuelle à l'immission de 100 µg/Nm<sup>3</sup> est excessive. Des études épidémiologiques menées aux Etats-Unis dans la région de New York ont montré une corrélation significative entre la concentration en SO<sub>2</sub> et le taux de mortalité journalière. Celui-ci était de 1,5 % en dessous du taux prévu, pour des concentrations en

In eerste instantie gaat onze dank naar het I.W.O.N.L. voor zijn medewerking en financiële steun waarzonder deze belangrijke studie niet tot een goed einde zou zijn gebracht.

Onze dank wensen wij vervolgens te betuigen aan de Société de la Vieille Montagne evenals aan de centra die zo vruchtbaar hebben meegewerkt aan de onderzoeken, en aan hun afgevaardigden in onze Coördinatiecommissie voor de zorg waarmee zij hun contract hebben uitgevoerd en voor de waardevolle adviezen en raadgevingen die zij ons in de loop van deze twee jaren van nauwe samenwerking hebben verstrekt. Wij vernoemen voor het O.C.W. de heren J. Reichert, J. Huet en F. Choquet ; voor het W.T.C.B. de heren H. Motteu, C. De Pauw en E. Rousseau ; voor de F.S.A.E. de heren R. Impens en R. Paul ; voor het NIEB de heren P. Ledent en R. Bonsang ; voor de S.A. Dumont-Wautier mevrouw Mignolet en voor de V.K.K.D. de heren Ph. Dumont, A. Dispas en P. Amand.

\*\*\*

Met genoegen kunnen wij u mededelen dat de V.K.K.D. met deze studie haar doelstellingen heeft kunnen bereiken :

- enerzijds de ontdekking van diverse procédés voor het gebruik en/of verwerking van sulfiethoudend afval, waarmee bij toepassing op industriële schaal, deze nevenproducten zullen kunnen worden gevaloriseerd ;
- anderzijds de promotie van de techniek voor de ontzwaveling van rookgassen door middel van kalk, bij de betrokken administraties en bedrijven.

Wij vertrouwen erop dat het steentje dat wij aandragen voor het immense gebouw dat de milieubescherming is, in de nabije toekomst mag bijdragen tot een verbetering van de kwaliteit van het leven waarnaar wij allen streven.

## 1. VOORWOORD

Zwaveldioxyde (SO<sub>2</sub>) wordt in de meeste geïndustrialiseerde landen aangezien als één der gevaarlijkste luchtverontreinigers. De schadelijke uitwerking van SO<sub>2</sub> op de gezondheid is wel bekend. Aangenomen wordt dat een gemiddelde jaarconcentratie bij de immissie van 100 µg/Nm<sup>3</sup> te hoog is. Epidemiologische studies die in de USA in de streek van New York werden gedaan, hebben aangetoond dat er zeker een verband bestaat tussen de SO<sub>2</sub>-concentratie en het dagelijkse sterftecijfer. Dit cijfer was 1,5 % lager dan het voorziene percentage als de SO<sub>2</sub>-concentratie bij

SO<sub>2</sub> à l'immission inférieures à 30 µg/Nm<sup>3</sup> et 2 % plus élevé pour des concentrations de 500 µg/Nm<sup>3</sup>. Ces constatations ont été établies en tenant compte d'autres variables de la pollution atmosphérique, comme le coefficient de brouillard, la température, etc.

L'action du SO<sub>2</sub> est particulièrement néfaste chez les enfants de moins de 12 ans. Il a été démontré que les cas de bronchite chronique étaient plus nombreux dans les communautés fortement polluées.

Les dommages causés aux constructions et œuvres d'art sont à l'étude. Le coût économique n'a pas encore été établi, mais il apparaît déjà comme étant très important.

L'augmentation des émissions de SO<sub>2</sub> et la formation subséquente des sulfates provoquent une acidification des pluies. Ce phénomène a été constaté principalement dans les pays nordiques, comme la Suède et la Norvège. Il en résulte une acidification des lacs et des rivières avec, comme conséquence, une réduction de la croissance des forêts.

Une mortalité élevée des poissons du type salmonidé a été observée dans les lacs. Elle est attribuée à une diminution de la valeur du pH.

La majorité des réactions entre le SO<sub>2</sub> et les sulfates provoquent des effets nuisibles aux plantes. Par sa haute densité de population et sa forte activité industrielle, la Belgique est une région où la concentration en SO<sub>2</sub> dans l'air ambiant est particulièrement élevée. Alors que la teneur moyenne en SO<sub>2</sub> à l'immission est comprise entre 10 et 15 µg/Nm<sup>3</sup>, on note en Belgique dans les grandes agglomérations des teneurs de 100 à 200 µg/Nm<sup>3</sup> [1] avec des maxima journaliers qui peuvent atteindre 1100 µg/Nm<sup>3</sup> [2].

La consommation d'énergie dans les pays de la CEE progresse chaque année. Elle implique une augmentation de la combustion de matériaux organiques sulfureux et, par voie de conséquence, des émissions de SO<sub>2</sub> malgré le développement attendu de l'énergie nucléaire.

Il convient dès lors d'accorder une priorité à la réduction des émissions de SO<sub>2</sub> pour en limiter la concentration à l'immission.

En ce qui concerne les émissions de SO<sub>2</sub> en Belgique, nous reprenons ci-après des statistiques établies en 1973 [3]. Nous avons repris dans l'ordre décroissant les quantités de SO<sub>2</sub> émises selon la nature du combustible et le secteur économique.

	SO <sub>2</sub> /an
Fuels lourds — raffinerie, cokerie, sidérurgie	415.000 t
Fuels lourds — centrales électriques	261.000 t
Brai — centrales électriques	106.000 t
Gasoil — domestique	95.500 t

de immissie lager was dan 30 µg/Nm<sup>3</sup> en 2 % hoger bij concentraties van 500 µg/Nm<sup>3</sup>. Bij deze vaststellingen werd rekening gehouden met andere variabele factoren in de luchtverontreiniging zoals de dikte van de mist, de temperatuur, enz.

De werking van het SO<sub>2</sub> is bijzonder schadelijk voor kinderen onder 12 jaar. Aangehouden werd dat chronische bronchitis vaker voorkwam in fel verontreinigde milieus.

Bestudeerd wordt welke schade wordt toegebracht aan gebouwen en kunstwerken. De economische kostprijs werd nog niet berekend, maar zou toch reeds zeer hoog liggen.

Door een verhoging van de SO<sub>2</sub>-emissies en de daaruitvolgende vorming van sulfaten treedt een verzuring van de regen op. Dit verschijnsel werd voornamelijk in de noordelijk gelegen landen waargenomen, zoals in Zweden en Noorwegen. Hieruit resulteert een verzuring van de meren en rivieren met een tragere groei van de wouden als gevolg.

In de meren werd een hoge vissterfte vastgesteld, met name van zalmvis. Ze wordt aan een daling van de pH-waarde toegeschreven.

De meeste reacties tussen SO<sub>2</sub> en sulfaten hebben een schadelijke uitwerking op planten. België is door zijn hoge bevolkingsdichtheid en zijn grotere industriële bedrijvigheid een streek met een bijzonder hoog SO<sub>2</sub>-gehalte in de omgevingslucht. Terwijl het gemiddelde SO<sub>2</sub>-gehalte bij de immissie tussen 10 en 15 µg/Nm<sup>3</sup> ligt, worden in België in de grote agglomeraties gehalten van 100 tot 200 µg/Nm<sup>3</sup> genoteerd [1] met dagmaxima die tot 1100 µg/Nm<sup>3</sup> kunnen bereiken [2].

Het energieverbruik in de EEG-landen stijgt elk jaar. Dit betekent dat steeds meer zwavelhoudende organische materialen worden verbrand en dus ook meer SO<sub>2</sub>-emissies voorkomt ondanks de verwachte ontwikkeling van de kernenergie.

De beperking van de SO<sub>2</sub>-emissie moet dus prioriteit krijgen om de concentratie bij de immissie af te remmen.

Voor de SO<sub>2</sub>-emissie in België hebben wij hierna statistieken over 1973 overgenomen [3]. In dalende volgorde hebben wij de hoeveelheden SO<sub>2</sub> opgenomen die volgens de aard van de brandstof en de economische sector werden geëmitteerd.

	SO <sub>2</sub> /jaar
Zware stookolie — raffinaderij, cokesfabriek, ijzer- en staalindustrie	415.000 t
Zware stookolie — elektrische centrales	261.000 t
Pek — elektrische centrales	106.000 t
Gasolie — huishoudelijk verbruik	95.500 t
Steenkool — raffinaderij, cokesfabriek, ijzer- en staalindustrie	82.000 t



Charbon — raffinerie, cokerie, sidérurgie	82.000 t
Fuels lourds — domestique	48.000 t
Carburants divers — centrales électriques	45.500 t
Charbon — domestique	45.000 t
Total :	1.098.000 t

On constate que les émissions de SO<sub>2</sub> proviennent principalement du fuel lourd.

\*\*\*

On peut envisager trois techniques pour réduire les émissions sulfureuses :

- la première consiste à utiliser d'autres formes d'énergie, comme le nucléaire ou des combustibles à faible teneur en soufre ;
- la seconde consiste à abaisser les teneurs en soufre des combustibles ;
- vient ensuite la désulfuration des gaz de combustion.

Ces procédés ne sont pas concurrents mais complémentaires.

Le raffinage du pétrole brut par distillation conduit à une concentration du soufre dans les fractions lourdes. La désulfuration des combustibles pétroliers repose sur le principe de l'hydródésulfuration. Il est relativement coûteux en raison du prix élevé de l'hydrogène. La consommation d'hydrogène est d'autant plus importante que la fraction est plus lourde. Pratiquement, on peut dire que le procédé est économiquement rentable mais semble limité aux fractions lourdes.

Nous reprenons ci-après un extrait d'un rapport de la Commission des Communautés Européennes [4] sur la compétitivité des procédés de désulfuration des fuels et des fumées :

« A moyen terme, on doit donner une plus grande importance à d'autres techniques anti-pollution. Dans l'état actuel des connaissances et d'après l'expérience acquise, il semble que la désulfuration du fuel oil - huile résiduelle et le traitement des gaz de fumée ne présentent pas de grandes différences de coûts par tonne de soufre extraite.

» Cependant, si les difficultés d'approvisionnement persistent et si le prix des combustibles liquides continue à augmenter, le développement et l'introduction de techniques de désulfuration des fumées (FGD) pourraient devenir plus intéressants que les autres méthodes. La FGD peut être appliquée, en principe, à tous les types d'installations fixes neuves utilisant des combustibles solides, liquides ou gazeux et permet d'économiser plus de 7 % du pétrole brut qui serait nécessaire avec le procédé de désulfuration du fuel oil.

Zwarte stookolie — huishoudelijk verbruik	48.000 t
Diverse brandstoffen — elektrische centrales	45.500 t
Steenkool — huishoudelijk verbruik	45.000 t

Totaal : 1.098.000 t

Men stelt vast dat de SO<sub>2</sub>-emissie voornamelijk van de zware stookolie afkomstig is.

\*\*\*

Om de zwavelemissie tegen te gaan, kunnen drie technieken in overweging worden genomen :

- de eerste bestaat in de aanwending van andere energievormen zoals kernenergie of brandstoffen met een laag zwavelgehalte ;
- de tweede bestaat in het doen dalen van het zwavelgehalte van de brandstoffen ;
- tenslotte is er de ontzwaveling van de verbrandingsgassen.

Deze procédés zijn niet concurrerend, maar vullen elkaar aan.

Het raffineren van ruwe olie door distillatie brengt mee dat zich zwavel gaat concentreren in de zware fracties. Het ontzwavelen van petroleumbrandstoffen berust op het principe van de hydrodesulfurering. Dit is relatief duur door de hoge prijs van de waterstof. Naarmate de fractie zwaarder is, wordt ook meer waterstof verbruikt. Praktisch mag men zeggen dat het procédé economisch renderend is, maar tot de zware fracties beperkt blijft.

Hierna volgt een uittreksel uit een rapport van de Commissie van de Europese Gemeenschappen [4] over de competitiviteit van procédés voor de ontzwaveling van olie en rookgassen.

« Op middellange termijn dient meer belang te worden gehecht aan andere technieken voor de bestrijding van de verontreiniging. Bij de huidige stand van de kennis en volgens de opgedane ervaring schijnen de kosten voor de ontzwaveling van stookolie - restolie en voor de behandeling van rookgassen niet ver uit elkaar te liggen per ton geëxtraheerde zwavel.

» Als de bevoorradingmoeilijkheden evenwel blijven voortduren en als de prijzen van de vloeibare brandstoffen blijven stijgen, zouden de ontwikkeling en de invoering van technieken voor de ontzwaveling van rookgassen (FGD) interessanter kunnen worden dan de overige methodes. De FGD-techniek kan in principe worden toegepast op alle types van nieuwe vaste installaties die met vaste, vloeibare of gasachtige brandstoffen werken en waarmee ruim 7 % van de ruwe olie kan bespaard worden die nodig zou zijn met het procédé voor de ontzwaveling van stookolie.

» Pour cette raison, les pays membres de la CEE doivent consentir un effort pour promouvoir le développement et l'introduction rapides, à l'échelle industrielle, des procédés de désulfuration des fumées, en particulier dans les installations de combustion fixe de grandes dimensions dont les exigences en matière d'approvisionnement en combustible et d'implantation seraient ainsi assouplies ».

En ce qui concerne le procédé qui consiste à construire de hautes cheminées en vue de réduire la concentration en SO<sub>2</sub> au sol par dispersion des émissions en altitude, dans ce même rapport [4] on cite :

« Du point de vue de la protection de l'environnement, il n'est pas rationnel de déplacer la pollution à longue distance en direction des régions moins polluées. Aussi la technique de dispersion des polluants utilisant uniquement de hautes cheminées doit-elle être envisagée avec prudence, à moins qu'il n'existe suffisamment de preuves que le transport de l'anhydride sulfureux et des oxydes d'azote ne soit pas une nuisance en lui-même, que leur transformation dans l'atmosphère ne donne pas lieu à la formation d'autres composés nocifs et qu'ils soient rapidement éliminés de l'atmosphère. Même s'il se pose des problèmes de pollution, la technique de dispersion peut au moins être tolérée comme *méthode de secours à court terme*, pourvu que l'adjonction ultérieure d'une unité de désulfuration des fumées soit demandée dès la mise au point de telles installations ».

\* \* \*

Il existe plus de 60 procédés de désulfuration des gaz résiduels [5]. Parmi l'ensemble de ces techniques, il apparaît que les procédés par lavage humide des gaz au travers d'une solution alcaline de chaux ont évolué plus rapidement que les autres. Ils ont largement dépassé le stade de l'usine pilote et sont appliqués aux Etats-Unis, au Japon et en Europe dans des installations industrielles importantes.

Actuellement, plus de 80 % des procédés de désulfuration des fumées seraient à base de lavage à la chaux. On a pu croire que certains procédés de désulfuration pouvant fournir des sous-produits comme du dioxyde de soufre concentré, du sulfate d'ammonium, du soufre élémentaire ou de l'acide sulfurique, se développeraient plus rapidement que les procédés à la chaux.

Il n'en a rien été par suite de la complexité des procédés de récupération, des difficultés d'écoulement des sous-produits dues à une rapide saturation du marché et du coût prohibitif des procédés malgré la valeur des produits récupérés.

» Daarom moeten de lidstaten van de EEG een inspanning doen ter bevordering van de snelle ontwikkeling en invoering op industriële schaal van de procédés voor de ontzwaveling van rookgassen, in het bijzonder van de installaties voor vaste verbranding met grote afmetingen waarvan de eisen inzake brandstofbevoorrading en vestiging op die manier zouden worden versoepeld. »

Aangaande het procédé van de bouw van hoge schoorstenen om de SO<sub>2</sub>-concentratie op de bodem te verminderen door een emissiespreiding in de hoogte, wordt in hetzelfde rapport [4] het volgende vermeld.

« Vanuit het standpunt van milieubescherming is het niet verstandig de verontreiniging op grote afstand te verplaatsen naar minder verontreinigde streken. Ook moet de techniek voor de spreiding van verontreinigde bestanddelen waarbij alleen van hoge schoorstenen wordt gebruik gemaakt, met de nodige voorzichtigheid worden bekeken, tenzij genoegzaam bewezen is dat het transport van zwaveldioxyde en van stikstofoxyden op zich niet schadelijk is, dat hun omzetting in de lucht geen andere schadelijke verbindingen doet ontstaan en dat ze snel uit de atmosfeer verdwijnen. Maar als zich verontreinigingsproblemen voordoen, kan de dispersietechniek minstens worden aanvaard als een *methode voor hulp op korte termijn*, op voorwaarde dat later, zodra deze installaties er zijn, er een installatie voor de ontzwaveling van rookgassen wordt opgevraagd. »

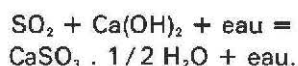
\* \* \*

Er bestaan meer dan 60 procédés voor de ontzwaveling van restgassen [5]. Van al deze technieken lijken de procédés met een natte scheiding van de gassen doorheen een alkaline-oplossing sneller dan de overige te zijn geëvolueerd. Ze hebben het stadium van de proefabriek reeds lang achter zich en worden gebruikt in grote industriële installaties in de Verenigde Staten, Japan en Europa.

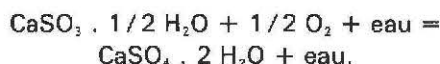
Momenteel zou bij meer dan 90 % van de procédés voor de ontzwaveling van rookgassen de scheiding met kalk worden toegepast. Men zou kunnen aannemen dat sommige ontzwavelingsprocédés zich sneller zouden ontwikkelen dan de procédés met kalk, omdat zij nevenprodukten als geconcentreerd zwaveldioxyde, ammoniumsulfaat, elementair zwavel of zwavelzuur konden opleveren.

Hiervan is niets terecht gekomen, omdat de terugwinningsprocédés te ingewikkeld waren, omwille van de moeilijkheden met de afzet van de nevenprodukten omdat de markt snel verzadigd was en de te hoge kosten van de procédés ondanks de waarde van de teruggewonnen produkten.

Le procédé de désulfuration des gaz à la chaux consiste à absorber le  $\text{SO}_2$  dans un laveur d'air (scrubber) au moyen d'une solution contenant de l'hydroxyde de calcium suivant la réaction :



Par ajustement de la valeur du pH et par contact avec l'oxygène de l'air, on peut oxyder le sulfite de calcium en sulfate de calcium ou gypse, selon la réaction :



On explique les raisons du succès de ce procédé par les avantages qu'on lui reconnaît :

- rendement en désulfuration : 90 à 95 % ;
- rendement en solide : environ 90 % (chaux) ;
- grande économie du procédé, tant au niveau des investissements que des coûts de fonctionnement.

Les problèmes d'entartrage par incrustation des sulfites et sulfates de calcium dans les scrubbers ont été résolus pour les installations dites de la deuxième génération. Des travaux de recherche ont permis de comprendre et de maîtriser le chimisme complexe des formations de dépôts de sulfite et sulfate.

Outre l'ajout de certains additifs qui augmentent la solubilité des sels formés et jouent le rôle de catalyseurs de réactions, les incrustations sont évitées par l'application des mesures ci-après :

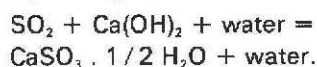
- maintien du pH en-deçà d'un seuil critique ;
- optimisation du rapport liquide/gaz ;
- structure et dimensionnement des installations.

Actuellement, la fiabilité des systèmes de désulfuration des gaz à la chaux serait supérieure à celle d'autres équipements anti-pollution, comme, par exemple, les précipitateurs électrostatiques. Certains constructeurs garantissent une disponibilité des installations de l'ordre de 95 %.

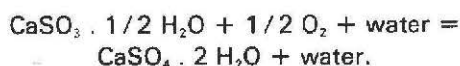
Il est plus économique d'utiliser de la chaux plutôt que du calcaire. En effet, si l'on tient compte des valeurs neutralisantes des deux matériaux correspondant à leur poids moléculaire respectif, on devra multiplier le prix du calcaire par le rapport des poids moléculaires de la chaux et du calcaire, soit par un rapport de  $100/56 = 1,8$ .

De plus, il faut prendre en considération que le calcaire a une réactivité plus faible que la chaux vis-à-vis du  $\text{SO}_2$ . Il s'ensuit que les temps de réaction sont plus longs. En raison des densités en vrac des maté-

Het procédé voor de ontstoffing van gassen met kalk bestaat in het opvangen van het  $\text{SO}_2$  in een scrubber door middel van een oplossing met calciumhydroxyde volgens de reactie :



Door regeling van de pH-waarde en door het contact met de zuurstof van de lucht kan het calciumsulfiet oxyderen in calciumsulfaat of gips, volgens de reactie :



Het succes van dit procédé vindt zijn verklaring in de voordelen die het worden toegeschreven :

- het rendement van de ontzwaveling : 90 tot 95 % ;
- het rendement van de vaste stof : ongeveer 90 % (kalk) ;
- de grote besparing van het procédé, zowel inzake investeringen als werkingskosten.

De problemen met ketelsteenaanslag door het aanzetten van sulfieten en calciumsulfaten in de scrubbers werden opgelost voor de zogenaamde installaties van de tweede generatie. Door onderzoek kon men inzicht krijgen in de ingewikkelde scheikundige vorming van sulfiet- en sulfaat-aanslag, en kon men dit fenomeen onder controle krijgen.

Naast het toevoegen van bepaalde toevoegmiddelen waardoor de oplosbaarheid van de gevormde zouten toeneemt en die de rol van reactiecatalysator spelen, wordt de aanslag vermeden door de navolgende maatregelen te nemen :

- de pH-waarde onder een bepaalde kritieke drempel houden ;
- de verhouding vloeistof/gas optimaliseren ;
- structuur en afmetingen van de installaties.

Op dit ogenblik zouden de systemen voor de ontzwaveling van gas door middel van kalk betrouwbaarder zijn dan alle overige installaties voor de bestrijding van de verontreiniging, zoals bijvoorbeeld de elektrostatische bezinkinstallaties. Sommige producenten waarborgen dat de installaties voor zo wat 95 % beschikbaar zullen zijn.

Economisch gezien kan beter kalk dan kalksteen worden gebruikt. Als men immers rekening houdt met de neutraliserende waarde van beide materialen die overeenstemt met hun respectievelijk moleculair gewicht, moet men de prijs van de kalksteen vermenigvuldigen met de verhouding van het moleculaire gewicht van kalk en kalksteen, dat wil zeggen met een verhouding van  $100/56 = 1,8$ .

Daarenboven dient te worden overwogen dat kalksteen een geringere reactiviteit ten opzichte van  $\text{SO}_2$  bezit dan kalk. Hieruit volgt dat de reactietijden langer zijn. Omwille van de dichtheid voor de losse

riaux et de leur valeur neutralisante, il faut prévoir un volume de stockage 2 fois plus important pour le calcaire.

Il est à noter également que le calcaire a un rendement plus faible que la chaux. Ceci tient au fait que l'absorption du  $\text{SO}_2$  sur la particule alcaline se fait superficiellement et que le rendement en solide est inversement proportionnel au diamètre des particules. Généralement, on cite des rendements de 80 % pour le calcaire moulu et de 95 % pour la chaux.

Le seul inconvénient à une plus large application du procédé de désulfuration à la chaux est l'obtention des boues résiduelles.

Si l'on tient compte d'un rendement d'absorption de 90 % et d'une teneur en CaO disponible de 90 %, la fixation d'une tonne de  $\text{SO}_2$  nécessite 875 kg de chaux vive. La quantité de boues résiduelles sèches sous forme de sulfite de calcium ( $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) sera de 2 t ou de 2,68 t sous forme de sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ). Les quantités de boues résiduelles sont donc très importantes et au prorata du niveau de la pollution engendrée par les émissions de  $\text{SO}_2$ . Dans ces boues, la présence de sulfite pourrait, par ses propriétés réductrices, créer une autre forme de pollution par contamination des nappes phréatiques lors de l'épandage des boues.

\* \* \*

Il convenait donc de s'intéresser particulièrement au problème du traitement des résidus.

Consciente de ce problème, à savoir : le stockage et, si possible, la valorisation des boues sulfiteuses résiduelles de la désulfuration des gaz à la chaux, l'U.C.C.D. s'est attelée à cette tâche en étroite collaboration avec les cinq centres de recherche déjà cités.

Les travaux ont été entamés en septembre 1977 et achevés en août 1979.

\* \* \*

Le premier objectif que l'U.C.C.D. s'est fixé a été de répertorier les solutions qui ont été adoptées à l'étranger pour la mise en décharge ou la valorisation des sous-produits.

Dans plusieurs pays, des solutions ont été trouvées.

Aux Etats-Unis, un brevet déposé par la firme Corson propose d'utiliser les résidus sulfiteux pour la fabrication d'un matériau de construction routière. Les sulfites sont mélangés à des cendres volantes et à

matériaux et omwille van hun neutraliserende waarde dient een opslagcapaciteit te worden voorzien die tweemaal groter is voor kalksteen.

Tevens dient te worden opgemerkt dat het rendement van kalksteen lager is dan dat van kalk. Dit kan worden verklaard door het feit dat de absorptie van  $\text{SO}_2$  op het alcalinedeeltje oppervlakkig gebeurt en dat het rendement van vaste stof omgekeerd evenredig is met de diameter van de deeltjes. Over het algemeen wordt een rendement van 80 % voor gemalen kalksteen opgegeven en 95 % voor kalk.

Het enige euvel bij een ruimere toepassing van het procédé voor de ontzwaveling met kalk vormt het residuele slib.

Als men rekening houdt met een absorberingsrendement van 90 % en met een gehalte aan beschikbare CaO van 90 %, is er 875 kg ongebluste kalk nodig om een ton  $\text{SO}_2$  te binden. De hoeveelheid droge restslib in de vorm van calciumsulfiet ( $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) bedraagt 2 ton of 2,68 ton in de vorm van calciumsulfaat ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ). De hoeveelheden restslib zijn dus zeer groot en in verhouding tot het niveau van de verontreiniging die door de emissie van  $\text{SO}_2$  wordt veroorzaakt. In dit slib zou het voorkomen van sulfiet door zijn reducerende eigenschappen een andere vorm van verontreiniging kunnen scheppen, nl. door besmetting van het grondwater bij het verspreiden van het slib.

\* \* \*

Er diende dus bijzondere aandacht te worden besteed aan het probleem van de behandeling van de afvalstoffen.

Zich bewust van dit probleem, nl. de opslag en zo mogelijk de valorisatie van het residuele sulfiet-slib uit de ontzwaveling van rookgassen met kalk, heeft de V.K.K.D. in nauwe samenwerking met de vijf eerder genoemde onderzoekcentra deze zaak onderzocht.

De werkzaamheden begonnen in september 1977 en werden in augustus 1979 voltooid.

\* \* \*

De V.K.K.D. had als eerste doel een overzicht samen te stellen van de oplossingen die in het buitenland werden aangewend om zich te ontdoen van nevenprodukten of om ze te valoriseren.

In diverse landen werden oplossingen aangetroffen.

In de Verenigde Staten werd door de firma Corson een octrooi genomen op een procédé om de sulfietafvalstoffen te gebruiken voor de vervaardiging van een wegenbouw materiaal. Het sulfiet wordt gemengd met vlieg-as en met een steenachtig

un agrégat pierreux. L'ajout de quelques pourcents de chaux sert de catalyseur au durcissement du mélange.

Au Japon, les sulfites sont oxydés en sulfates de calcium et utilisés pour la fabrication du ciment et du plâtre. Les centrales électriques au Japon obtiennent, comme sous-produits de la désulfuration des gaz, du gypse ou du sulfate en lieu et place des sulfites. La situation du Japon est particulière. Le pays est très industrialisé, il a une forte densité de population, très sensibilisée à la protection de l'environnement. De plus, les combustibles importés ont des teneurs en S élevées et le pays ne dispose pas de gisements naturels de gypse. Cette situation explique le développement rapide des procédés de désulfuration des gaz de combustion. La plupart des installations (on en compte une trentaine) ont une capacité moyenne de 500.000 Nm<sup>3</sup>/h. Certaines installations traitent jusque 1,5 million Nm<sup>3</sup>/h.

La grande majorité des installations utilisent de la chaux comme absorbant, donnant comme sous-produit du gypse qui est destiné à la fabrication du ciment et du plâtre. Selon le Professeur Murakami, Directeur du Centre de Recherches de la Chaux et du Gypse au Japon (exposé présenté au Congrès de la Chaux à Berlin en mai 1974), tous les problèmes relatifs à la désulfuration des gaz à la chaux sont résolus, tels le rendement de désulfuration, les problèmes d'incrustation, de corrosion, ainsi que l'obtention de gypse de bonne qualité comparable aux gypses naturels.

En Allemagne, des essais de remplissage de galeries de mines au moyen d'anhydrite, c'est-à-dire de sulfate de calcium anhydre cuit à des températures supérieures à 500°C, ont donné des résultats encourageants. Il faut souligner que chaque solution est spécifique aux conditions économiques du pays où elle est appliquée.

En ce qui concerne la Belgique, lorsqu'on parle de gypse résiduaire, on cite volontiers les cinq fabricants d'acide phosphorique qui produisent annuellement plus de 2 millions de tonnes de phosphogypse. Cependant, aux dires de certains utilisateurs, une grande partie de ces gypses ne convient pas à la fabrication du ciment et du plâtre en raison des impuretés qu'ils contiennent, tels que les résidus de phosphates, les composés fluorés et sodiques.

Dans le cas des gypses résiduaires provenant de la désulfuration des gaz, il faut remarquer que la teneur en CaO de la chaux est généralement supérieure à 90 % et qu'elle ne contient aucun sel soluble. Si les gaz de combustion sont préalablement dépoussiérés, le gypse obtenu sera très pur, donc facilement utilisable pour tous les usages connus des sulfates de calcium.

toeslagmateriaal. Het toevoegen van enkele procenten kalk dient als catalysator bij de verharding van het mengsel.

In Japan wordt het sulfiet geoxydeerd tot calciumsulfaat en gebruikt voor de produktie van cement en pleister. De elektrische centrales in Japan krijgen als nevenprodukt van de gasontzwaveling gips of sulfaat in de plaats van sulfiet. De Japanse situatie is wel apart. Het is een sterk geïndustrialiseerd land, de bevolkingsdichtheid is er hoog en het volk is zeer gevoelig voor de problematiek rond de milieubescherming. Bovendien hebben de ingevoerde brandstoffen een hoog S-gehalte en het land beschikt niet over natuurlijke gipsafzettingen. Deze situatie verklaart de snelle ontwikkeling van de procédés voor de ontzwaveling van verbrandingsgassen. Het merendeel van de installaties (er zijn er zo'n dertigtal) heeft een gemiddelde capaciteit van 500.000 Nm<sup>3</sup>/h. Sommige installaties verwerken tot 1.500.000 Nm<sup>3</sup>/h.

Veruit de meeste installaties gebruiken kalk als absorbeermiddel hetgeen gips als nevenprodukt oplevert en dit is voor de produktie van cement en gips bestemd. Volgens Professor Murakami, Directeur van het Centrum voor Onderzoek van Kalk en Gips in Japan, (uiteenzetting op het Congres over Kalk in Berlijn in mei 1974) zijn alle problemen opgelost inzake de gasontzwaveling met behulp van kalk, zoals het rendement van de ontzwaveling, de problemen met de aanslag, de corrosie en het produceren van een kwalitatief goed gips dat de vergelijking met natuurlijk gips kan doorstaan.

In Duitsland leverden proeven met het opvullen van mijngalerijen door middel van anhydriet, dat wil zeggen op meer dan 500°C gebrand, watervrij calciumsulfaat, bemoedigende resultaten op. Er dient te worden onderstreept dat elke oplossing specifiek is voor economische omstandigheden in het land waar ze wordt toegepast.

Als men spreekt over restgips, noemt men graag, wat België betreft, de vijf producenten van fosforzuur die jaarlijks meer dan 2 miljoen ton fosfogips produceren. Volgens sommige gebruikers is een groot deel van dit gips echter niet geschikt voor de produktie van cement of pleister, omdat het teveel onzuiverheden bevat zoals fosfaatresidus, fluor- en sodaverbindingen.

Voor residueel gips, afkomstig van de ontzwaveling van rookgassen, dient te worden opgemerkt dat het CaO-gehalte van kalk over het algemeen meer dan 90 % bedraagt en dat het geen enkel oplosbaar zout bevat. Als de verbrandingsgassen vooraf ontstof zijn, zal het verkregen gips zeer zuiver zijn en dus gemakkelijk te gebruiken bij alle gekende toepassingen van calciumsulfaat.

Malgré les très nombreux articles, les brevets, les rapports de voyages d'études et les conférences, on a peu de renseignements précis sur les conditions de stockage ainsi que sur les procédés d'utilisation des boues. Les propriétés du sulfite de calcium ( $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) obtenu par absorption du  $\text{SO}_2$  sur la chaux, sont mal connues. Cette étude bibliographique a confirmé l'intérêt de réaliser une recherche sur le sujet.

Les participants à cette recherche ont défini leur domaine d'investigation en fonction de leurs possibilités et de leur compétence.

Le *Centre de Recherches Routières* (C.R.R.) a étudié les possibilités d'utilisation des boues comme matériaux routiers.

Le *Centre Scientifique et Technique de la Construction* (C.S.T.C.) a recherché la convenance des boues à la fabrication de matériaux de construction.

La *Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat* (F.S.A.E.) s'est penchée sur le problème de l'emploi des boues pour l'amendement des sols et les effets de l'incorporation des sulfites sur la croissance des végétaux.

L'*Institut National des Industries Extractives* (I.N.I.E.X.) a étudié les conditions de mise en décharge et les risques de pollution des nappes phréatiques.

Le *Laboratoire des Carrières et Fours à Chaux Dumont-Wautier* a axé son programme de recherche sur la valorisation des boues pour la fabrication de plâtre et d'anhydrite.

Pour mener à bien cette étude, l'U.C.C.D. devait disposer d'échantillons de sous-produits de désulfuration des gaz à la chaux.

La Société de la Vieille Montagne a fourni des lots de sous-produits provenant d'une installation de désulfuration de gaz de grillage de blende située à Viviez dans l'Aveyron. Les autres échantillons ont été obtenus par désulfuration in situ au moyen d'une installation micro-pilote fonctionnant selon le même principe qu'un appareil industriel, soit par contact intime des gaz sulfureux et d'une solution de lait de chaux.

Au moyen de cette installation, l'INIEX a prélevé des fumées de deux centrales électriques fonctionnant, l'une au fuel lourd, l'autre au charbon, et d'une verrerie. Les études ont été menées de front sur tous les types de boues obtenus. La caractérisation des échantillons et les essais entrepris nous ont permis de constater une bonne similitude entre les différents matériaux.

Ondanks de overvloed aan artikels, de octrooien, de rapporten over studiereizen en de congressen zijn er weinig preciese gegevens bekend over de opslagomstandigheden evenals over de procédés voor het gebruik van het slib. De eigenschappen van het calciumsulfiet ( $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) dat door absorptie van  $\text{SO}_2$  op kalk wordt verkregen, zijn slecht gekend. Deze literatuurstudie heeft het belang van een onderzoek terzake bevestigd.

Afhankelijk van hun mogelijkheden en van hun bevoegdheid hebben de deelnemers aan dit onderzoek hun onderzoeksdomein vastgesteld.

Het *Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw* (O.C.W.) heeft de mogelijkheden voor het gebruik van het slib als wegenbouw materiaal bestudeerd.

Het *Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf* (W.T.C.B.) heeft onderzocht of het slib kon dienen voor de fabricage van bouwmaterialen.

De « *Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat* » (F.S.A.E.) heeft zich gebogen over het probleem van het gebruik van het slib voor het verbeteren van de bodem en de weerslag van de inbreng van sulfiet op de plantengroei.

Het *Nationaal Instituut voor de Extractiebedrijven* (NIEB) heeft de voorwaarden voor de afvoer en de risico's voor de verontreiniging van het grondwater bestudeerd.

Het *Laboratoire des Carrières et Fours à Chaux Dumont-Wautier* heeft zijn researchprogramma op de valorisatie van het slib voor de fabricage van pleister en anhydriet toegespijst.

Om deze studie tot een goed einde te brengen, moest de V.K.K.D. beschikken over monsters van nevenprodukten afkomstig van gasontzwaveling door middel van kalk.

De Société de la Vieille Montagne heeft partijen nevenprodukten geleverd die afkomstig waren van een installatie voor de ontzwaveling van gassen van het roosteren van blende, gelegen te Viviez in Aveyron. De overige monsters werden verkregen door een ontzwaveling ter plaatse met behulp van een micro-proefinstallatie; deze werkte volgens hetzelfde principe als industriële apparatuur dat wil zeggen door nauw contact van de zwavelige gassen met een oplossing kalkmelk.

Met behulp van deze installatie heeft het NIEB monsters rookgassen genomen van twee elektrische centrales waarvan de ene met zware stookolie werd gestookt en de andere met steenkool, en van een glasblazerij. De studies werden tegelijk op alle soorten slib gedaan. Door het karakteriseren van de monsters en de gedane proeven hebben wij kunnen vaststellen dat de verschillende materialen een grote mate van gelijkheid vertoonden.

En ce qui concerne la transformation des sulfites en sulfates de calcium par voie humide, la Société de la Vieille Montagne a entrepris une étude en laboratoire et à l'échelle pilote pour fixer les conditions optimales des réactions d'oxydation. Deux rapports nous ont été transmis à ce sujet. A la lecture de ceux-ci, il apparaît que le processus de transformation ne pose pas de problème majeur. Moyennant un ajustement de la valeur du pH à 4,5 par incorporation d'acide, pour un temps de séjour de trois heures à une température de 20°C, le rendement d'oxydation a été supérieur à 90 %. Le même procédé a été appliqué par l'INIEX à une plus petite échelle sur les échantillons obtenus en centrales électriques et en verrerie.

## 2. RESULTATS DES RECHERCHES

Le Centre de Recherches Routières a entrepris une étude préliminaire en laboratoire, en vue de caractériser et différencier les deux types de boues de désulfuration (sulfites - sulfates).

Cette distinction est fondamentale car elle devrait permettre au praticien d'intervenir, en connaissance de cause, sur les moyens à mettre en œuvre pour obtenir la compacité optimale.

Par leurs caractéristiques physico-chimiques et géotechniques, on peut rattacher les boues à des sols fins du type limon. Cependant, à l'encontre de ces sols, celles-ci sont dépourvues de cohésion et de plasticité. Elles sont sensibles à l'eau, gélives et leur gonflement à l'imbibition indique qu'il serait nécessaire, lors de leur mise en remblais, d'utiliser à la fois une protection adéquate aux intempéries et aux remontées capillaires. Cette sensibilité à l'eau ne permet pas de réaliser une mise en œuvre du matériau en remblais lors de fortes précipitations. Les caractéristiques des boues ne répondent pas aux critères de convenance pour leur utilisation comme filler routier.

Les boues de désulfuration présentent une bonne aptitude au compactage et une capacité portante suffisante, pour autant que la teneur en eau puisse être ajustée à la teneur en eau optimale de compactage et que les moyens à mettre en œuvre pour atteindre la compacité maximale selon le type de boues soient réalisés.

Il semble donc que les boues de désulfuration puissent trouver un débouché important pour la construction de remblais routiers, à condition que les précautions nécessaires contre les effets de l'eau aient été prises.

Le C.R.R. émet l'avis qu'il serait souhaitable de poursuivre les études entreprises en réalisant un remblai expérimental afin de vérifier le comportement du matériau dans des conditions réelles de mise en œuvre et d'utilisation.

Wat de omzetting van sulfiet in calciumsulfaat door middel van de natte scheiding betreft, heeft de Société de la Vieille Montagne een laboratoriumstudie uitgevoerd en proeven op grotere schaal gedaan om de optimale voorwaarden voor de oxyderingsreacties vast te stellen. Beide rapporten hierover werden ons ter hend gesteld. Bij lezing blijkt dat het omzettingsproces geen grote problemen oplevert. Als de pH-waarde op 4,5 werd afgesteld bij invoering van zuur, voor een verblijfstijd van drie uur op een temperatuur van 20°C, was het oxyderingsrendement hoger dan 90 %. Hetzelfde procédé werd door het NIEB op kleinere schaal toegepast op monsters van elektrische centrales en van een glasblazerij.

## 2. RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK

Het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw heeft een voorbereidend laboratoriumonderzoek uitgevoerd om de twee soorten ontzwavelingsslib te karakteriseren en van elkaar te onderscheiden (sulfiet-sulfaat).

Het is een fundamenteel verschil, want het zou het in de praktijk mogelijk moeten maken om met kennis van zaken op te treden bij het inzetten van de middelen tot verkrijging van een optimale dichtheid.

Door hun fysisch-chemische en geotechnische kenmerken kan het slib worden verbonden met fijne grondsoorten van het type leem. In tegenstelling met deze grondsoorten is het slib niet plastisch en heeft het geen cohesie. Het is niet waterbestendig, bevriest en het opzwellen ervan bij doorweken geeft aan dat zowel in een adequate beschutting tegen weer en wind als tegen capillaire opstijging moet worden voorzien als het slib voor opvulling wordt gebruikt. De genoemde gevoeligheid voor water maakt het onmogelijk het materiaal als opvulling te gebruiken bij forse neerslag. De kenmerken van het slib voldoen niet aan de criteria om geschikt te zijn als vulmateriaal voor wegenwerk.

Het ontzwavelingsslib is goed geschikt voor verdichting en is draagkrachtig genoeg in zoverre het watergehalte kan worden aangepast aan het optimale watergehalte voor verdichting en in zoverre de middelen voor het bereiken van een maximale verdichting, per soort slib, kunnen worden gerealiseerd.

Het ontzwavelingsslib zou dus een belangrijk afzetgebied kunnen vinden als vulmateriaal in de wegenbouw op voorwaarde dat de nodige voorzorgen tegen de uitwerking van het water zijn genomen.

Het O.C.W. is de mening toegedaan dat de gedane studies zouden moeten worden voortgezet door een experimenteel vulmateriaal te realiseren om het gedrag van het materiaal te kunnen nagaan in reële omstandigheden waarin het zal worden gebruikt en verwerkt.

L'étude bibliographique réalisée par le C.R.R. a mis en évidence l'intérêt de poursuivre les travaux dans le domaine de la fabrication de matériaux composites à base de boues sulfiteuses, de cendres volantes et de chaux. Ces mélanges présentent un caractère pouzzolanique et offrent une possibilité d'utilisation pour la réalisation de remblais et de couches de sous-fondations et de fondations. Des essais expérimentaux permettraient de tirer des conclusions sur ce point particulier.

Le Centre Scientifique et Technique de la Construction a entrepris une série d'essais de fabrication de blocs par incorporation aux boues sous forme de sulfites et sulfates de calcium hydratés, de différents matériaux :

- le ciment Portland (P 40) ;
- les laitiers d'aciéries comme les scories Thomas et LD ;
- les cendres volantes des centrales thermiques fonctionnant au charbon ;
- le laitier de haut fourneau sous différentes formes granulométriques, à savoir le laitier granulé (0/2,5 mm), prébroyé (0/1,2 mm) et moulu à une finesse Blaine de 2500 cm<sup>2</sup>/g.

Pour favoriser les réactions du type pouzzolanique des mélanges, on a utilisé deux types d'adjuvants : la chaux et la soude. Après mélange, la mise en forme des matériaux a été réalisée par vibro-compaction à la table à secousses ou par pressage à 30 N/mm<sup>2</sup>.

En vue d'accélérer le durcissement des matériaux, on a soumis certains mélanges à une conservation en étuve à une température de 80°C et à une humidité relative de 100 %. Nous avons rassemblé dans le tableau I les résultats les plus significatifs de ces essais.

Deux compositions retiennent particulièrement notre attention :

1°) Le mélange « sulfogypse-laitier-soude » dont la composition correspond à :

- 45 % sulfogypse
- 40 % laitier prébroyé
- 15 % eau
- 0,2 % soude.

Le matériau a été mis en forme par pressage à 30 N/mm<sup>2</sup>, puis conservé sans étuvage.

La résistance à la compression était de 18 N/mm<sup>2</sup> à 28 jours, valeur qui permet d'envisager une utilisation comme matériaux portants.

2°) Le mélange « sulfogypse-cendres volantes-chaux » a raison de :

- 45 % sulfogypse
- 25 % cendres volantes
- 24 % eau
- 6 % chaux vive.

Het O.C.W. heeft een literatuurstudie gemaakt waaruit blijkt dat het belangrijk is de werkzaamheden voort te zetten inzake de fabricage van materialen die op basis van sulfietslib, vliegias en kalk zijn samengesteld. Deze mengsels hebben een pouzzolanisch kenmerk en bieden een gebruiksmogelijkheid voor de vervaardiging van vulmateriaal en van funderings- en onderfunderingslagen. Door middel van experimentele proeven zou men op dit bijzondere punt tot besluiten kunnen komen.

Het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf heeft een reeks proeven gedaan met de vervaardiging van blokken waarbij in het slib verschillende materialen in de vorm van sulfiet of gehydrateerd calciumsulfaat werden verwerkt.

- Portlandcement (P 40) ;
- slak uit staalfabrieken als Thomas-slakken en LD-slakken ;
- vliegias van thermische centrales die met steenkool worden gestookt ;
- hoogovenslak van verschillende korreldikte, nl. de gegranuleerde slak (0/2,5 mm), voorgemalen (0/1,2 mm) en gemalen tot een fijnheid van 2500 cm<sup>2</sup>/g Blaine.

Om de reacties van pouzzolanische aard van de mengsels te bevorderen, werden twee soorten toevoegmiddelen gebruikt : kalk en soda. Na het mengen werden de materialen tot blokken gevormd door middel van trilling-verdichting met de triltafel of door persen of 30 N/mm<sup>2</sup>.

Om de materialen sneller te doen verharderen, werden sommige mengsels in een oven gezet op een temperatuur van 80°C en bij een relatieve vochtigheid van 100 %. In tabel I zijn de meest relevante resultaten van deze proeven samengebracht.

Twee samenstellingen krijgen onze bijzondere aandacht.

1°) Het mengsel « sulfogips - slak - soda » waarvan de samenstelling de volgende is :

- 45 % sulfogips,
- 40 % voorgebroken slak,
- 15 % water,
- 0,2 % soda.

Het materiaal werd tot blokken geperst op 30 N/mm<sup>2</sup> en dan in de oven gezet.

De druksterkte bedroeg 18 N/mm<sup>2</sup> na 28 dagen, een waarde waarmee een gebruik als dragend materiaal kan worden overwogen.

2°) Het mengsel « sulfogips - vliegias - kalk » met volgende samenstelling :

- 45 % sulfogips,
- 25 % vliegias,
- 24 % water,
- 6 % ongebluste kalk.



ces effets bénéfiques ont été observés lors de l'ajout de très faibles quantités de boues, ce qui présente peu d'intérêt eu égard aux tonnages qui seront produits. Par ailleurs, la Faculté des Sciences agronomiques de l'Etat émet des réserves sur les effets à long terme de l'incorporation de boues dans les sols.

*L'Institut National des Industries Extractives* avait comme objectifs :

- de conditionner et fournir à tous les laboratoires des échantillons de boues qui provenaient principalement de l'usine de Viviez ;
- d'obtenir des boues représentatives d'une désulfuration à la chaux de gaz de fumées industrielles de centrales électriques thermiques fonctionnant au fuel et au charbon et de verreries ; ces échantillons ont été obtenus grâce à une installation micro-pilote ;
- d'étudier les risques de pollution des eaux mises en contact avec ces sous-produits lors de leur mise en décharge.

L'examen des échantillons d'eaux mis en contact avec les différents types de boues indique que leur degré de pollution est faible :

- la demande chimique en oxygène (D.C.O.) est inférieure à 30 mg/litre ;
- par la valeur élevée du pH et les faibles concentrations en métaux lourds contenus dans les boues de Viviez et des centrales, les éléments toxiques sont présents à l'état de traces.

La présence de quantités résiduelles de chaux confère aux eaux un pH basique. Il faut souligner que l'augmentation du pH des eaux n'est pas irréversible si celles-ci sont en contact avec l'air. L'anhydride carbonique ramène finalement leur pH à des valeurs inférieures à 8.

La teneur en sulfate est supérieure aux limites requises pour les eaux de surface destinées à la production d'eau alimentaire. Les résultats de l'étude menée par l'INIEX permettent de préciser les risques de pollution des eaux de surface et de percolation qui seront en contact avec les boues lors de leur mise en dépôt. Vu que le dépôt n'est pas considéré comme toxique, les teneurs en métaux lourds, la D.C.O. et la concentration en sulfate de calcium des eaux devraient permettre d'obtenir facilement les autorisations nécessaires à la création de ces dépôts et au rejet des eaux.

Le laboratoire des *Carrières et Fours à Chaux Dumont-Wautier* a analysé, en collaboration avec la Faculté des Sciences agronomiques de l'Etat à Gem-

bloux, que les résultats obtenus confirment ce qui a été constaté par ailleurs, à savoir que les eaux de surface ne sont pas polluées. On peut donc conclure que les eaux de surface ne sont pas polluées. On peut donc conclure que les eaux de surface ne sont pas polluées. On peut donc conclure que les eaux de surface ne sont pas polluées.

De doelstellingen van het Nationaal Instituut voor de Extractiebedrijven waren de volgende :

- aan alle laboratoria geprepareerde slibmonsters leveren die voornamelijk van defabriek van Viviez afkomstig waren ;
- slib verzamelen dat representatief was voor een ontzwaveling door middel van kalk van industriële rookgassen van thermische elektrische centrales die met olie of steenkool worden gestookt, en van glasblazerijen ; deze monsters werden met behulp van micro-proefinstallatie verkregen ;
- het bestuderen van de risico's van verontreiniging van het water dat bij de afvoer met deze nevenproducten in aanraking komt.

Het onderzoek van de monsters water dat met de diverse soorten slib in contact kwam, wijst uit dat het verontreinigingsniveau laag is :

- de chemische eis inzake zuurstof (D.C.O.) is lager dan 30 mg/liter ;
- door de hoge pH-waarde en de lage concentraties van zware metalen in het slib van Viviez en van de centrales komen de toxische elementen slechts spoorvormig voor.

Het voorkomen van resthoeveelheden kalk bezorgt het water een basische pH. Er dient onderstreept te worden dat de stijging van de pH van het water niet onomkeerbaar is want dit komt in contact met lucht. Het kooldioxyde brengt zijn pH uiteindelijk terug tot waarden onder 8.

Het sulfaatgehalte ligt boven de eisen die worden gesteld voor oppervlaktewater dat voor de productie van drinkwater is bestemd. Met de resultaten van de door het NIEB uitgevoerde studie kan nader worden omschreven welke gevaren bestaan voor verontreiniging van het oppervlaktewater en van het doorgesijpelde water dat bij de opslag met het slib in contact komt. Aangezien het opslaan niet als toxisch kan worden beschouwd, zouden het gehalte aan zware metalen, de D.C.O. en de concentratie aan calciumsulfaat in het water het moeten mogelijk maken snel de nodige vergunningen te verkrijgen voor de oprichting van deze opslagplaatsen en voor het lozen van het water.

Het laboratorium van de *Carrières et Fours à Chaux Dumont-Wautier* heeft samen met de Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat in Gembloux ana-

bloux, les boues en provenance de l'usine de Viviez et celles fournies par l'INIEX lors des prélèvements sur les fumées industrielles.

Afin de s'assurer de la représentativité des boues sulfiteuses de Viviez, des échantillons journaliers ont été analysés pendant un mois. Des essais d'assèchement des boues non oxydées par filtration sous vide sur Buchner et sur filtre presse ont montré la difficulté d'obtenir un degré de siccité inférieur à 40 %. Par contre, la filtration des boues oxydées permet d'atteindre un degré de siccité d'environ 20 %. Un procédé de transformation directe des boues sulfiteuses en sulfate de calcium anhydre selon la réaction  $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2 = \text{CaSO}_4 + 1/2 \text{H}_2\text{O} \uparrow$  a été étudié. On a pu vérifier que les températures optimales d'oxydation par voie sèche sont comprises entre 600 et 700°C. Le contact entre l'oxygène de l'air et le sulfite de calcium doit être intime, ce qui laisse supposer qu'un procédé par lit fluide donnerait de bons résultats. A 700°C en une heure, le taux de transformation est de 95 %. L'intérêt de ce procédé est évident puisqu'on obtient simultanément en une seule opération l'oxydation et la calcination des boues sulfiteuses avec formation d'anhydrite. L'étude de la transformation des boues oxydées en plâtre ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) a été entreprise dans l'optique de la fabrication de carreaux de plâtre et d'enduits de plafonnage. Le sulfoplâtre obtenu à une température supérieure à 160°C permet de fabriquer des carreaux de plâtre d'une qualité au moins égale à celle des carreaux obtenus à partir du plâtre naturel. La finesse du sulfoplâtre nécessite une plus grande quantité d'eau de gâchage avec, comme conséquence, une diminution de la densité du matériau. Elle contribue aussi favorablement à l'état de surface du carreau.

En ce qui concerne la fabrication d'enduits de plafonnage, différentes compositions ont été étudiées et comparées aux principaux enduits commercialisés sur le marché Bénélux. Toutes ces compositions présentent :

- un meilleur rendement, ce qui signifie que, par unité de poids de matière sèche, le volume gâché est plus élevé avec un enduit à base de sulfoplâtre, en comparaison avec un enduit à base de plâtre naturel ou de phosphoplâtre ;
- un meilleur comportement sur milieu poreux, à l'exception d'une composition à base de plâtre et d'anhydrite II.

On peut conclure que le sulfoplâtre est d'une qualité égale, voire supérieure, aux plâtres naturels et synthétiques commercialisés dans le Bénélux. Des essais de transformation du sulfogypse en anhydrite à hautes résistances à des températures comprises

lyses gemaakt van slib uit de fabriek van Viviez en van slib dat door het NIEB bij bemonsteringen van industriële rookgassen werd afgeleverd.

Om zeker te zijn van de representativiteit van het sulfietslib van Viviez werden gedurende een maand dagmonsters geanalyseerd. Droogproeven met niet-geoxydeerd slib door filtrering onder Vacuüm op Buchner en op persfilter hebben aangetoond dat een droogtegraad van minder dan 40 % moeilijk haalbaar is. Daartegenover maakt het filtreren van geoxydeerd slib het mogelijk een droogtegraad van ongeveer 20 % te bereiken.

Er werd een procédé bestudeerd voor de rechtstreekse omzetting van sulfietslib in watervrij calciumsulfaat volgens de reactie  $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2 = \text{CaSO}_4 + 1/2 \text{H}_2\text{O} \uparrow$ . Er kon worden nagegaan dat de optimale temperatuur van het oxyderen door middel van het droge procédé ligt tussen 600 en 700°C. Er moet intensief contact zijn tussen de zuurstof van de lucht en het calciumsulfiet, wat laat veronderstellen dat een procédé met een fluidbed goede resultaten zou opleveren. Bij 700°C bedraagt het omzettingniveau in één uur 95 %. Het belang van dit procédé is voor de hand liggend, want in één enkele bewerking verkrijgt men tegelijkertijd de oxydering en calcineren van sulfietslib met anhydrietvorming.

De omzetting van in pleister ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) geoxydeerd slib werd bestudeerd in de optiek van de vervaardiging van pleistertegels en plafonneerpleister. De op een temperatuur van meer dan 160°C geproduceerde sulfopleister maakt het mogelijk pleistertegels te fabriceren die kwalitatief minstens even goed zijn als de tegels die van natuurpleister zijn gemaakt. De fijnheid van de sulfopleister vergt een grotere hoeveelheid aanmaakwater met een daling van de dichtheid van het materiaal tot gevolg. Deze fijnheid bevordert ook het uitzicht van de tegel.

Wat de fabricage van plafonneerpleister betreft, werden verschillende samenstellingen bestudeerd en vergeleken met de voornaamste soorten pleister die in de Benelux op de markt zijn. Alle samenstellingen :

- hebben een beter rendement, hetgeen wil zeggen dat het aangemaakte volume per gewichtseenheid droge stof hoger ligt met een pleister op basis van sulfopleister ten opzichte van een pleister op basis van natuurpleister of fosfopleister ;
- zich beter gedragen op een poreuze ondergrond, behalve een samenstelling op basis van pleister en anhydrite II.

Men mag besluiten dat sulfopleister dezelfde, zo niet een hogere kwaliteit bezit als dan de thans in de Benelux op de markt verhandelde soorten natuur- of kunstpleister. Uit proeven met de omzetting van sulfaatgips in anhydriet met hoge sterkte op een