LE MARBRE

Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale
organisées par l'Université Libre de Bruxelles
à Namur, du 15 au 18 novembre 1988

Introduction

Allocution d'ouverture
Discours inaugural

Les marbres belges

Aperçu historique de l'activité marbrière en Wallonie (*)

Perspectives de l'industrie marbrière en Belgique

Possibilités de valorisation des ressources marbrières de la bande calcaire méridionale du bassin de Dinant

Techniques d'exploitation et d'élaboration du marbre

Présentation des phases de travail dans l'élaboration des marbres commerciaux, y compris les problèmes d'utilisation des explosifs

L'utilisation du câble diamanté en carrière

Techniques modernes de production de blocs en marbre

Commerce extérieur

L'importance du marbre dans le monde et les perspectives d'exportation des marbres belges

Analyse des exportations et importations de marbres de Belgique

Pollution et protection

Présentation des méthodes de protection des marbres contre la pollution atmosphérique

Altération et traitement des marbres du patrimoine monumental en Belgique

Conclusions générales

(*) Compte tenu de la longueur de cette communication, celle-ci figure à la fin du compte-rendu.

Allocution d'ouverture

Emile LACROIX,
Gouverneur de la Province de Namur

SERVICE GEOLOGIQUE DE BELGIQUE
BIBLIOTHEQUE

Les organisateurs de ces Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale essentiellement consacrées au marbre ont choisi Namur comme lieu de rencontre. Je leur en sais personnellement gré.

Ce n'est cependant pas un simple hasard. Nul n'ignore, en effet, que les derniers sites de production de ce matériau se trouvent en Province de Namur.

L'extraction du marbre y a pris naissance de longue date, dès l'époque romaine. C'est cependant la localité de Rance qui a eu droit au titre de capitale du marbre belge : dès le XVI[e] siècle, cette localité jouissait d'une réputation qui dépassait largement nos frontières. Réputation due tant à la qualité de la pierre extraite dans la région qu'à l'habileté des artisans qui la façonnaient. On sait qu'une grande partie de la décoration intérieure du palais de Versailles est réalisée en marbre rouge de Rance. L'extraction du marbre coquillé à fond rouge qui fit sa renommée débuta probablement très tôt.

Les marbres de Rance devaient être employés à profusion à partir de la Renaissance. Les produits rançois se vendirent aussi bien en France que dans les Pays-Bas.

A la même époque, sans toutefois avoir la même notoriété, Namur était un centre marbrier important; les carrières des Grands Malades, toutes proches, produisaient un marbre noir célèbre. La Belgique possède d'ailleurs toujours le monopole mondial des marbres d'un noir parfait, produits d'ailleurs dans notre province.

Les marbres rouges et noirs que l'on extrait encore aujourd'hui dans notre pays complètent heureusement la panoplie européenne; qui ne connaît les prestigieux accompagnateurs des marbres wallons, les marbres de Carrare, pierre noble par excellence, au passé glorieux, matériau de choix des sculpteurs et architectes de l'Antiquité, encore le blanc de Paros ou le vert de Tinos tant aimés des statuaires grecs, ou encore le rouge griotte des Pyrénées françaises, principal concurrent des marbres rouges belges.

Pierre noble et durable par excellence, le marbre a été le matériau de choix des constructeurs, des sculpteurs et des architectes. Les qualités techniques indéniables et les progrès récents dans son élaboration lui ont ouvert des débouchés nouveaux dans le domaine de la construction et de l'urbanisme. Malgré l'expansion des produits de synthèse, et peut-être même par comparaison avec eux, la pierre conserve aujourd'hui plus que jamais toute sa noblesse et les artisans contemporains s'ingénient à mettre en valeur sa beauté intrinsèque.

La conjoncture économique actuelle favorise très certainement les matériaux de construction naturels, qui ne demandent que l'énergie nécessaire à les débiter, par comparaison avec les pierres de synthèse, dont la cuisson consomme de coûteuses calories. En fait, en Italie, en Grèce, sans doute en France, les industries de la pierre, et celles du marbre en particulier, connaissent une expansion régulière. En Belgique, malheureusement, il n'en va pas de même, et la production actuelle de marbre, concentrée pratiquement dans la Province de Namur, n'atteint pas le quart de la production d'avant-guerre. Ce déclin peut s'expliquer, en partie, par la dimension réduite des exploitations, par une mécanisation trop sommaire, par l'épaisseur relativement faible de certaines couches, par leur irrégularité, par le manque de critères de qualité, certainement aussi, comme trop souvent chez nous, par l'absence d'image de marque.

L'inauguration de la nouvelle usine Comarbel à Franchimont, à laquelle vous êtes invités ce mercredi, est - je le souhaite vivement - le signe d'un réel renouveau de la production belge et namuroise.

En choisissant le marbre comme thème de ces Journées, les organisateurs ont sans doute voulu faire œuvre utile avant tout. A l'heure où chaque pays, chaque région, chacun de nous, remettons en cause les notions de richesse et de qualité de la vie, il leur a paru normal de concentrer l'intérêt sur une de nos trop rares richesses naturelles.

De nombreux spécialistes sont venus des quatre coins de l'Europe pour nous parler de tous les aspects du matériau marbre : techniques modernes d'exploitation et d'élaboration, emploi, altérations, sans oublier les côtés historique, artistique et culturel. A ces savants de toutes les disciplines, qui se trouvent réunis en ce moment à Namur pour parler d'un sujet qui leur est cher, je souhaite un bon séjour dans notre province et des discussions fructueuses. J'ose espérer que ces « Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale de l'Université Libre de Bruxelles » informant les uns, sensibilisant les autres, n'auront pas que des retombées purement académiques, mais qu'elles contribueront à la renaissance d'une activité industrielle dans un des rares domaines où le sous-sol national renferme encore des trésors.

C'est sur cette réflexion, sur ce vœu que je tiens à terminer ce discours d'ouverture et en vous souhaitant à toutes et à tous un délicieux séjour en cette ville si agréable et accueillante qu'est Namur.

SERVICE GEOLOGIQUE DE BELGIQUE
BIBLIOTHEQUE

Discours inaugural

Jean MICHOT,
Recteur de l'Université Libre de Bruxelles

Dans le droit fil d'une tradition désormais bien établie, l'Université de Bruxelles poursuit, dans le cadre de ses activités en géologie, l'organisation des Journées de l'Industrie Minérale.

Elle a convié aujourd'hui, à Namur, les meilleurs spécialistes européens du marbre.

Ces Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale, il y a quelques mois à peine, pouvaient paraître une gageure dans la situation économique morose que l'Europe entière connaît et dans les difficultés financières particulièrement graves qui frappent notre institution.

C'est pour nous, néanmoins, un réel réconfort et une source de fierté que de réaliser qu'au travers d'empêchements et obstacles divers, la volonté opiniâtre et l'enthousiasme des organisateurs, mais aussi les encouragements prodigués par le Secrétariat d'Etat à l'Economie Régionale Wallonne et le secteur privé, ont permis de mettre sur pied un Congrès et une Exposition dignes de nos Journées précédentes.

Les Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale sont d'ores et déjà un succès, vu le nombre et la qualité des participants.

Le choix du thème de ces Troisièmes Journées reflète à l'évidence le constant souci de notre Université de répondre aux préoccupations actuelles de notre communauté, d'intégrer notre effectif de recherche et nos objectifs de travail au développement des potentialités régionales, et d'accorder nos lignes de réflexion aux intérêts bien compris des régions. La pierre se présente sans aucun doute comme une alternative écologique et par ailleurs économiquement avantageuse aux matériaux de synthèse.

« Les amateurs, soulignait Roger Caillois, appréciaient (alors) les qualités d'une matière constante : la pureté, l'éclat, la couleur, la rigueur de la structure,... Elles ont leur valeur en soi et ne renvoient à rien d'extérieur à elles-mêmes...

De toute façon, les pierres possèdent on ne sait quoi de grave, de fixe, et d'extrême, d'impérissable... »

Au-delà de leur richesse naturelle, de leur valeur comme objet, les pierres représentent une ressource naturelle avec laquelle il est utile de reprendre contact, qu'il est indispensable de saisir, de comprendre et de réinscrire dans nos produits de première importance.

Le marbre, plus spécialement, pierre noble par excellence, était exploité de l'Escaut à Gembloux au nord du Bassin houiller du Hainaut, d'Erquelinnes à la Vesdre par Dinant et Aywaille, et de Beaumont à Bomal par Philippeville et Rochefort.

Il était l'objet « d'une exportation considérable, se partageant avec les produits français et italiens la plus grande partie de la marbrerie utilisée dans le monde ».

« Un village sans carrière n'est pas vraiment wallon », écrivait le docteur Louis Delattre. « A ceux de chez nous, pour être à l'aise, il faut, aux confins des dernières maisons d'ouvriers du village, le grand trou où chercher la pierre, les moellons pour bâtir, les cailloux brisés pour la route, les pierres taillées... et la chaux... Serait-il wallon, le plaisir de creuser, de fouir, d'excaver, de descendre dans les fosses, toucher la masse dure et froide de la pierre ? »

Il est loin le temps de Jean Toussel, écrivain combien sensible, qui a donné de cette vallée mosane et

des travailleurs de la pierre des images d'une réalité combien saisissante :

« A l'âge de douze ans, hiver, été, dans le gel, sous la pluie, il quittait son lit dès cinq heures du matin et trottait jusqu'aux fours à chaux, en martelant de ses sabots le chemin durci ou les pierres...

Il revenait le soir, le derrière affaissé, cassé en deux comme un petit vieillard : il avait poussé les brouettiers durant dix heures...

Il pataugeait dans la boue noire des fosses, chaude ou glacée, selon la saison, et s'y affalait parfois les jambes molles, saoulé du gaz. Il en était ainsi trois cents jours par an : l'achat d'une paire de sabots neufs, d'une casquette d'un franc, d'un costume de cinq, d'une pipe de terre rompait l'épouvantable monotonie de sa vie d'enfant-ouvrier...

... et il était fort comme un bœuf : il émiettait, paraît-il, un mètre cube de pierre en un rien de temps... Son accouplé, qui chargeait le wagonnet à la fourche, avait peine à le suivre.

Un matin pluvieux où le chantier s'emplissait de l'écho d'écroulements sinistres et où les vigies ne cessaient de crier, le plus fort casseur de la carrière Madame quitta le cirque sur les épaules de quatre compagnons. Il avait les jambes broyées et le front troué... Il se tut en cours de route. Il avait eu vingt ans vers les dernières Pâques. »

Les tailleurs de pierres wallons à l'honneur à cette époque exploitaient péniblement, mais avec quelle ténacité, le matériau si durement arraché aux entrailles de la terre.

Ces Journées pourraient leur être dédiées, hommes de Wallonie qui ont si durement participé au développement de leur région.

Aujourd'hui le renouveau de l'activité mosane passe par la relance de l'exploitation des ressources naturelles. Combien plus aisées en sont les méthodes, plus faciles les procédures d'extraction; combien plus diversifiées pourraient être leurs utilisations.

Les recherches sur les pierres de construction, les pierres calcaires et les marbres en particulier, ont débuté à l'U.L.B. peu après la seconde guerre mondiale; c'est alors en effet que, sous l'impulsion du Professeur Baes, notre maison a confié à Carl Cammerman un cours sur les matériaux pierreux. Ingénieur civil des Mines de l'U.L.B., Cammerman avait 60 ans à l'époque, et derrière lui une solide expérience du terrain et du laboratoire. Une série ininterrompue de travaux, jusqu'à sa mort survenue en 1958, conférèrent à notre regretté collègue la réputation de spécialiste incontesté des roches calcaires de la Belgique.

L'exposition toute proche évoque à juste titre les recherches de cet homme qui lisait à livre ouvert dans les carrières.

Reprenant le flambeau, une équipe de chercheurs du Service d'Exploitation des Mines dresse actuellement l'inventaire critique des ressources marbrières des bassins wallons; c'est là un travail que sous-tend notre foi en l'avenir de l'industrie marbrière de la région et notre conviction en un renouveau indispensable.

Fidèles à leur vocation universitaire, les organisateurs de ces Journées ont voulu que le marbre comme matériau soit abordé sous tous ses aspects, tant artistiques que techniques. Un regard sur le programme vous convainc aisément de leur réussite : archéologues, artistes, architectes, géologues, ingénieurs, spécialistes de toutes disciplines se voient rassemblés ici, au sommet de cette colline chargée d'histoire, pour parler ou entendre parler d'un matériau qui leur est cher; ils inaugureront dans quelques heures à Bruxelles une exposition de marbres précieux et prestigieux, et après-demain à Philippeville une nouvelle unité industrielle d'élaboration.

Art, histoire, science et technique se trouvent ainsi intimement mêlés pour l'enrichissement de tous.

Au nom du Comité Organisateur, j'adresse la bienvenue à tous les participants.

Mes remerciements particuliers vont aux conférenciers étrangers qui se sont déplacés, parfois de très loin, contribuant ainsi pour une grande part au succès de cette manifestation. Je remercie aussi de leur contribution tous les conférenciers belges et nos collègues des autres Universités.

Je souhaite à tous, trois fructueuses journées. Merci, enfin, à la Ville et à la Province de Namur de leur accueil cordial dans un décor grandiose.

Perspectives de l'industrie marbrière en Belgique

SERVICE GEOLOGIQUE DE BELGIQUE
BIBLIOTHEQUE

Première partie

Jean Van den WILDENBERG *

RESUME

Nous possédons d'importants gisements de marbres dans les teintes noires, grises et rouges. Notre industrie marbrière a connu de grandes difficultés par l'ouverture des douanes du Marché Commun. Actuellement, nous traversons une crise de la construction d'une ampleur exceptionnelle mais probablement passagère. L'Etat veillera à ne pas se laisser détériorer nos outils de travail modernes par abandon prématuré.

Perspectives d'avenir :

1° Sur le marché intérieur :

- Il faut créer une demande chez le consommateur par une promotion chez les auteurs de projets, les futurs auteurs de projets (écoles) et puis dans le grand public par l'office d'un bureau de promotion commun aux producteurs. Malheureusement, il manque d'union entre les firmes.

- On doit faciliter la demande par la préfabrication.

- On doit mettre sur pied la standardisation des produits.

- Enfin, il faut former une main-d'œuvre adaptée.

2° Sur le marché extérieur :

Promouvoir l'ensemble de nos marbres par le canal de revues et foires spécialisées et par l'approche d'auteurs de projets internationaux.

Conclusion : Pour l'avenir, il existera une demande car la population exigera un environnement plus humain. L'industrie marbrière doit se préparer à présenter des applications rationnelles et économiques.

SAMENVATTING

Wij beschikken over aanzienlijke afzettingen van zwart, grijs en rood marmer. Onze marmerindustrie heeft grote moeilijkheden ondervonden wegens het openstellen van de tolrechten van de Euromarkt. Momenteel maken wij in de bouwnijverheid een crisis door van uitzonderlijke omvang, maar die waarschijnlijk van voorbijgaande aard is. De Staat zal er op toezien onze moderne werktuigen niet te laten vervallen door een vroegtijdig in de steek laten ervan.

Vooruitzichten :

1°) Op de binnenlandse markt :

- Er dient bij de verbruiker een vraag opgewekt te worden door een promotie bij de auteurs van projecten, de toekomstige auteurs van projecten (scholen) en daarna bij het publiek door de dienst van een gemeenschappelijk promotiebureau voor de producenten. Jammer genoeg ontbreekt het aan eendracht tussen de firma's.

- Men moet de vraag vergemakkelijken door prefabricatie.

- Men moet de produkten standaardiseren.

- Tenslotte dienen aangepaste werkkrachten gevormd te worden.

2°) Op de buitenlandse markt :

Onze marmersoorten bevorderen d.m.v. gespecialiseerde tijdschriften en jaarbeurzen en door de benadering van de auteurs van de projecten op internationaal vlak.

Besluit : In de toekomst zal er vraag zijn, want de bevolking zal een menselijker leefomgeving eisen. De marmerindustrie moet zich voorbereiden om rationeler en economische toepassingen te bieden.

* Président de l'Union des Carrières et Scieries de Marbre de Belgique, Rue du Bosquet 40, B-1060 Bruxelles.

ZUSAMMENFASSUNG

Wir besitzen bedeutende Marmorvorkommen mit schwarzem, grauem und rotem Marmor. Unsere Marmorindustrie ist infolge der Öffnung der Zölle des Gemeinsamen Marktes in große Schwierigkeiten geraten. Gegenwärtig erleben wir eine Krise der Bauindustrie von außergewöhnlichem Ausmaß, die aber wahrscheinlich vorübergehender Natur ist. Der Staat soll dafür sorgen, daß unsere modernen Arbeitswerkzeuge infolge vorzeitiger Aufgabe nicht verkommen.

Zukunftsaussichten :

1) Auf dem Inlandsmarkt :

- Bei dem Verbraucher muß die Nachfrage geweckt werden durch Werbung bei den Projektplanern, den zukünftigen Projektplanern (Schulen), und außerdem in der Öffentlichkeit über ein gemeinsames Werbebüro aller Produzenten. Leider fehlt es an Einigkeit unter den Firmen.

- Die Nachfrage muß durch Vorfertigung gefördert werden.

- Eine Standardisierung der Produkte muß vorgenommen werden.

- Schließlich müssen geeignete Arbeitskräfte ausgebildet werden.

2) Auf dem Auslandsmarkt :

Werbung für unseren Marmor in Fachzeitschriften und auf Fachmessen, sowie durch Kontaktierung von Planern internationaler Projekte.

Schlußfolgerung : In der Zukunft wird es eine bedeutende Nachfrage geben, da die Bevölkerung eine menschenwürdigere Umwelt, fordern wird. Die Marmorindustrie muß sich darauf vorbereiten, rationelle und wirtschaftliche Anwendungen anzubieten.

SUMMARY

Belgium has large deposits of black, grey and red marble. The liberalization of customs arrangements has faced our marble industry with considerable problems. At the present time, we are suffering in Belgium from a recession in the building industry on a very large scale, but it is probably only temporary. The state will undoubtedly ensure that our modern production plant is not allowed to go to waste by allowing it to stand idle.

Prospects for the future :

i) Domestic market

- We must create the demand by promoting the use of marble, to users or potential users : project architects, future (i.e. trainee) project architects, and then to the public at large by means of a joint publicity service for the producers. Unfortunately, the companies are not united

- We must help to increase the demand by offering prefabricated products

- We must standardize our products

- We must train a specialized workforce.

ii) Export market

We must promote the whole range of Belgian marbles via specialist periodicals and trade fairs, and by contacting project architects.

Conclusions : Since the public will insist that its environment be more « human » the demand will be maintained in the future. The Belgian marble industry must place itself in a position to offer rational and economic answers to the user's wishes.

---

1. *LES MARBRES BELGES*

Il m'échoit de vous parler aujourd'hui des perspectives de l'industrie marbrière en Belgique. La complexité du sujet m'oblige à vous dire que je crains de n'être pas à la mesure de cette tâche. C'est pourquoi, les critiques et les suggestions que je pourrai entendre au cours de ces Journées de l'Industrie Minérale seront les bienvenues, mon exposé n'ayant la prétention que d'être l'amorce de discussions ultérieures qui devraient amener les responsables de notre politique régionale et nationale, les personnalités scientifiques et les exploitants de notre industrie à prendre mieux conscience des problèmes qu'il nous incombera de résoudre en dépit des difficultés actuelles. J'exprime le souhait que de futures réalisations se concrétisent en un choix de solutions utiles à court et à long terme et que nous écartions de notre chemin les utopies, les illusions ou simplement les optimismes sans fondement. Si utile que puisse être une industrie à la communauté, il lui appartiendra de se plier aux règles les plus strictes de la science économique.

Après ce préambule, je me resitue dans le cadre d'une région possédant une réserve de richesses minérales de diverses natures telles que charbon, sable, ciment, matériaux pierreux de toutes sortes, marbres et pierres de construction, et désireuse en premier lieu d'en faire l'inventaire et d'examiner ensuite avec soin, matériau par matériau, au cours de journées

bien spécialisées, s'il existe des chances d'entreprendre ou de continuer l'exploitation rentable de cette richesse minérale.

Sachons d'abord ce que recouvrira le terme marbre au cours de ce rapport : ce terme désignera toute une série de pierres calcaires dures, prenant le poli mais aussi parfois d'autres tailles et pouvant être utilisées, comme le diraient nos amis italiens, en tant que pierres ornementales.

Personne ne contestera que l'ornementation des bâtiments et ouvrages d'art soit nécessaire. Mais nous noterons dès l'abord avec le plus grand soin qu'il est possible, au XXe siècle, de se passer de pierre ou de marbre dans n'importe quel bâtiment ou ouvrage d'art. On peut s'adresser à des matériaux de remplacement, tels que l'aluminium par exemple, remplissant les mêmes fonctions. Toutefois, nous noterons aussi qu'il existe un marché, une demande pour le marbre et ceci pour deux raisons principales :

- Tout d'abord, la tradition : les gens ne changent leurs habitudes que très lentement.
- Ensuite, les qualités réelles et incontestables du produit tant sur le plan pratique que sur le plan esthétique avec un rapport valable qualité-prix, font qu'il se crée tous les jours une nouvelle clientèle malgré l'absence de promotion et d'information qui fera l'objet de mes critiques ultérieures.

La Wallonie comporte d'importants gisements marbriers en exploitation, mais la palette des teintes de nos marbres est assez limitée : nous n'avons que les marbres noirs, les marbres gris, les marbres rouges. Je ne pense pas qu'il soit possible de trouver d'autres couleurs dans des gisements non découverts. Il serait donc vain de vouloir proscrire toute importation de marbres étrangers.

Première question : faut-il rechercher dans notre pays de nouveaux gisements et ouvrir de nouvelles carrières ? Notre réponse sera nuancée. Il importe en tout cas de mettre au plus vite en zones de réserve les gisements valables s'il en existe encore et empêcher à temps l'une ou l'autre construction ou tracé de route qui mettrait en question dans l'avenir l'exploitation d'un bon gisement. C'est un premier point qui devrait être réalisé par des spécialistes guidés par l'avis des professionnels de notre industrie. Le plus difficile sera de faire la distinction entre les gisements propices à l'exploitation marbrière en raison de leur bonne qualité physique et les autres, mais une bonne approche n'est pas impossible.

Quant à l'opportunité d'ouvrir de nouvelles carrières, le mieux ne sera-t-il pas de laisser jouer les lois saines de l'offre et de la demande. De nombreux éléments peuvent jouer, tels que simplement la mode ou bien des fermetures de carrières étrangères d'un type approchant.

Pour examiner quelles sont les perspectives de l'industrie marbrière, il faut dire un mot du passé et du présent.

2. *LE PASSE*

L'ouverture des barrières douanières en 1962, au moment de la création du Marché Commun, a été fatale à notre florissante industrie de la transformation du marbre; c'est-à-dire importation de blocs, sciage en tranches, polissage et vente aux entreprises marbrières de nature souvent plus artisanale. Malgré un outillage moderne, la plupart des scieries ont dû fermer leurs portes et deux firmes importantes ont encore fait faillite cette année. Cette industrie est donc devenue tout à fait déficitaire.

En deux années, les importations italiennes de produits polis ont triplé et les ventes de tranches simplement sciées ont doublé. En 1980, l'Italie exporte 36 fois plus de produits polis qu'en 1961 en Belgique et cela, sans compter les importations de tranches de granit dur polies dont les proportions doivent être à peu près semblables. La France a également considérablement développé ses exportations vers notre pays. En sept ans, de 1973 à 1980, les scieries de marbres ont diminué leur importation de blocs étrangers de 50 %, tandis que la valeur à la tonne importée augmentait de 70 %. En conclusion, nous dirons que le sciage de blocs de marbre en provenance de pays européens est définitivement condamné. Certaines firmes se sont reconverties avec succès dans les travaux de marbrerie avec équipes de pose. D'autres ont adopté la solution du simple dépôt de tranches polies à peu de frais. Il y a aussi la solution d'acquérir des carrières de marbres nouveaux dans des pays plus lointains en vue de les importer en blocs en Belgique, mais cela pose de gros problèmes d'organisation avec les risques et les aléas d'une dépendance de l'étranger.

Qu'en est-il advenu de la *production de nos carrières de marbre* ? Par suite de la concurrence étrangère, on note les signes d'essoufflement à partir de 1967, et bientôt nous en arrivons à un tiers de la production extraite, Petit-Granit exclu.

Il faut ici faire une parenthèse pour le Petit-Granit qui a eu l'avantage d'être utilisé aussi en tant que pierre de construction. En quinze ans, la production n'a pas cessé d'augmenter, mais il faut aussi noter que les sciages et les pierres façonnées n'ont guère progressé contrairement aux ventes de sous-produits.

3. *LA SITUATION ACTUELLE*

Je la résumerai comme suit :

- à notre actif, d'importants gisements, un outillage des plus modernes;

- à notre passif, la crise de la construction d'une ampleur exceptionnelle, il faut le souligner, et l'absence d'action concertée en vue d'y faire face.

Nous disposons d'importants gisements et outillage moderne.

3.1. *Le Petit-Granit*

Ses avantages : il est sans doute le marbre noir le plus solide pour la vente en tranches polies, mais il est assez peu demandé en tant que tel sur les marchés étrangers; sans doute pourrait-on améliorer la promotion. L'emploi en dallage rencontre plus de succès. D'autre part, on peut l'utiliser en fines épaisseurs de 3 cm pour des revêtements de façade de teinte bleu-gris et les machines actuelles peuvent donner toute une série d'apparences diverses et décoratives. Il peut donc en façade concurrencer valablement les granits durs étrangers.

Son utilisation en pierre de travaux publics et en sous-produits permet d'écouler une grande partie de la production, et notamment des pierres de choix inférieur.

Malheureusement, il existe une forte surproduction en ce matériau et l'absence de promotion ne fait qu'aggraver la situation. Une société produit environ 40 % de l'ensemble, entourée de trois autres sociétés de la région de Soignies représentant environ une force égale de 40 %. Les 20 % restants se répartissent entre quelques petites carrières dissidentes et le Groupe des Carrières de P.G. des provinces de Liège et Namur qui se sont récemment constituées en un seul comptoir de vente sous forme de société anonyme afin d'éviter les doubles emplois et d'unir leurs efforts.

La situation dans les carrières de Petit-Granit est devenue alarmante en raison de la crise de la construction. Notons ici que les fournitures à Zeebrugge sont une occasion unique de découvrir à prix réduit des gisements de valeur. Malheureusement, la situation étant également mauvaise dans les carrières de concassé, celles-ci ont été admises à fournir la plus grande part. Permettez-moi d'émettre une opinion dont je prendrai seul la responsabilité : ces fournitures énormes par les carrières de pierres concassées feront bien tourner camions et bulldozers, mais non pas les concasseurs. En outre, on ne découvre rien, on mange simplement le gisement. A leur décharge, ils donnent du travail à leur main-d'œuvre et amortissent une partie de leur matériel onéreux.

Parmi les 82.000 m³ sciés et façonnés par les carrières de Petit-Granit au cours de l'année 1980, 9.800 m³ ont été façonnés. La demande est insuffisante. Pour l'année 1981, elle sera encore bien moindre. Cette année a vu les carrières mettre en chômage un bon tiers de leur personnel et, avec l'approche de l'hiver, les situations financières risquent de se compliquer gravement pour les carrières de marbre en général. Devrons-nous encore assister à des fermetures d'entreprises dans un secteur traditionnellement assez sain ? Nous devons craindre le pire si des mesures ne sont pas prises à bref délai pour sauver le secteur. On peut imaginer des commandes de l'Etat passées à l'avance ou bien des avances de fonds récupérables.

Je ne m'étendrai pas plus longtemps sur la situation des carrières de Petit-Granit qui est un secteur qui, je le répète, a toujours fait preuve de vitalité.

Je citerai simplement les autres productions intéressantes de marbres belges qui sont le Noir de Mazy qui est de grande valeur, le Noir de Denée, moins pur mais aussi d'un prix moins élevé, non gélif et pouvant en même temps écouler sa production dans les travaux de construction, en pierres de taille et en moellons. Le Noir de Tournai se trouve dans le même cas, d'un gris très foncé. Ces matériaux souffrent aussi de la crise de la construction. Il reste le Calcaire de Meuse d'un gris très uni, convenant bien pour des pierres de sculpture polies ou taillées, tous travaux marbriers et de pierre de construction. Sa pureté de 98,5 % de calcium lui donne la patine claire et riante des pierres de la vallée de la Meuse. Enfin, le Rouge Belge, le plus vivant de nos marbres, jouit d'une longue tradition marbrière. Les difficultés d'obtenir des blocs absolument sans défaut seront sans doute surmontées par la conception de la nouvelle usine de Rochefontaine : en passant directement du bloc à la fabrication du produit fini à l'aide d'une chaîne de fabrication bien conçue, on évitera beaucoup de pertes de matière, ce qui aura pour effet de diminuer les prix de revient.

4. *L'AVENIR*

Et tout d'abord une question : le marbre belge est-il hors prix ? Est-il en mesure de soutenir maintenant la concurrence étrangère ? Tous les pays d'Europe ont brutalement relevé leurs prix suite à la hausse de l'or et du dollar et l'Italie n'y a pas fait exception en raison de ses fournitures incalculables aux pays arabes. La France reste le concurrent le plus dangereux en raison de ses prix peu élevés en produits finis. Ces prix ont évidemment pour origine les salaires payés en province mais, avec le régime actuel, tout cela pourrait changer. De toute façon, les teintes des marbres français sont complémentaires aux nôtres puisque presque tous les marbres français dignes d'une place sur le marché international sont de couleur beige. Il n'empêche que la situation reste préoccupante tant en ce qui concerne les importations directes de marbres que celles de granit.

Que pourrions-nous envisager de faire pour affronter cet avenir ?

Je me permettrai de suggérer quelques mesures qui seraient susceptibles de relancer notre industrie.

Soyons de bon sens : lorsqu'il y a surproduction et qu'il manque de travail, la seule solution est d'en faire sortir. Comment ? Je ne vois pas d'autre solution qu'une promotion bien organisée. Actuellement, cette promotion n'existe pas. Un bureau de promotion commun pourrait être créé au travers duquel chacun pourrait faire sa publicité. Le rôle propre du bureau se limiterait plutôt à l'information des auteurs de projets et du public et à la promotion de la pierre et du marbre en général. La Région Wallonne pourra peut-être exercer une influence décisive et jouer un rôle important.

Pourquoi la promotion ne se ferait-elle pas avec la collaboration active de tous les producteurs qui pourraient en plus recourir à une éventuelle participation des utilisateurs marbriers.

Au premier niveau, il y a une éducation du public à faire sur l'utilisation des marbres et des pierres en général et c'est ici que j'attendrais la collaboration de nos amis marbriers dans la lutte contre les préjugés tels que : « Le marbre est cher, le marbre est froid, le marbre est difficile à poser ou bien encore difficile à entretenir ». Ces préjugés prévalent même chez les jeunes architectes sortant de nos écoles car, en réalité, quelle information ont-ils reçue sur l'utilisation de ce matériau pourtant traditionnel ? La tâche est grande si on songe au nombre important d'écoles d'architecture et de travaux publics dans nos régions nationales. A ce stade, nous n'avons aucune raison de demander à quiconque de faire spécialement la promotion du marbre belge. Ce qui compte avant tout, c'est de donner les connaissances suffisantes à l'utilisateur potentiel et la technique de pose, qui fait peur à tant d'architectes. Elle n'est pas différente d'un marbre à l'autre.

Au second niveau, il reste une promotion à faire par les producteurs belges eux-mêmes, mais malheureusement, il n'a pas été possible de trouver un terrain d'entente entre les producteurs sur ce point. J'écrivais au mois d'avril pour notre réunion au Palais des Congrès à Liège : une promotion commune pour toutes les pierres belges devrait être faite d'une façon sélective. Elle toucherait en premier lieu les Travaux publics et les institutions parastatales tant wallonnes que flamandes : Chemins de Fer, Fonds Scolaires, Provinces, Villes, Communes, Services des Eaux, Transports publics, etc..., car tous ces services ont leurs propres bureaux d'architecture. Cela demande beaucoup de travaux d'information, de réceptions en carrière, de documentation écrite et cela, dans les deux langues. Le même travail est à exécuter au niveau des grands bureaux d'architecture privés.

Une documentation technique attrayante doit être proposée aux écoles d'architecture de tout le pays et des concours du marbre et de la pierre pourraient obliger les élèves à se pencher sur ce matériau. Une publicité pour le grand public pourrait être étudiée pour l'avenir, mais elle est coûteuse et pleine d'aléas, en raison de l'importance des capitaux à investir. Il faut sur ce point laisser l'initiative à chaque promoteur ou groupe de producteurs.

En ce qui concerne la promotion à l'exportation, il faut tenir compte que les Pays-Bas n'ont pas de ressources en pierre et devraient rester nos meilleurs clients. La propagande pour nos matériaux devrait y être très active. Il en est de même en Allemagne Fédérale où les ressources naturelles existent mais sont insuffisantes. Dans le domaine de la grande exportation, nous devrions présenter la panoplie de nos marbres dans les revues spécialisées. Une participation à la Foire de Carrare pourrait peut-être plus tard augmenter notre efficacité, mais cette action devrait d'abord être préparée par des clichés communs dans les revues spécialisées étrangères qui ne manquent pas.

J'en reviens à l'idée d'un catalogue bien présenté avec photos en couleurs de tous nos produits dans leurs diverses présentations et des textes donnant, d'une part, les caractéristiques techniques et, d'autre part, les prescriptions à inscrire aux cahiers des charges dans les langues suivantes : français, néerlandais, allemand, anglais et italien (parce que Carrare est le centre mondial du marbre). Les feuillets en seraient détachables et on y ajouterait quelques photos des réalisations les plus marquantes. Le nombre de feuillets serait en proportion avec l'importance des productions.

Nous devons en tout cas faire savoir à l'étranger que nous sommes les grands spécialistes des marbres noirs, gris et rouges.

A ce stade, l'augmentation des ventes ne dépend que du bon vouloir des producteurs. Il faut simplifier notre publicité.

Je voudrais vous dire aussi quelques mots du financement des entreprises dont le système me semble dans certains cas ignorer les réalités.

En cas d'investissement, les entreprises ont la faculté de demander l'octroi d'emprunts avec une réduction des taux d'intérêt calculée suivant certains critères. Or, les investissements provoquent toujours une augmentation sensible du chiffre d'affaires, augmentation proportionnelle à la valeur investie.

Il est de tradition en Belgique de ne pas vouloir tenir compte de cet élément et la firme en question devra, en cas de manque de fonds propres, s'adresser

à sa banque pour se faire ouvrir un compte courant dont les taux sont, comme vous le savez, prohibitifs. Le crédit est l'âme du commerce et les facilités données aux entreprises ne sont guère réalistes.

5. *L'AVENIR DE LA MAIN-D'ŒUVRE*

Un bon marbrier peut avoir obtenu les connaissances théoriques nécessaires en ayant la formation d'une école de menuiserie. Il lui suffira de quelques mois de pratique pour connaître parfaitement le travail du marbre et cette formation peut se faire en usine.

Dans notre pays, on ne trouve plus de poseur et nous sommes obligés de recourir à la main-d'œuvre étrangère. Un bon poseur trouvera toujours du travail et c'est un grand handicap pour notre industrie de ne plus trouver de professionnels. On peut se demander d'ailleurs à quelle école on pourrait envoyer les jeunes désireux d'apprendre les techniques de ce métier. N'oublions pas non plus que l'engagement de poseurs présuppose l'engagement d'un employé technicien dessinateur et surveillant.

Tailleurs de pierres

Je terminerai ce rapport en disant un mot des possibilités de développement qui existent réellement, mais ne sont pas mises à profit par nos industriels. Il ne s'agit plus de l'exploitation des gisements dont nous avons tant parlé, mais de celle de notre matière grise. Cette matière précieuse, plus encore que le marbre, serait très répandue dans notre pays. Alors, pourquoi ne pas l'utiliser à bon escient ?

L'Institut National des Industries Extractives, dirigé alors par M. Ledent, a bien voulu s'intéresser à nos problèmes et a pu mettre au point certains procédés destinés à relancer l'industrie de la pierre et du marbre.

Cette institution s'est tout d'abord intéressée aux déchets et a mis au point un marbre artificiel au départ d'un mélange de poussière de marbre et de polyester et, par l'adjonction de pigmentations, et traitement par un moule, on arrive à créer une matière ayant le même aspect que le marbre. On peut imiter le marbre, mais on peut aussi choisir n'importe quelle teinte ou n'importe quel relief. En outre, les éléments peuvent être moulés en creux, ce qui donne un gain précieux de légèreté surtout pour les éléments de façades. Plusieurs applications de ce procédé peuvent se voir en Belgique et à l'étranger, car le système est actuellement commercialisé. L'étude poussée et stricte que l'INIEX a accomplie donne à ce produit toutes les garanties de qualité.

Mais l'INIEX a étudié d'autres procédés donnant à la pierre traditionnelle tous ses atouts : il s'agit d'éléments de façades en tranches de pierres et de marbres. Ces éléments d'une dimension correspondant aux exigences de la pierre naturelle, sont assemblés par un système d'attaches en inoxydable et collés au moyen d'une colle époxy spécialement étudiée. Ces ensembles sont alors fixés sur des châssis métalliques ayant subi un traitement anticorrosion et ces panneaux, qui peuvent atteindre des dimensions de 10 m², sont alors tout simplement pendus à l'aide d'une grue à l'ossature du bâtiment. Il faut voir pour le croire la vitesse de pose de tels éléments. Ceux-ci peuvent être des panneaux plans ou bien des encadrements de fenêtres. Nous avons réalisé cette année encore deux chantiers de moyenne importance, mais je dois reconnaître que nous avons connu certains avatars mineurs du fait *que l'étude préalable* avait comporté des lacunes. A ce moment, ce dont nous avons besoin, c'est d'ingénieurs compétents pouvant calculer au plus juste la force des châssis métalliques nécessaires ainsi que des accroches et pouvant aussi faire office de bureau d'étude, tant au moment de l'élaboration du projet qu'au moment de la mise en œuvre. Je ne puis me désintéresser d'un tel système dont j'ai pu constater l'efficacité et je dirais même, pour les centres des villes, la nécessité. Les études devraient toutefois être continuées quant à la protection anticorrosion des châssis et aux possibilités d'utilisation de châssis en fibres de verre.

La mise en œuvre de bâtiments revêtus d'éléments préfabriqués fait appel à une grande compréhension de la technique, mais l'utilisation de cette matière grise peut ouvrir de très belles perspectives à nos pierres et marbres.

Des études restent à faire également sur la standardisation de certains produits, cette standardisation pouvant permettre aux ateliers de travailler en hiver et d'accélérer les fournitures nécessaires aux bâtiments pendant la bonne saison.

Encore une fois, sachons prendre l'exemple des pays européens qui nous entourent et créons pour nos générations futures un environnement de matériaux naturels qui les replacera dans un entourage plus familier et plus humain. La qualité de la vie est à ce prix. Nos architectes auront à faire preuve d'imagination et de créativité pour utiliser à bon escient les matériaux que la nature met à leur disposition. Ils essayeront d'éviter les facilités qui consistent à recevoir de bureaux d'études des plans tout faits. Ils essayeront de s'informer et nous devrons les y aider.

Il y a un avenir pour la pierre et le marbre dans tous les pays du Marché commun car, de plus en plus, on

devra tenir compte de la nécessité d'un environnement plus humain et nos matériaux sont tout désignés pour remplir ce rôle. Le marché potentiel existe : les récentes élections belges nous ont démontré la grande poussée du mouvement écologique. Si le marché existe, il nous appartient de l'informer.

Je termine en demandant à mes amis carriers ou marbriers de ne pas s'attacher à certains détails de cet exposé qui auraient pu les heurter. De l'échange des idées naîtra la lumière. Enfin, je tiens à remercier vivement l'Université de Bruxelles de l'aide qu'elle veut bien apporter aux carrières et à l'industrie marbrière en général pour relever ce défi à l'Avenir.

à sa banque pour se faire ouvrir un compte courant dont les taux sont, comme vous le savez, prohibitifs. Le crédit est l'âme du commerce et les facilités données aux entreprises ne sont guère réalistes.

5. *L'AVENIR DE LA MAIN-D'ŒUVRE*

Un bon marbrier peut avoir obtenu les connaissances théoriques nécessaires en ayant la formation d'une école de menuiserie. Il lui suffira de quelques mois de pratique pour connaître parfaitement le travail du marbre et cette formation peut se faire en usine.

Dans notre pays, on ne trouve plus de poseur et nous sommes obligés de recourir à la main-d'œuvre étrangère. Un bon poseur trouvera toujours du travail et c'est un grand handicap pour notre industrie de ne plus trouver de professionnels. On peut se demander d'ailleurs à quelle école on pourrait envoyer les jeunes désireux d'apprendre les techniques de ce métier. N'oublions pas non plus que l'engagement de poseurs présuppose l'engagement d'un employé technicien dessinateur et surveillant.

Tailleurs de pierres

Je terminerai ce rapport en disant un mot des possibilités de développement qui existent réellement, mais ne sont pas mises à profit par nos industriels. Il ne s'agit plus de l'exploitation des gisements dont nous avons tant parlé, mais de celle de notre matière grise. Cette matière précieuse, plus encore que le marbre, serait très répandue dans notre pays. Alors, pourquoi ne pas l'utiliser à bon escient ?

L'Institut National des Industries Extractives, dirigé alors par M. Ledent, a bien voulu s'intéresser à nos problèmes et a pu mettre au point certains procédés destinés à relancer l'industrie de la pierre et du marbre.

Cette institution s'est tout d'abord intéressée aux déchets et a mis au point un marbre artificiel au départ d'un mélange de poussière de marbre et de polyester et, par l'adjonction de pigmentations, et traitement par un moule, on arrive à créer une matière ayant le même aspect que le marbre. On peut imiter le marbre, mais on peut aussi choisir n'importe quelle teinte ou n'importe quel relief. En outre, les éléments peuvent être moulés en creux, ce qui donne un gain précieux de légèreté surtout pour les éléments de façades. Plusieurs applications de ce procédé peuvent se voir en Belgique et à l'étranger, car le système est actuellement commercialisé. L'étude poussée et stricte que l'INIEX a accomplie donne à ce produit toutes les garanties de qualité.

Mais l'INIEX a étudié d'autres procédés donnant à la pierre traditionnelle tous ses atouts : il s'agit d'éléments de façades en tranches de pierres et de marbres. Ces éléments d'une dimension correspondant aux exigences de la pierre naturelle, sont assemblés par un système d'attaches en inoxydable et collés au moyen d'une colle époxy spécialement étudiée. Ces ensembles sont alors fixés sur des châssis métalliques ayant subi un traitement anticorrosion et ces panneaux, qui peuvent atteindre des dimensions de 10 m², sont alors tout simplement pendus à l'aide d'une grue à l'ossature du bâtiment. Il faut voir pour le croire la vitesse de pose de tels éléments. Ceux-ci peuvent être des panneaux plans ou bien des encadrements de fenêtres. Nous avons réalisé cette année encore deux chantiers de moyenne importance, mais je dois reconnaître que nous avons connu certains avatars mineurs du fait *que l'étude préalable* avait comporté des lacunes. A ce moment, ce dont nous avons besoin, c'est d'ingénieurs compétents pouvant calculer au plus juste la force des châssis métalliques nécessaires ainsi que des accroches et pouvant aussi faire office de bureau d'étude, tant au moment de l'élaboration du projet qu'au moment de la mise en œuvre. Je ne puis me désintéresser d'un tel système dont j'ai pu constater l'efficacité et je dirais même, pour les centres des villes, la nécessité. Les études devraient toutefois être continuées quant à la protection anticorrosion des châssis et aux possibilités d'utilisation de châssis en fibres de verre.

La mise en œuvre de bâtiments revêtus d'éléments préfabriqués fait appel à une grande compréhension de la technique, mais l'utilisation de cette matière grise peut ouvrir de très belles perspectives à nos pierres et marbres.

Des études restent à faire également sur la standardisation de certains produits, cette standardisation pouvant permettre aux ateliers de travailler en hiver et d'accélérer les fournitures nécessaires aux bâtiments pendant la bonne saison.

Encore une fois, sachons prendre l'exemple des pays européens qui nous entourent et créons pour nos générations futures un environnement de matériaux naturels qui les replacera dans un entourage plus familier et plus humain. La qualité de la vie est à ce prix. Nos architectes auront à faire preuve d'imagination et de créativité pour utiliser à bon escient les matériaux que la nature met à leur disposition. Ils essayeront d'éviter les facilités qui consistent à recevoir de bureaux d'études des plans tout faits. Ils essayeront de s'informer et nous devrons les y aider.

Il y a un avenir pour la pierre et le marbre dans tous les pays du Marché commun car, de plus en plus, on

devra tenir compte de la nécessité d'un environnement plus humain et nos matériaux sont tout désignés pour remplir ce rôle. Le marché potentiel existe : les récentes élections belges nous ont démontré la grande poussée du mouvement écologique. Si le marché existe, il nous appartient de l'informer.

Je termine en demandant à mes amis carriers ou marbriers de ne pas s'attacher à certains détails de cet exposé qui auraient pu les heurter. De l'échange des idées naîtra la lumière. Enfin, je tiens à remercier vivement l'Université de Bruxelles de l'aide qu'elle veut bien apporter aux carrières et à l'industrie marbrière en général pour relever ce défi à l'Avenir.

Perspectives de l'industrie marbrière en Belgique

Deuxième partie

Raymond FOCANT *

RESUME

Alors que la consommation mondiale de marbre est en augmentation constante et que la Belgique possède d'importantes réserves de marbres rouges et gris d'excellente qualité, l'étude du marché belge de ce matériau révèle un solde déficitaire de plusieurs milliards de FB / an.

L'auteur énumère les causes de cet état de fait et analyse les nombreuses raisons qu'il y a de promouvoir l'extraction des marbres belges, tant pour la consommation intérieure que pour l'exportation. Parmi ces raisons, figurent en bonne place la qualité intrinsèque du matériau, les économies d'énergie que présente l'emploi de la pierre en général et l'impact sur l'emploi dans une région en voie de sous-développement.

ZUSAMMENFASSUNG

Obwohl der Weltverbrauch an Marmor ständig zunimmt und Belgien bedeutende Reserven an rotem und grauem Marmor von ausgezeichneter Qualität besitzt, ergibt die Untersuchung des belgischen Marktes für dieses Material einen negativen Saldo von mehreren Milliarden BF / Jahr.

SAMENVATTING

Terwijl het wereldverbruik van marmer constant toeneemt en België over aanzienlijke voorraden beschikt van rood en grijs marmer van uitstekende kwaliteit, blijkt uit een studie van de Belgische markt een nadelig saldo van verschillende miljarden BF / jaar.

De auteur noemt de oorzaken op van deze bestaande toestand en ontleedt de talrijke redenen die bestaan om de extractie van Belgisch marmer te bevorderen, zowel voor het binnenlands verbruik als voor de uitvoer. Onder deze redenen komen de intrinsieke kwaliteit van het materiaal goed uit, de energiebesparingen die het gebruik van de stenen in het algemeen oplevert en de weerslag op de werkgelegenheid in een gewest dat op de onderontwikkeling afstevent.

SUMMARY

While the world demand for marble is constantly growing, Belgium possesses considerable reserves of red and grey marbles of very high quality. The Belgian market for these products exhibits a deficit of several thousand million BFr. every year.

* Président des Carrières et Marbres du Dévonien, rue Jules Besme 56, B-1080 Bruxelles.

tent aujourd'hui la production des reliefs égyptiens, des statues et des colonnes grecques à des prix très avantageux. Nous voudrions reprendre la devise de Laurent de Médicis, annonçant la Renaissance : « le temps revient ». Par l'automation, nous pouvons faire mieux que lui, si une volonté d'utilisation du marbre et de mise en valeur des ressources belges existe et si cette volonté se traduit par des actes.

- On ne peut évoquer le passé et l'avenir du marbre sans parler de ces merveilleux dallages arabes, tellement recherchés et imités aujourd'hui et dont la réalisation est une de nos grandes préoccupations.

- Enfin, nous rappellerons le véritable créateur de l'industrie belge du marbre que fut le Roi Soleil, qui au XVIIe siècle, ouvrit les carrières de Rance et de Philippeville pour le Louvre et Versailles. Le prodigieux succès actuel de ces musées nous rappelle que l'on peut investir dans le luxe; lorsque nous admirons les statues grecques sur fond de marbre rouge au Louvre, nous ne sommes pas peu fiers; lorsque nous visitons Versailles, où des colonnes de marbre de Rance résistent en plein air depuis 5 siècles, nous pensons comme Laurent de Médicis que, grâce à la volonté commune, le temps pourrait revenir.

Je vous ai indiqué quelques-uns de nos espoirs, mais il y a hélas aussi quelques ombres au tableau. La plus importante selon nous est le *manque de recherches* scientifiques et technologiques. Socrate, qui fut marbrier comme son père avant d'être philosophe, nous dit qu'« une vie qui ne pratique aucune investigation n'est pas digne d'un homme ». Au Ve siècle avant J.-C., il y avait en Grèce 5 écoles de sculpture. Le résultat est ces magnifiques statues helléniques dont la perfection n'a pratiquement jamais été égalée.

Aujourd'hui, il y aurait de nombreuses possibilités non seulement d'améliorer l'outillage et le produit marbrier, mais aussi de commercialiser certaines découvertes belges. La petite cellule marbrière de l'Université Libre de Bruxelles, qui a repris une ancienne tradition remontant au professeur C. Camerman, en est un bel exemple. En un an, et malgré les faibles moyens dont elle dispose, elle a pu produire un travail remarquable et fort utile, que M. Netels vous présentera dans quelques minutes. Nous espérons qu'il sera possible de compter bientôt sur une équipe permanente de chercheurs.

La responsabilité des milieux marbriers doit également être soulignée. Quelles que soient les difficultés qui nous attendent, nous sommes en grande partie responsables de notre avenir. L'individualisme, la recherche de solutions faciles par l'importation, le manque de publicité et d'organisation commerciale et nos problèmes communautaires n'ont rien arrangé.

Et, parmi les ombres, il faut mentionner la grande misère de la construction privée. Depuis 10 ans, l'élan des candidats propriétaires est systématiquement freiné. La crise économique ralentit naturellement le rythme des investissements dans ce domaine. A cela s'ajoutent les formalités inombrables, la T.V.A. qui a augmenté les prix, le précompte immobilier et les financements devenus prohibitifs. Finalement, l'enregistrement des entrepreneurs devait isoler une partie des petites entreprises et institutionnaliser le travail en noir.

J'aurais pu terminer avec la litanie habituelle des lamentations belges : l'électricité la plus coûteuse et les salaires les plus élevés du monde; la monnaie maintenue au-dessus de sa valeur, situation qui ne favorise guère les exportateurs; les taux élevés des intérêts bancaires, etc...

Mais je ne voudrais pas finir sur ces notes pessimistes. Bien que nos prix, résultat de la politique sociale adoptée par la Belgique, restent nécessairement élevés à l'échelle mondiale, nous pouvons vendre sur les marchés étrangers, où nos produits sont appréciés. Cela ne suffit pas. Il faut une réelle politique marbrière et, si nos problèmes et nos avantages sont pris en considération par la communauté wallonne, nous pourrons connaître une prospérité exceptionnelle, car la consommation mondiale de marbre est en augmentation constante.

Possibilités de valorisation des ressources marbrières de la bande calcaire méridionale du Bassin de Dinant

Victor NETELS et Jean-Marc VANBELLE *

RESUME

Notre Région wallonne a depuis toujours procuré aux architectes avides de beauté noble, des marbres de grande valeur esthétique. Citons les marbres noirs de Dinant, de Theux ou de Mazy, les marbres Florence, Ste-Anne et Notre-Dame de Dieupart, les marbres Bleu Belge et Grand Antique, les Rouges des Flandres, Griotte, Royal, Byzantin ou encore le marbre Herculanum, brèche calcaire de Onhaye.

A l'heure actuelle, cependant, ce secteur économique présente des signes de fatigue.

Depuis plus de deux ans, nous avons poursuivi à l'Université Libre de Bruxelles une recherche qui vise à établir la richesse marbrière qu'offre encore aujourd'hui le sous-sol de la région wallonne. Pour la première phase du travail, nous nous sommes limités aux calcaires récifaux de forme lenticulaire (biohermes) édifiés durant la sédimentation frasnienne. Ils sont localisés principalement dans quatre régions : la région de Philippeville, étendue de Rance, à l'ouest, à Agimont, à l'est; la plaine des Fagnes, étirée de Chimay à Frasnes; aux alentours de Rochefort et de Durbuy-Barvaux.

Notre première tâche, en abordant le problème marbrier, a été de dresser un inventaire exhaustif comprenant l'ensemble des récifs développés dans la région wallonne, ainsi que l'histoire éventuelle de leur exploitation. Notre travail fait état d'une trentaine de biothermes à haute valeur marbrière potentielle, situés :

- dans la région de Philippeville où de très nombreux récifs de marbres rouges subsistent, souvent exploités épisodiquement et artisanalement
- dans la région de Chimay-Frasnes où d'importants récifs pourraient être revalorisés par une exploitation pour marbre.

* Chercheurs à l'Université Libre de Bruxelles, avenue F.D. Rooseveld 50, B-1050 Bruxelles.

SAMENVATTING

Ons Waalse Gewest heeft te allen tijde marmer met een grote esthetische waarde verschaft aan de architecten op zoek naar edele schoonheid. Wij vernoemen het zwarte marmer van Dinant, Theux of Mazy, het marmer van Florence, Ste-Anne en Notre-Dame van Dieupart, het marmer Bleu Belge en Grand Antique, het rood van Vlaanderen, Griotte, Royal, Byzantin of nog het marmer Herculanum, kalkachtige brecie van Onhaye.

Op dit ogenblik echter, vertoont deze economische sector tekens van vermoeidheid.

Sedert meer dan twee jaar voeren wij in de Université Libre de Bruxelles een onderzoek uit met het oog op het vaststellen van de marmerrijkdom die de Waalse ondergrond momenteel nog biedt. Voor de eerste werkfase hebben wij ons beperkt tot het lensvormig rifkalk (biohermen) gevormd tijdens de frasniaanafzetting. Zij zijn hoofdzakelijk gelokaliseerd in vier streken : de streek van Philippeville, gebied van Rance, ten westen, te Agimont, ten oosten; de vlakte van de Venen, van Chimay tot Frasnes; in de omtrek van Rochefort en Durbuy-Barvaux.

Onze eerste taak bij het aanvatten van het marmerprobleem bestond erin een volledige inventaris op te stellen die het geheel van de in het Waalse Gewest ontwikkelde riffen bevat, evenals de eventuele geschiedenis van hun ontginning. Ons werk vermeldt een dertigtal biothermen met een grote potentiële marmerwaarde, gelegen :

- in de streek van Philippeville waar talrijke rode marmerriffen overblijven die dikwijls episodisch en ambachtelijk worden ontgonnen;
- in de streek van Chimay-Frasnes waar belangrijke riffen zouden kunnen gerevaloriseerd worden door een ontginning voor marmer.

Dans les deux autres régions, Rochefort et Durbuy-Barvaux, les gisements marbriers semblent atteindre leur limite d'exploitation. Cependant, d'importantes strates calcaires givetiennes et frasniennes y sont développées. Des études particulières nous permettraient de connaître leur réelle valeur économique, ainsi que leur condition éventuelle d'exploitation.

L'adaptation de techniques d'exploitation ouvrirait peut-être de nouvelles possibilités à notre industrie marbrière, par exemple le jet cutting, technique du coupage des roches sous l'action d'un jet d'eau sous forte pression.

L'avenir de cette région de l'Entre-Sambre-et-Meuse se présente sous des auspices favorables; les potentialités d'un nouvel essor existent, il s'agit maintenant de les mettre en œuvre.

In de twee overige streken, Rochefort en Durbuy-Barvaux, blijkt dat de marmerafzettingen hun ontginningsgrens bereiken. Belangrijke kalklagen echter uit het Givetiaan en Frasniaan worden er ontwikkeld. Bijzondere studies zouden het ons mogelijk maken hun werkelijk economische waarde te kennen, evenals hun eventuele ontginningsvoorwaarde.

De aanpassing van ontginningstechnieken zou misschien nieuwe mogelijkheden laten voorzien voor onze marmerindustrie, bijvoorbeeld de jet cutting, techniek van het versnijden van gesteenten d.m.v. een waterstraal onder hoge druk.

De toekomst van deze streek tussen Samber en Maas kondigt zich aan onder gunstige auspiciën; de mogelijkheden voor een nieuwe ontwikkeling bestaan; zij dienen nu aangewend te worden.

ZUSAMMENFASSUNG

Unsere wallonische Gegend hat schon immer den Architekten, die edle Schönheit suchten, Marmorsteine von großem ästhetischem Wert geschenkt. Besonders hervorheben möchten wir den schwarzen Marmor von Dinant, Theux oder Mazy, den Florence-, Ste-Anne und Notre-Dame de Dieupart-Marmor, den Bleu Belge- und Grand Antique-Marmor, den roten Marmor von Flandern, Griotte, Royal und Byzantin, oder auch den Herculanum-Marmor, die Kalkstein-Breccie von Onhaye.

Gegenwärtig zeigt dieser Sektor jedoch Anzeichen einer Ermüdung.

Seit mehr als zwei Jahren führen wir an der Freien Universität Brüssel eine Untersuchung durch, mit der der Reichtum an Marmor nachgewiesen werden soll, den der Boden der wallonischen Gegend noch heute bietet. Während der ersten Arbeitsphase haben wir uns auf die Korallen-Kalksteine von linsenartiger Form (Biohermen) beschränkt, die während der Sedimentation von Frasnes aufgebaut wurden. Sie sind hauptsächlich in vier Gegenden zu finden : der Gegend von Philippeville, die sich von Rance im Westen bis nach Agimont im Osten erstreckt; der Ebene der Fagnes, die sich von Chimay bis Frasnes erstreckt; in der Umgebung von Rochefort und Durbuy-Barvaux.

Unsere erste Aufgabe bei der Untersuchung der Marmorvorkommen bestand in der Aufstellung eines erschöpfenden Bestandsverzeichnisses aller in der wallonischen Gegend gebildeten Riffe, sowie der eventuellen Geschichte ihrer Ausbeutung. Unsere Arbeit führt ungefähr dreißig Biothermen mit hohem potentiellen Marmorgehalt an, die gelegen sind :

SUMMARY

From time immemorial Wallonia has always been for architects on the lookout for elegant materials a source of supply of marble of fine appearance : the black marble of Dinant, Theux and Mazy, or the marbles bearing the names of Florence, Ste-Anne and Notre-Dame de Dieupart, those known as Bleu Belge and Grand Antique, the Rouges de Flandres, Griotte, Royal and Byzantin, and finally the Herculanum marble, the breccia marble of Onhaye.

At present, this sector is beginning to flag.

At the Université Libre de Bruxelles we have, for the past two years, been engaged on research with a view to cataloguing the rich sources of marble still available underground in the Walloon Region. In the first phase, we confined our work to the lenticular reef limestones (bioherms) which originated in the Frasnian sedimentation period. They are principally located in four areas : the Philippeville region running from Rance in the West to Agimont in the east; the region of the Fagnes extending from Chimay to Frasnes; the vicinity of Rochefort; the vicinity of Durbuy / Barvaux.

Our first task was to draw up a complete list of the series of reeds found in the Walloon region and, where possible, the history of the extraction thereof. We were able to identify some thirty biotherms with a high marble potential situated :

a) in the region of Philippeville where there are numerous reef beds of red marble, which have frequently been worked sporadically on a small scale;

- in der Gegend von Philippeville, wo noch zahlreiche Riffe aus rotem Marmor vorhanden sind, die oft episodisch und nach handwerklichen Methoden ausgebeutet wurden;
- und in der Gegend von Chimay-Frasnes, wo bedeutende Riffe durch den Abbau des Marmors zur Geltung gebracht werden könnten.

In den zwei anderen Gegenden, Rochefort und Durbuy-Barvaux, scheinen die Marmor-Vorkommen ihre Ausbeutungsgrenze zu erreichen. Dort sind jedoch bedeutende Givet- und Frasnes-Kalksteinschichten vorhanden. Spezielle Untersuchungen würden uns gestatten, ihren tatsächlichen Wert, sowie die Bedingungen für ihre eventuelle Ausbeutung zu bestimmen.

Die Anpassung der Ausbeutungstechniken würde unserer Marmorindustrie vielleicht neue Möglichkeiten eröffnen, zum Beispiel die Einführung des Strahlschneidens, einer Technik zum Schneiden des Gesteins durch einen Wasserstrahl unter hohem Druck.

Die Zukunft dieser Gegend zwischen Sambre und Maas steht unter günstigen Vorzeichen; Möglichkeiten für einen neuen Aufschwung sind vorhanden, es gilt jetzt, sie zu nutzen.

b) in the Chimay-Frasnes region, where there are major reef deposits which could be reworked for marble.

In the other two regions, Rochefort and Durbuy/Barvaux, the marble deposits would seem to be nearly exhausted. Nevertheless, there are substantial deposits of Givetian and Frasnian limestones. Specific investigations would enable us to establish their true economic value and the possible working conditions.

Modification of working techniques might open up new possibilities for our marble industry, e.g. jet cutting, a technique for cutting marble by means of a high-pressure water jet.

The future of this region, lying between the Sambre and Meuse rivers, is bright; the potential for a revival of the industry is there - it remains for us to exploit it.

Le but de ce travail, entrepris depuis plus de deux ans à l'Université Libre de Bruxelles, est de rechercher les potentialités marbrières que recèle encore aujourd'hui la région wallonne [16].

Nous en résumons les premières conclusions ci-après. Le sous-sol de cette région, qui a fourni dans le passé de multiples matières premières, renferme toujours de nombreuses strates calcaires à intérêt marbrier.

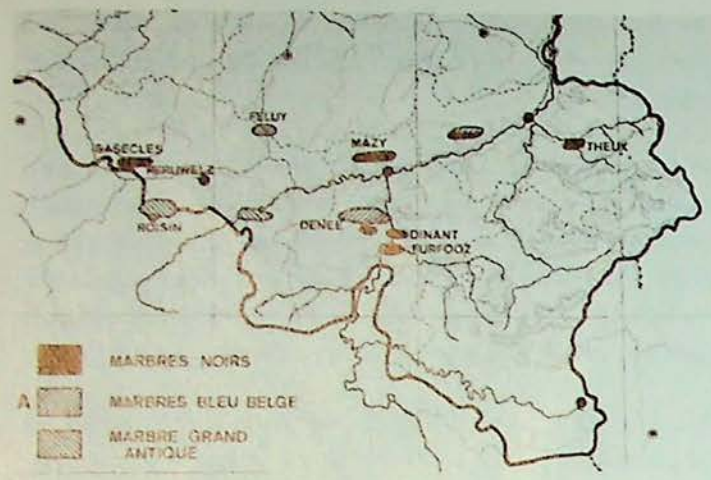
Citons, parmi les plus connus, les marbres noirs de Dinant-Denée, de Mazy ou de Basècles, les marbres noirs veinés de blanc, marbre bleu belge et Grand Antique; les marbres à fond gris, marbre Florence, Sainte-Anne et Notre-Dame de Dieupart; les marbres à fond rouge, marbre Griotte, Byzantin et Royal, et les marbres bréchiques, marbre brèche de Waulsort ou Herculanum (fig. 1).

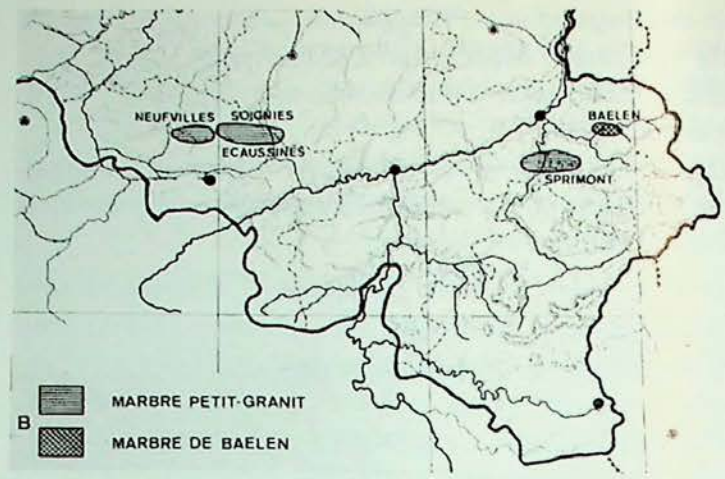
Les premiers résultats de notre étude concernent plus spécialement la région de Philippeville. Cette zone est limitée à l'ouest par Rance, à l'est par Agimont. Ils sont également relatifs à la Plaine des Fagnes, étirée de Chimay à Frasnes, aux alentours de Rochefort et de Durbuy-Barvaux (fig. 2). Ces quatre régions sont toutes auréolées d'un prestigieux passé marbrier. Nombreux furent les demeures et les palais transalpins richement décorés de « Rouge » qui y sont produits.

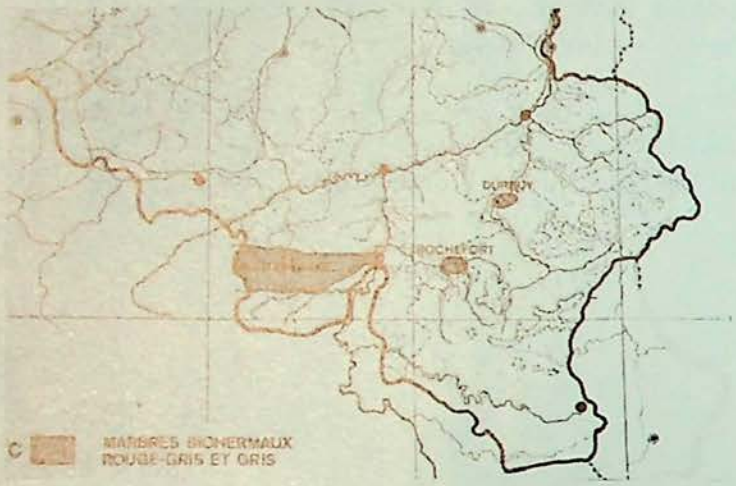
Comme M. Focant vient de le rappeler, l'essor véritable et l'exploitation intensive des gisements résultent du choix, par Louis XIV, des matériaux affectés à l'aménagement intérieur du château de Versailles. Faisant confiance aux « Rouges de Flandres », le Roi Soleil déclencha une véritable mode; les têtes couronnées d'Europe, les personnes fortunées, voulant atteindre le luxe décoratif du château de Versailles, commandèrent du marbre rouge.

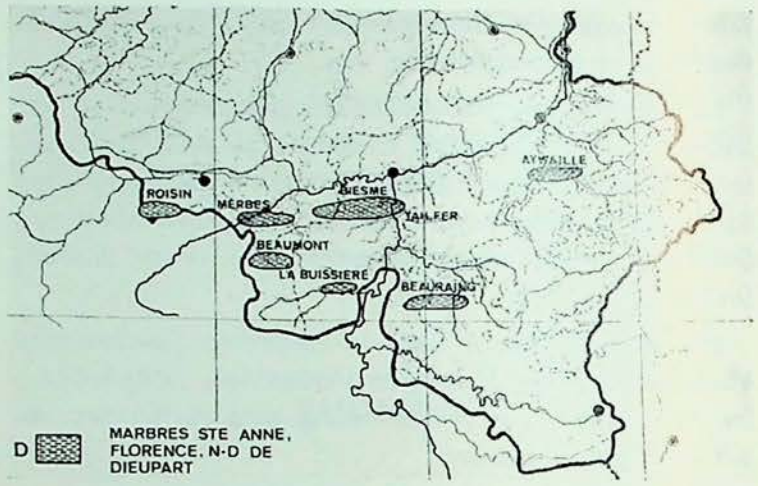
Notre intérêt s'est exclusivement concentré sur les calcaires construits, organogènes, de forme lenticulaire, appelés biohermes, édifiés au Dévonien et en particulier durant la sédimentation frasnienne. Ces variétés marbrières sont, dans les régions étudiées, aussi nombreuses que les gisements exploités et sont toutes à fond rouge-gris.

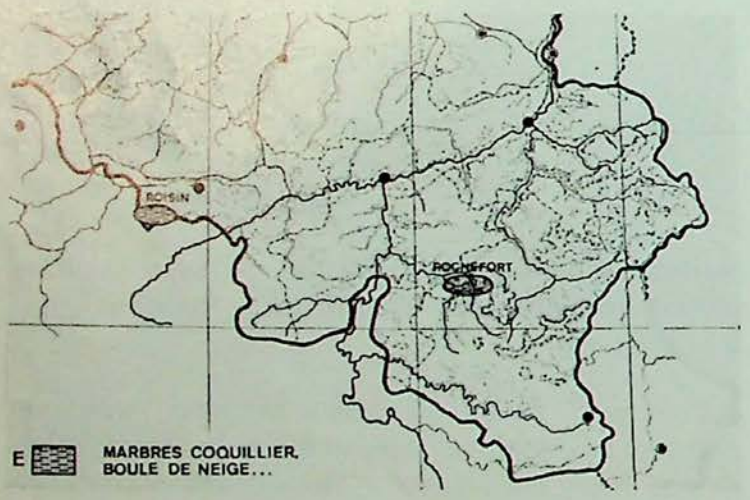
Les calcaires récifaux les plus rouges sont du type « Griotte » (Griotte unie, fleurie, ramagée, veinée, flammée). Le calcaire gris rosé est dénommé « Byzantin » (Byzantin proprement dit et Byzantin anti-











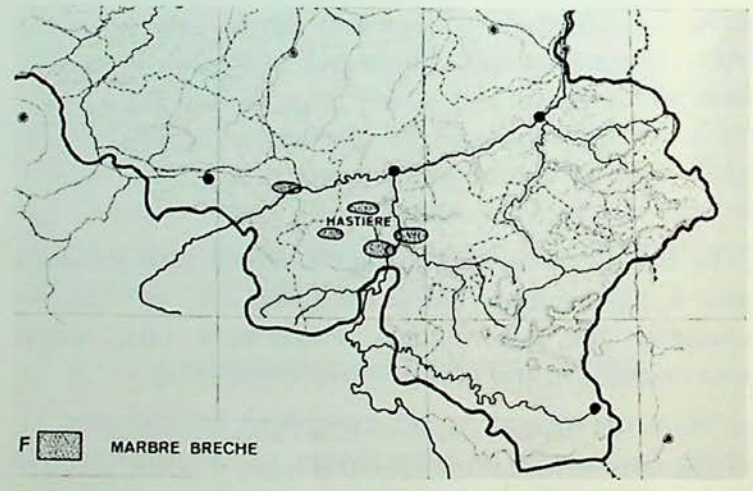


Fig. 1 : Présentation des zones d'exploitation des différents types de marbres belges sur base de [6]

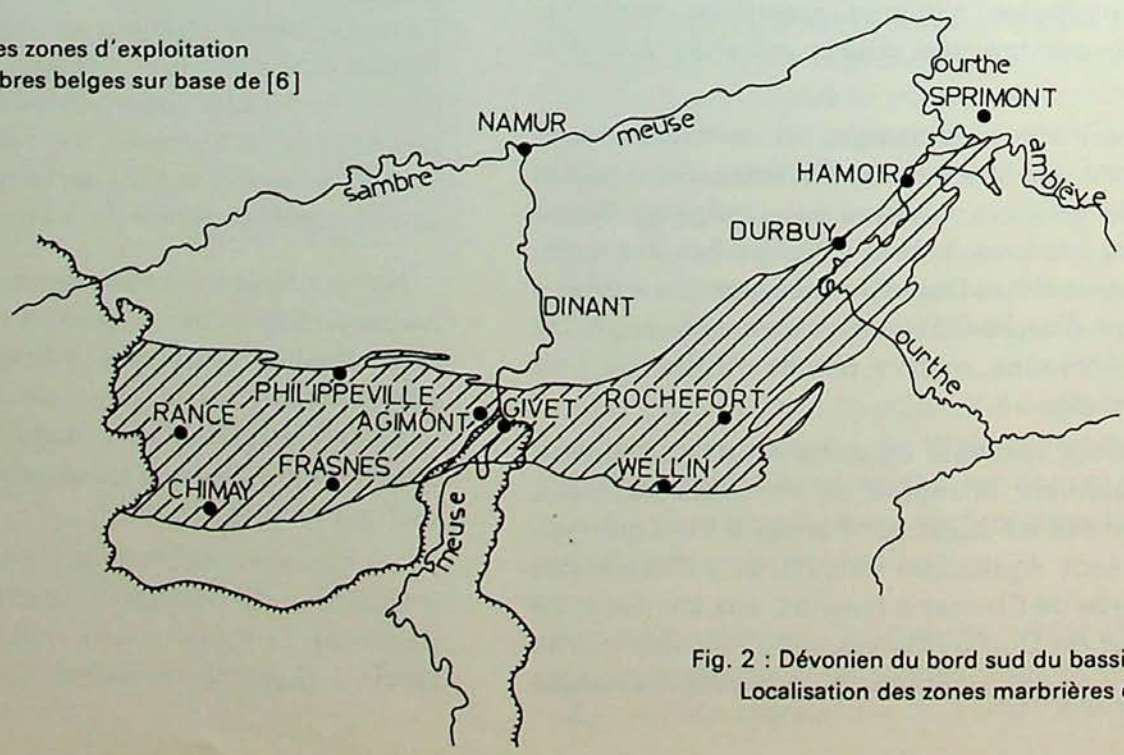


Fig. 2 : Dévonien du bord sud du bassin de Dinant. Localisation des zones marbrières étudiées

que). Le calcaire rouge clair de la partie supérieure du récif fournit les variétés « Royal » (Royal foncé, rosé, bleuté). Les calcaires gris donnent les types Gris Ardennes, Gris ardennais, gris Versailles.

Les récifs de Philippeville sont de forme générale lenticulaire, concavo-convexe à contour circulaire ou elliptique. Ils reposent toujours sur un soubassement de schistes noduleux et sont entièrement entourés de sédiments schisteux, frasniens et famenniens. Les plus grands d'entre eux ont un diamètre de l'ordre de 400 m et une puissance de 100 m.

Dans les autres régions marbrières, les formations récifales sont de même type à quelques particularités près, que nous détaillerons ultérieurement. Nous savons que les récifs de la zone anticlinale de Philippeville sont constitués d'une série de zones d'accroissement successives qui s'emboîtent parfaitement les unes au-dessus des autres (fig. 3). Au sein d'une de

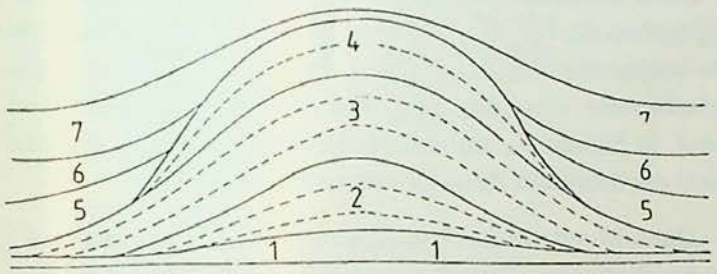


Fig. 3 : Coupe théorique d'un récif complet de calcaire rouge F_{2j}, d'après Delhaye [5]

1. Schistes noduleux à *Acervularia*
2. Niveau inférieur du récif : Marbre variété *Griotte*. Calcaire rouge-brun à *Acervularia, Alvéolites* et cristaux de calcite
3. Niveau moyen du récif : marbre variété *Byzantin*, Calcaire rose, devenant souvent entièrement gris à la partie supérieure; très nombreux amas de coquilles
4. Niveau supérieur du récif : marbre variété *Royal*. Calcaire rose à sa partie inférieure passant insensiblement à un calcaire rouge-brun, très riche en organismes constructeurs
5. Schistes verts ou rouges à stratification souvent confuse, remplis de polypiers
6. Schistes verts de Frasnes
7. Schistes de Matagne.

ces zones, les variations latérales du marbre, de la répartition des espèces animales, des stromatactis, de la teneur en oxyde de fer, du pourcentage de matière argileuse, se font par gradations insensibles. Par contre, les variations verticales, d'une zone à la suivante, se font sans transition. Les surfaces de contact séparant les différentes zones sont, d'ordinaire, très irrégulières mais continues et se suivent dans l'ensemble du récif. Leur existence serait la conséquence d'une période de ralentissement du récif, voire même d'un arrêt momentané. Outre ces surfaces de contact continues, nous observons, intercalés dans le massif calcaire, de nombreux joints schisteux qui s'en détachent et s'y raccordent. Leurs extensions sont plus modestes et plus locales. Les masses de calcaire qu'ils délimitent sont soudées les unes aux autres suivant des surfaces de contact très accidentées qui s'interpénètrent parfois littéralement. Dans les protubérances à nodules calcaires se sont organisés des polypiers. Ils représentent l'étape initiatrice qui a permis aux organismes constructeurs de se développer massivement et, dès lors, de prétendre édifier un récif.

La partie inférieure du récif montre une succession de zones se répétant alternativement; les unes sont caractérisées par de longues traînées de calcite blanche, concrétionnées, sans structure organique apparente et appelées stromatactis, les autres sont riches en polypiers **Acervularia, Alvéolites** isolés dans une pâte détritique abondante de couleur rouge-brun très foncée. Les organismes en position de vie attestent de la non turbulence de leur milieu de croissance.

Le niveau moyen débute par un calcaire géodique de teinte rose passant graduellement au gris-bleu vers son sommet. Les constructeurs sont essentiellement des **Alvéolites,** des **Cyathophyllum** et des **Favosites** auxquels sont associés des organismes tels que brachiopodes, crustacés ou céphalopodes.

L'évolution du récif s'est poursuivie dans la zone de turbulence des vagues. Les stromatactis font pratiquement défaut dans cette zone. Le niveau supérieur présente l'évolution inverse des deux premiers, qui se traduit par le passage du calcaire gris-bleu au calcaire rouge. La coloration rouge y est cependant moins prononcée, les stromatactis sont rares et leurs concentrations restreintes.

Dresser l'inventaire exhaustif tant des gisements vierges qu'exploités et établir l'historique des exploitations anciennes et actuelles nous permettront de tirer les lignes directrices des recherches à mener dans l'avenir. L'inventaire le plus complet rassemblant l'ensemble des récifs développés dans la région wallonne et les renseignements relatifs à leur exploitation éventuelle ont donc été notre première mission.

Nous ne pouvons évoquer que très brièvement l'évolution de la pensée scientifique sur la reconnaissance d'un phénomène récifal dévonien en Ardennes belges et, par voie de conséquence, la distribution spatiale des récifs.

Le caractère purement corallien de certains de nos calcaires dévoniens, du Couvinien supérieur au Frasnien, a été dégagé par Dupont [9] au début des années 1880. En s'inspirant des travaux menés sur les formations récifales actuelles, notamment ceux de Darwin [1], et en adoptant leur classification, il répartit les récifs anciens dans deux groupes :

- le groupe des calcaires récifaux sans stratification, dus à l'activité exclusive des coraux (récifs à **Calcéoles,** à **Pachystroma,** calcaire à stromatactis et à **Diaspora**);
- le groupe des calcaires organodétritiques, formés de l'accumulation de débris coralliens dont le marbre Florence et le marbre coquillier en sont les représentants. La volonté de transposition au Dévonien des résultats de recherches menées sur les récifs actuels, poussée jusqu'à une parfaite identité entre eux, a été critiquée, à juste titre, par Mailleux [15].

Delhaye [3, 4, 5] prolongea les études entreprises sur le phénomène corallien dévonien. Se référant à la symétrie de la construction récifale, ce chercheur suggère que la formation des récifs du massif anticlinal de Philippeville devait répondre à une oscillation du fond sous-marin. Elle était arbitrée par l'antagonisme entre le taux de subsidence du bassin et la vitesse de croissance du récif.

Par ses travaux stratigraphiques, Mailleux [14, 15] a parfaitement défini la relation entre les types de récifs, leurs sédiments d'envasement et leur répartition stratigraphique.

Les récifs se répartissent en trois groupes distincts dont chacun occupe un niveau stratigraphique constant et possède des caractéristiques propres (fig. 4).

Frasnien supérieur : Assise de Matagne (F_3)

F_3b : Schistes à *Buchiola palmata*
F_3a : Schistes à *Chanotes armatus*

Frasnien moyen : Assise de Frasnes (F_2)

F_2i : Schistes à *Spirifer pachyrhynchus* contenant les récifs de calcaire rouge à *Acervularia,* F_2j
F_2g : Calcaire stratifié à *Stromatoporoïdes* contenant les récifs de calcaire gris à *Stromatoporoïdes* F_2h
F_2f : Schistes et calcaires à *Camarophoria megistana*
F_2e : Schistes à *Leiorhynchus formosus*
F_2c : Calcaire argileux, schistes à *Pentamerus brevirostris* contenant des récifs de calcaire rouge à *Phacellophyllum* F_2d
F_2b : Schistes à *Receptaculites Neptuni* et *Spirifer bisinus*
F_2a : Schistes et calcaires argileux, zone des monstres à *Spirifer orbelianus*

Frasnien inférieur : Assise de Fromelennes (F_1)

F_1b : Calcaire à *Myophoria transrhenana*
F_1a_2 : Calcaire à *Stromatoporoïdes*
F_1a_1 : Schistes à *Spirifer tenticulum*

Fig. 4. Echelle stratigraphique du Frasnien.
D'après Mailleux, extrait de [18]

Du plus ancien au plus récent, nous avons :

1. Les récifs à **Phacellophyllum,** F_2d

Ils sont envasés dans les calcaires argileux et schisteux à **Pentamerus brevirostris,** F_2c

2. Les récifs à **Pachystroma,** F_2h

Ils sont envasés dans les calcaires gris stratifiés à **Cyrtoceras** et **Cyaphaeus,** F_2g

3. Les récifs à **Acervularia,** F_2j

Ils sont envasés dans les schistes à **Spirifer pachyrhynchus,** F_2i.

Ce même auteur établit l'échelle stratigraphique correcte du Frasnien et confirma l'hypothèse de Delhaye d'une oscillation du fond marin à cette époque.

Cependant, la première vision globale du phénomène corallien qui perdura du Couvinien supérieur au Frasnien a été donnée par Lecompte [11]. Il établit également les corrélations entre les formations lenticulaires frasniennes du bord sud du bassin de Dinant à celles de forme stratoïde (biostrome) du versant septentrional du bassin. L'évolution du sud vers le nord se présente comme suit (fig. 5) :

- Dans la plaine des Fagnes : les trois niveaux stratigraphiques F_{2c}, F_{2g}, F_{2i} renferment chacun un type de bioherme respectivement F_{2d}, F_{2h}, F_{2j}. Ils sont généralement envasés par des sédiments schisteux; seul, le niveau F_{2g} constitué de calcaire impur et continu est intercalé dans la série sédimentaire.

- Dans le massif de Philippeville : seuls les récifs F_{2j} subsistent sous leur forme biohermale. Nous reconnaissons les correspondants, développés sous forme biostromale, des deux premiers niveaux : F_{2d}, F_{2h}.

- Plus au nord encore, les biostromes ont totalement remplacé les biohermes. Ils sont séparés les uns des autres par des niveaux calcaires plus ou moins argileux. En direction littorale, les biostromes évoluent en complexes biostromaux et le terme ultime de leur évolution est un calcaire organoclastique impur, un peu gréseux et dolomitique, que les géologues belges ont appelé macigno.

Les biostromes se sont formés sur un shelf à faible taux de subsidence et sous une faible couverture d'eau, tandis que les biohermes s'édifiaient à proximité de la zone de flexure dans le bassin subsident.

Du Couvinien au Frasnien, la zone de flexure migre en direction du nord consécutivement à l'enfoncement continu du bassin et à la transgression marine (fig. 6a). C'est ainsi que, dans la région de Couvin, la prépondérance du faciès biostromal au Couvinien et au Givetien indique que la zone de flexure devait se situer bien au sud de cette région [12]. Les travaux actuels permettent d'affiner les conclusions de Lecompte. Ainsi, Tsien [17] nous apprend que les récifs se sont édifiés,soit durant des périodes tectoniquement calmes, soit durant des périodes de transgression marine. A chacune de ces périodes se sont développés des ensembles organogènes adaptés

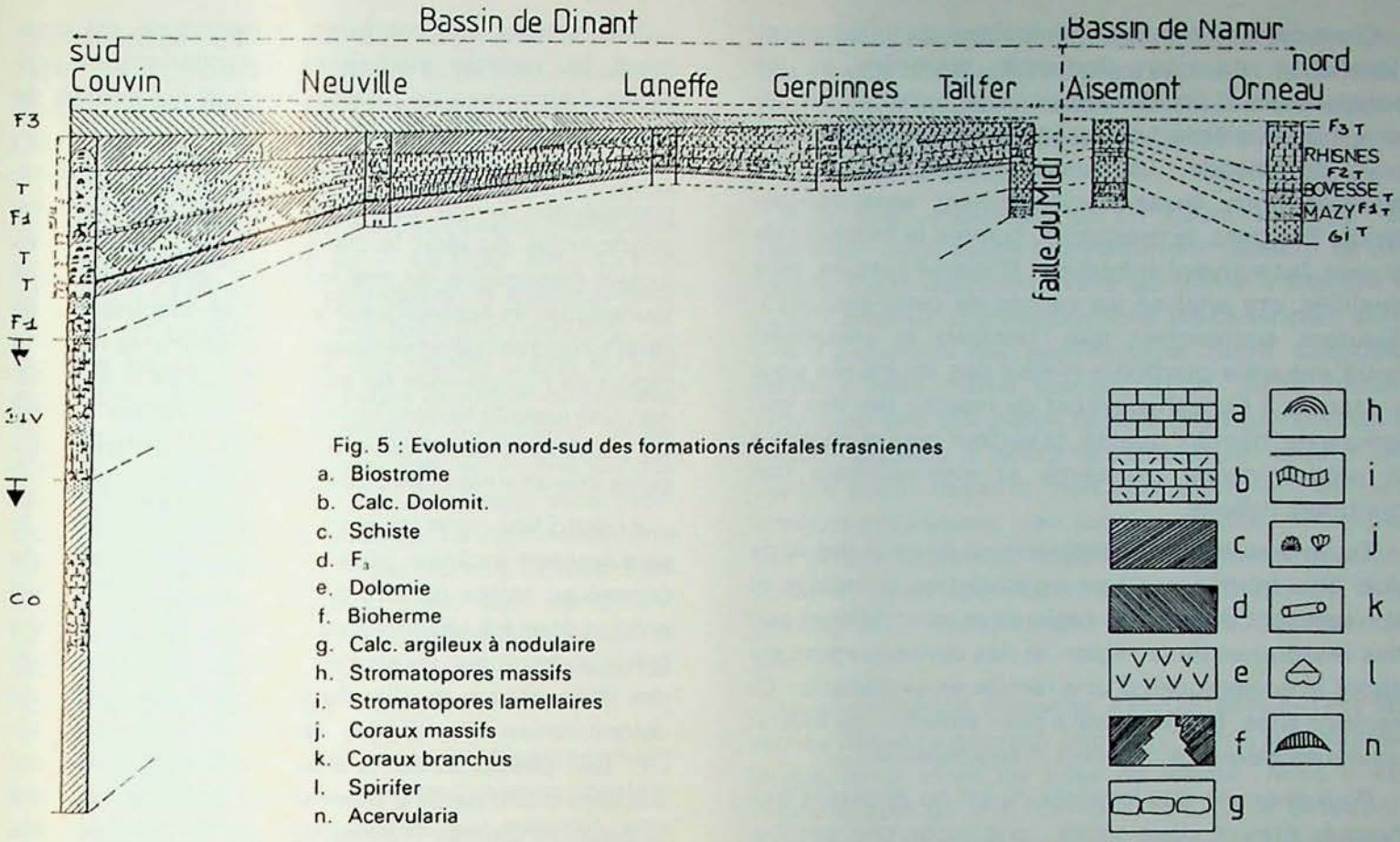


Fig. 5 : Evolution nord-sud des formations récifales frasniennes

a. Biostrome
b. Calc. Dolomit.
c. Schiste
d. F_3
e. Dolomie
f. Bioherme
g. Calc. argileux à nodulaire
h. Stromatopores massifs
i. Stromatopores lamellaires
j. Coraux massifs
k. Coraux branchus
l. Spirifer
n. Acervularia

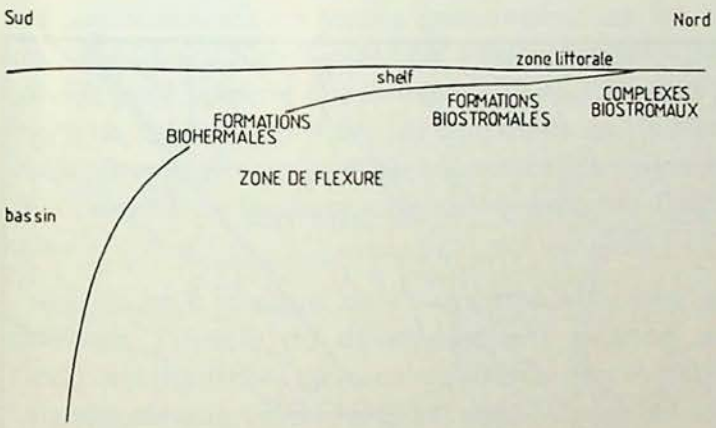


Fig. 6a : Localisation des zones de formation des types récifaux dévoniens

aux conditions du milieu. Sur base de leur morphologie, Tsien [17] distingue six types de récifs :

- Ceux développés durant la phase stable (fig. 6b) :

sur le shelf :
  biostromes (R_4)
  barrières récifales (R_1) vers le large
  patch reef (R_2)

dans le bassin :
  biohermes (R_3)

- Ceux développés durant la phase transgressive :

sur le shelf :
  récif frangeant (R_6)

dans le bassin :
  mud mounds (R_5)

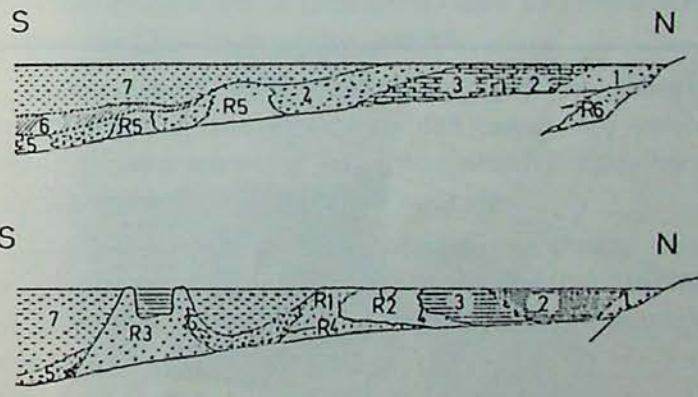


Fig. 6b : Localisation des zones de formation des types récifaux d'après Tsien [17]

A. *En phase de transgression*

1. faciès littoral
2. calcaires argileux
3. calcaires noduleux
4. schistes noduleux
5. calcaires pélagiques
6. schistes pélagiques
7. Schistes

R_5 Mud mounds
R_6 Récif frangeant

B. *En phase de stabilité*

1. faciès littoral, très localisé
2. faciès lagunaire
3. faciès sublagunaire
4. faciès subrécifal
5. schistes noduleux
6. « talus »
7. schistes azoïques postérieurs au développement des récifs

R_1 Barrière récifale
R_2 Patch reef
R_3 Complexes biohermaux
R_4 Biostrome

C'est dans ce contexte géologique qu'il faut situer l'évolution de notre industrie marbrière et les perspectives d'un développement futur. Il fut un temps où nos exportations gagnaient l'ensemble des pays du monde. La qualité intrinsèque de nos marbres nous laissait pratiquement sans concurrence. Pourtant, la prospérité, comme la fraîcheur de la rose, fut souvent éphémère. D'autres auteurs, plus qualifiés, ont analysé les causes de cette évolution. Ajoutons simplement que, familiale et artisanale, notre industrie marbrière n'était pas structurée pour s'opposer à l'envahissement du marché par des imitations de moindre qualité, ni surtout pour répondre à la prédominance croissante et internationale des marbriers italiens.

Toute tentative de redéploiement de cette industrie doit être fondée sur une appréciation complète et correcte tant du marché national et international que des ressources de la région et des conséquences sociales et écologiques d'une remise en exploitation de certains sites. Notre travail a pour ambition de fournir quelques éléments objectifs d'appréciation.

Pour chacune des localités où un ou plusieurs biohermes étaient développés, une recherche particulière a été entreprise.

Pour chaque site marbrier, la structure du gisement, les variétés marbrières éventuellement produites, l'historique de l'exploitation et les causes de l'abandon sont renseignés.

Le volume de calcaire au-dessus de la surface topographique a été estimé quand la situation topographique du récif le permettait. Les contraintes locales (occupation du site marbrier, préoccupations touristiques et écologiques) y ont été discutées. Les caractéristiques géométriques des biohermes F_{2j} de la région de Philippeville ne sont pas faciles à déterminer. Ces massifs se sont comportés durant les phases du plissement de l'Ardenne comme de simples nodules interstratifiés dans des sédiments schisteux.

Aujourd'hui, nous les retrouvons avec leur base le plus souvent inclinée, plus rarement subhorizontale comme au temps de leur croissance. Généralement enfouis dans les sédiments schisteux, ils sont parfois faillés ou fracturés; localement, ils peuvent avoir subi des phénomènes de dissolution, voire un début de dolomitisation affectant les parties limitrophes du récif. Les phénomènes d'érosion les ont souvent amputés d'une partie d'eux-mêmes. Par contre, dans la région de Chimay-Frasnes, les récifs F_{2h} de calcaire gris, beaucoup plus volumineux et étendus, émer-

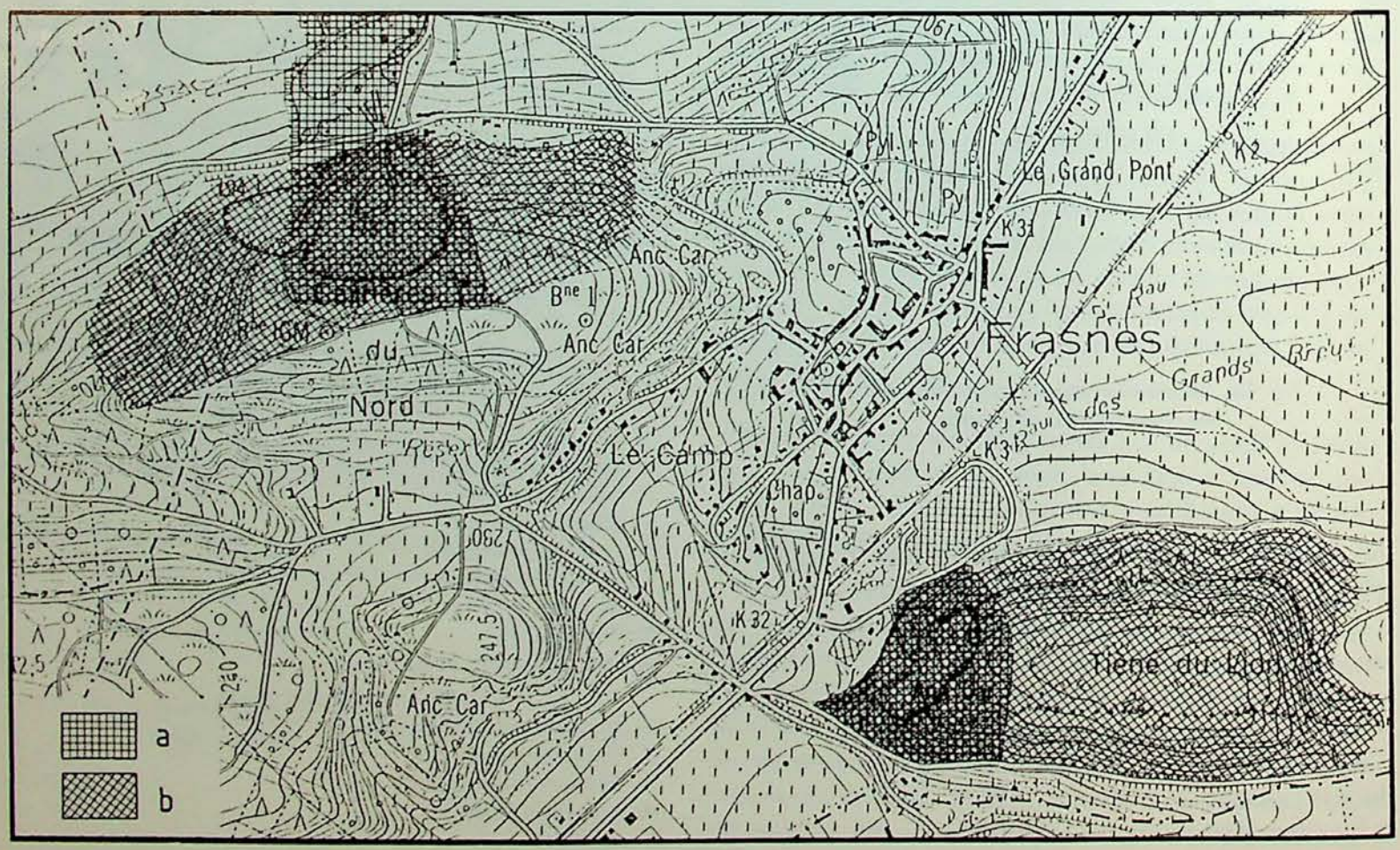


Fig. 7 : Frasnes : exemple de proposition d'aménagement du plan de secteur

a. Zone d'extraction prévue par le plan de secteur de Philippeville

b. Aménagement de la zone d'extraction prévue par le plan de secteur de Philippeville

gent presque totalement des sédiments d'envasement, nous autorisant à estimer le volume de calcaire développé au-dessus de la surface topographique (fig. 7).

Un document de synthèse a été établi par localité qui comporte, dans le cas général, la carte géologique sur fond topographique au 1/10.000, ainsi qu'une carte au 1/10.000 de proposition d'aménagement de plan de secteur sur fond topographique (fig. 7). Lorsque les conditions d'une reprise d'une activité semblaient réunies, nous avons esquissé les grandes options pour une exploitation rationnelle. Nous n'avons pas hésité à proposer des recherches sur des techniques d'avant-garde, tel l'abattage sous pression d'eau (le fameux jet cutting). La maîtrise de cette technologie révolutionnaire permettrait de mettre en exploitation de nombreux sites, en combinant harmonieusement les considérations extractives et écologiques et donnerait un atout majeur à notre savoir-faire technologique.

La préservation du milieu et le développement touristique ont été une de nos principales et constantes préoccupations; nous avons, par exemple, proposé quelques étapes « obligées » à intégrer dans un circuit touristique régional. Un circuit combinant harmonieusement les étapes gastronomiques, les visites d'édifices historiques, de sites naturels ou façonnés par l'homme et des exploitations marbrières, mené de façon à satisfaire les exigences les plus sévères, devrait être élaboré par les services compétents de l'Exécutif de la Communauté française de Belgique.

Au fur et à mesure de l'avancement de nos recherches, l'intérêt du développement rationnel de l'industrie marbrière devenait de plus en plus évident. La rationalisation comporterait entre autres, et sur base des réalités existantes, une certaine centralisation du travail marbrier à l'échelle de la Région. L'extraction, mais surtout le façonnage du marbre dans notre région, offre plusieurs avantages : d'une part, la plus-value prise par le bloc de marbre bénéficie directement à la population régionale. D'autre part, le travail marbrier exige une bonne qualification de ses ouvriers. Le marbre est un matériau naturel noble qui, lors de sa mise en forme, entraîne de nombreux déchets. La commercialisation de ceux-ci, sous forme, par exemple, de pavements de rue, de gravillons, de mosaïques, permettrait de mieux rentabiliser l'exploitation proprement dite des marbres. Notre intérêt était évidemment concentré sur les tertres de calcaire rouge qui ont fait, jadis, la renommée de ces régions. Mais les circonstances géologiques nous ont conduits à nous préoccuper également des strates calcaires en bancs continus et stratifiés, ainsi que du complexe biostromal F_{2gh}. Bien qu'elles ne fussent pas l'objet principal de nos recherches, nous ne pouvions négliger cette réelle richesse potentielle. Ces niveaux calcaires avaient été exploités localement pour marbre, bleu de Vodelée, veiné Saint-Christophe (Evrechailles) et actuellement, à l'arrêt à Aywaille, le Notre-Dame de Dieupart.

Pour finir, indiquons qu'au cours de nos recherches, nous avons constamment ressenti la nécessité d'une définition claire du terme « Marbre » [10]. Certaines communications précédentes, ainsi que l'exposition qui accompagne notre Congrès, reflètent cette même préoccupation. Sans vouloir provoquer une discussion nébuleuse, signalons qu'à l'heure actuelle il serait important de définir un marbre (roche calcaire), non plus seulement par ses attributs esthétiques, mais aussi quantitativement par une série adéquate de tests (composition chimique, porosité, poids spécifique, gélivité, résistance à la flexion, à la compression, à l'usure, qualité du poli,...).

La classification française AFNOR concernant les roches calcaires pourrait peut-être, dans un premier temps, nous servir de base de travail. Mais il est vraisemblable qu'une normalisation de la définition d'un marbre doit être trouvée à l'échelle européenne. Quantitativement défini, un marbre aurait ipso facto un label de garantie le mettant à l'abri des imitations et des calcaires de moindre qualité.

En conclusion, nous dirons donc que les réserves marbrières toujours présentes dans le sous-sol wallon peuvent faire perdurer leur réputation prestigieuse empoussiérée mais justement acquise.

L'inventaire exhaustif que nous avons dressé nous a permis de sélectionner une trentaine de lentilles organogènes F_{2j} et F_{2h}, à haute valeur potentielle marbrière.

Dans les régions de Durbuy-Barvaux et de Rochefort, les marbres produits étaient de grande réputation. Mais à l'heure actuelle, les gisements sont abandonnés par suite de leur épuisement, à l'exception de la carrière Saint-Martin à Humain. Mais, dans ces régions, les formations de calcaire givetien et frasnien permettraient le développement de l'activité extractive d'un matériau moins noble certes, mais d'un apport économique certain.

Les régions de Chimay-Frasnes et de Philippeville, au riche passé marbrier, pourraient avoir leur avenir en partie orienté vers le travail de ce matériau noble. Les réserves de marbre de qualité sont importantes dans les deux régions et déjà des sociétés d'exploitation, confiantes dans l'avenir, ont investi dans le travail du marbre. Les biohermes F_{2h} de calcaire gris, situés dans la bande de Chimay-Frasnes, sont de grandes dimensions et généralement d'un calcaire de grande pureté chimique; ils représentent une réserve de calcaire et de marbre artisanalement et imparfaitement valorisée.

La volonté de relance économique du secteur marbrier se basera sur les qualités et l'expérience de nos maîtres carriers, mais aussi sur la qualité intrinsèque de ces calcaires marbres dévoniens.

L'imagination, l'instinct de créativité de nos marbriers, l'agressivité commerciale de ceux-ci seront développés et conduits peut-être par une volonté politique régionale dynamisante.

Le passé historique et l'avenir de l'Entre-Sambre-et-Meuse sont étroitement associés au travail du marbre. Celui-ci pourrait, par exemple, être raconté, vécu en parcourant cette contrée à la recherche des carrières de marbre qui lui apporta beauté, richesse et renommée.

L'avenir se présente sous des auspices favorables, les potentialités d'un nouvel essor existent, il s'agit maintenant de les mettre en œuvre.

BIBLIOGRAPHIE

[1] DARWIN : On the Structure and Distribution of Coral Reef, 2e édition 1874. Traduction française par Cosserat.

[2] DELHAYE, F. : Les différences de facies des récifs à *Acervularia* de la bande Fromelenne-Trélon et du massif de Philippeville. Bull. Soc. belge Géol., t. 42, 1932, pp. 86-94.

[3] DELHAYE, F. : Etude de la formation des récifs de calcaire rouge à *Acervularia* et *Hypothiris cuboïdes*. A.S.G.B., t. 40, 1913-1914, pB. 469-481.

[4] DELHAYE, F. : Sur les relations des schistes de Matagne avec les récifs de calcaire rouge du bord sud du bassin de Dinant. A.S.G.B., t. 40, 1913-1914, pB. 481-490.

[5] DELHAYE, F. : Etude de la formation des récifs de calcaire rouge à *Rhynchonella cuboïdes*. A.S.G.B., t. 35, 1907-1908, pB. 243-253.

[6] DEMARET, J. : Gisements, exploitations, travail et commerce des marbres. Annales des Travaux Publics belges, vol. 44, 1886, pp. 497-574.

[7] DUMON, P. : Le Marbre. Bull. Soc. belge Géol., t. 89, fasc. 2, 1980, pp. 63-65.

[8] DUPONT, Ed. : Sur les calcaires frasniens d'origine corallienne et sur leur distribution dans le massif paléozoïque de Belgique. Bull. Académie Royale de Belgique, t. 10, 8e série, 1885, pp. 239-273.

[9] DUPONT, Ed. : Les îles coraliennes de Roly et de Philippeville, Bulletin Musée Royal d'Histoire Naturelle de Belgique, t. I, 1882, pp. 89-160.

[10] GOSSELET, V. : Excursion du Caillou-qui-Bique. Société géologique du Nord, t. 27, 1899, pp. 49-55.

[11] LECOMPTE, M. : Compte rendu de la session extraordinaire de la Société Géologique de Belgique et de la Société Belge de Géologie consacrée à l'étude du phénomène récifal dévonien dans la partie occidentale du bassin de Dinant et du bassin de Namur. Ann. Soc. Géol. Belg., t. 83, 1959-1960, pp. 1-134.

[12] LECOMPTE, M. : Quelques précisions sur le phénomène récifal dans le Dévonien de l'Ardenne et sur le rythme sédimentaire dans lequel il s'intègre. Inst. Royal des Sc. Nat. Belg., t. 32, n° 21, 1956, pp. 13-39.

[13] LECOMPTE, M. : Contribution à la connaissance des récifs du Frasnien de l'Ardenne. Mém. Inst. Géol. U.C.L., t. 10, 1936, pp. 26-112.

[14] MAILLEUX, E. : Nouvelle contribution à l'étude des récifs coralligènes du Frasnien. Bull. Soc. belge Géol., t. 28, 1914, pp. 82-93.

[15] MAILLEUX, E. : Nouvelles observations sur le Frasnien et en particulier sur les paléorécifs de la plaine des Fagnes. Bull. Soc. belge Géol., t. 27, 1913, pp. 67-104.

[16] NETELS, V. et VANBELLE, J.M. : Etude de la bande calcaire méridionale du bassin de Dinant dans la perspective de valorisation des ressources marbrières de la Région. U.L.B., 1979-1980.

[17] TSIEN : Les régimes récifaux dévoniens en Ardenne. Bull. Soc. belge Géol., t. 89, fasc. 2, 1980, pp. 71-102.

[18] Collectif : Prodrome d'une description géologique de la Belgique. Publié sous la direction de P. Fourmarier. Liège, Société Géologique de Belgique, 1954, 826 p., 160 fig., 10 pl.

Elaboration des pierres ornementales, y compris les problèmes d'utilisation des petits blocs

Carlo COSTA *

RESUME

Qu'elles soient destinées à la réalisation d'œuvres monumentales, à l'intégration dans l'architecture ou à un emploi purement décoratif, les pierres ornementales extraites sous forme de blocs, doivent être élaborées avant de pouvoir trouver acquéreur dans les différents marchés existants.

La présente communication expose les différentes techniques et phases d'élaboration permettant d'amener ce matériau à une forme et un état de surface déterminé.

L'auteur met également l'accent sur les tendances actuelles du marché des manufacturés produits par les usines automatisées. Il souligne les modifications profondes qu'a apportées dans le secteur marbrier, l'introduction des outils diamantés.

SAMENVATTING

Of ze bestemd zijn voor de oprichting van grootse werken, voor de integratie in de bouwkunst of voor een uitsluitend decoratieve aanwending, de uitgehaalde ornamentele gesteenten in blokvorm, moeten eerst bewerkt worden vooraleer ze afzet vinden op de verschillende bestaande markten.

Deze kennisgeving zet de verschillende technieken en bewerkingsfases uiteen waardoor dit materiaal tot een welbepaalde vorm en oppervlak gebracht kan worden.

De auteur legt eveneens de klemtoon op de huidige tendens van de markt van produkten vervaardigd door geautomatiseerde fabrieken. Hij onderlijnt de grondige wijzigingen in de marmersector door de inbreng van diamantgereedschap.

ZUSAMMENFASSUNG

Die in Form von Blöcken gewonnenen ornamentalen Steine müssen immer erst bearbeitet werden, bevor sie auf den verschiedenen vorhandenen Märkten einen Abnehmer finden können, unabhängig davon, ob sie für die Verwirklichung von monumentalen Werken, die Integration in die Architektur oder eine rein dekorative Verwendung bestimmt sind.

Der vorliegende Beitrag erläutert die verschiedenen Techniken und Bearbeitungsphasen, die gestatten, diesem Material eine bestimmte Form und einen bestimmten Oberflächenzustand zu geben.

SUMMARY

Ornamental stones - whether as a material for monuments, as an element in an architectural design or as a purely decorative material - are extracted in the form of blocks, and have to be finished before they are sold on the various markets open to them.

This article describes the different techniques of finishing - and the phases of such work - required to give the material the desired form and surface appearance.

* Professeur à l'Université de Parme, Via Val Ledro 4, I-25100 Brescia.

The author also highlights the current trends on the market for the finished products prepared in automated works. He stresses the far-reaching changes on the industry which have followed the introduction of diamond tools.

Der Autor unterstreicht ebenfalls die gegenwärtigen Tendenzen des Marktes der in den automatisierten Fabriken hergestellten Manufakturerzeugnisse. Er hebt die tiefen Veränderungen hervor, die die Einführung der diamantbesetzten Werkzeuge für den Marmorsektor gebracht hat.

1. *INTRODUCTION*

Le sciage des blocs de « pierres ornementales » a connu une modernisation évidente ces dernières années et ce, que les produits soient destinés à l'intégration dans des monuments ou dans des bâtiments.

Cette évolution est liée à la demande sans cesse croissante des architectes dont le goût pour l'emploi des marbres et des granits sous forme de produits élaborés s'est réellement affiné. Il faut dire que les recherches relatives aux techniques de coupe et de polissage, ainsi que la meilleure connaissance des gisements existants et la découverte de nouveaux gîtes marbriers, ont permis d'alimenter le marché en produits toujours meilleurs au niveau prix et qualité.

Ces matériaux naturels, jadis onéreux et difficiles à travailler, peuvent donc être intégrés économiquement dans les projets de construction et d'ornementation, et les possibilités de production de plaques minces ont allégé la tâche des architectes et des décorateurs qui, de plus, peuvent utiliser ces matériaux dans des domaines d'où ils étaient jadis exclus.

2. *CYCLES DE TRAVAIL*

On peut classer les différents cycles de travail couramment pratiqués dans l'industrie de la pierre ornementale de la manière suivante :

Classe A : travaux relatifs aux blocs de grandes dimensions destinés aux réalisations artistiques, à la construction de monuments en général, et à la fabrication de monuments funéraires en particulier, qui demandent la production de blocs d'épaisseur importante.

Classe B : travaux relatifs aux tranches de grandes dimensions mais d'épaisseur moyenne à petite (6 à 1,5 cm).
Ces produits constituent la majorité des éléments utilisés dans le domaine du bâtiment (carrelages, lambris intérieurs et extérieurs, tablettes d'appui, revêtements d'escaliers,...) et répondent aux exigences imposées par les « projets de détail ».

Classe C : travaux relatifs à la fabrication directe de produits de dimensions constantes (pour de grandes quantités s'entend) et ceci sans passer par le stade correspondant à la classe B, à savoir la production de produits semi-finis (tranches brutes de grandes dimensions).

2.1. *Elaboration des blocs de grandes dimensions* (classe A)

2.1.1. *Considérations préliminaires - Recherche des blocs*

Les opérations appartenant à la classe A confèrent au matériau une valeur ajoutée très importante, le poste de main-d'œuvre étant dans ce cas prépondérant. De plus, un long travail de préparation doit précéder l'exécution de l'œuvre proprement dite (réalisation de plans cotés à partir des ébauches, maquettes et dessins conçus par le sculpteur par exemple, où il faudra tenir compte du matériau proprement dit et plus particulièrement des effets chromatiques offerts par la pierre choisie).

Ces quelques considérations montrent qu'il faut tenir compte des possibilités réelles de production des carrières lors de la recherche de blocs et principalement lorsque les dimensions sont inhabituelles. Aux exigences concernant les effets chromatiques doivent s'ajouter celles relatives à la résistance mécanique : constance et isotropie du module d'élasticité, absence de microcassures ou d'autres niveaux de discontinuité rendant notamment le matériau gélif.

Pour les éléments dont la vocation est statique et principalement pour les éléments architecturaux de soutien (colonnes, architraves, trabéations, claveaux,...), un contrôle particulièrement soigné est exigé au niveau des blocs (les microfissures peuvent par exemple être mises en évidence par l'absorption différentielle d'eau ou de liquides spéciaux répandus sur la surface des blocs).

En ce qui concerne les granits, il faut soigneusement observer les traces éventuelles d'altérations (kaolinisation, chloritisation,...) généralement localisées le long des diaclases.

Les phénomènes d'altération ne sont d'ailleurs pas a priori absents dans les marbres d'origine sédimen-

taire ou métamorphique (présences de phénomènes karstiques). Il faut examiner attentivement les inclusions recimentées dans la structure d'origine et également les manifestations de microtectonique.

Nous pouvons résumer ces dernières considérations en disant que tous les phénomènes karstiques récents, ainsi que toutes les fractures et systèmes de fractures apparus lors d'une tectonique postérieure à la diagenèse de la roche, rendent les blocs impropres à l'utilisation. Enfin, rappelons que les marbres comme les granits peuvent contenir des inclusions de sulfures métalliques qui sont généralement l'objet d'une oxydation à l'intervention des agents atmosphériques, oxydation qui donne lieu à la formation d'espèces plus solubles. Les altérations peuvent également produire des effets chromatiques originaux à condition qu'elles se manifestent de manière suffisamment homogène. Elles donnent parfois à la pierre des nuances qui mettent en valeur l'ancienneté de l'œuvre et qui soulignent ses qualités architecturales. Le reflet blond du marbre utilisé par Phidias dans le Parthénon de l'Acropole d'Athènes n'est rien d'autre qu'une altération à effets chromatiques du marbre blanc. Un autre exemple, plus récent, est le marbre de Candoglia utilisé pour le revêtement du Dôme de Milan. Il s'agit d'un calcaire cristallin d'un rose très agréable, extrait d'un gisement situé à proximité du Lac Majeur (Novara-Italie) et qui contient de la galène, de la blende et surtout de la pyrite; la teneur totale en métal dépasse souvent 5 %. L'oxydation des sulfures en sulfates et l'hydratation postérieure de ceux-ci donnent au marbre une patine foncée non-uniforme qui lui confère un caractère ancien après quelques années seulement d'exposition à l'air.

2.1.2. *Première coupe des blocs*

Cette phase comprend la coupe des blocs bruts suivant des surfaces qui délimitent un solide circonscrit à l'objet final que l'on désire réaliser. Cette opération doit bien sûr se plier aux exigences en matière de chromatisme et de résistance mécanique et doit également réaliser une optimalisation par une réduction aussi poussée que possible de la quantité de rebut.

Pour effectuer cette première coupe, on dispose des méthodes et machines suivantes :

- Perforatrices réalisant des trous parallèles qui matérialisent un plan géométrique. Le bloc est ensuite fendu à l'aide de coins en acier à trois éléments (spigots) et éventuellement à l'aide d'outils de type « Darda ».
- Coupe au fil hélicoïdal entraînant une pulpe abrasive (à base de carborundum) avec un réglage tel que la chaînette renversée soit presque nulle. Dans ces conditions, la coupe sera bien droite. En cours de coupe, on évitera les interruptions ainsi que les reprises qui n'assurent pas une régularité suffisante de la surface de coupe.
- Coupe à l'outil diamanté monolame, méthode réservée aux marbriers et qui n'est donc pas utilisée actuellement pour les granits et roches assimilées.

Le choix de l'outil de coupe sera notamment le résultat d'une étude déterminant les différents coûts de production.

2.1.3. *Coupes auxiliaires*
(précédant le travail des tailleurs de pierres)

Certaines œuvres réalisées par des tailleurs de pierres ne peuvent être taillées entièrement à la main tant le volume de pierre à enlever est important. Dans ce cas, il est souhaitable de réaliser des coupes rectilignes, distantes de 2 à 3 cm, et ceci à l'aide d'une débiteuse à disque diamanté (machine à ébaucher-profiler dont l'axe de rotation peut pivoter de 90° au moins). Lorsqu'on veut réaliser un volume présentant des surfaces complexes (massifs avec courbes concaves et convexes, modénatures classiques,...), il est préférable de tracer sur les plans de base du massif les profils vrais indiquant la profondeur de coupe à réaliser et que l'on peut suivre en cours d'opération. Les profils guides sont généralement découpés dans des feuilles de plastique laminé présentant une certaine rigidité.

En exécutant ainsi des coupes auxiliaires d'allègement, on minimise le temps de travail spécifiquement manuel, travail d'autant plus pénible que la pierre à tailler est dure. Pour la préparation des massifs destinés au travail au tour (réalisation de colonnes, de chapiteaux, de frises circulaires,...), on effectue des coupes d'allègement afin d'obtenir des prismes droits à section polygonale, circonscrits à la forme finale qui sera obtenue au tour.

Le nombre de coupes préliminaires et auxiliaires résultera d'une étude globale qui tiendra compte des coûts de transport (généralement importants pour ce type de produit), de présentation et de fixation des massifs au banc de travail, de traçage des profils finals. Cette étude tiendra également compte de la faible utilisation des machines à profiler au point de vue de leur productivité.

2.1.4. *Travail au ciseau*

C'est la phase finale qui revêt généralement un caractère purement artisanal, qu'il s'agisse de la réalisation de la forme finale, de son état de surface (plâtrage, bouchardage, polissage, sablage,...), de la mise en place d'insertions, de frises métalliques ou en marbre,... Comme pour les coupes auxiliaires, le coût

des opérations correspond chaque fois à un cas d'espèce et il n'est pas possible d'établir des règles de travail. On peut cependant augmenter la productivité et réduire les coûts en utilisant les machines ou les méthodes suivantes :

- bancs de travail avec aspiration des poussières pour le travail au ciseau;
- outils pneumatiques ou électriques (ciseaux, perceuses, fraises, carotteuses,...);
- outils pour le plâtrage à froid ou à chaud;
- boucharde pneumatique ou électrique;
- disques abrasifs;
- disques d'application des produits de finition ou contenant les matériaux servant au polissage (oxyde d'étain, plomb métallique,...);
- tours pour la réalisation d'éléments à symétrie circulaire;
- appareillages mécaniques pour la réalisation d'écritures (pantographes);
- tours spéciaux pour la reproduction d'incisions et d'ornements complexes;
- fraise montée sur pantographe destinée à l'exécution d'éléments circulaires et incurvés;
- sableuses pneumatiques ou centrifuges.

Les figures 1, 2 et 3 montrent comment il convient d'effectuer les coupes primaires et secondaires préparant la réalisation d'éléments destinés à la construction d'une fontaine, œuvre du professeur Andrea Cascella.

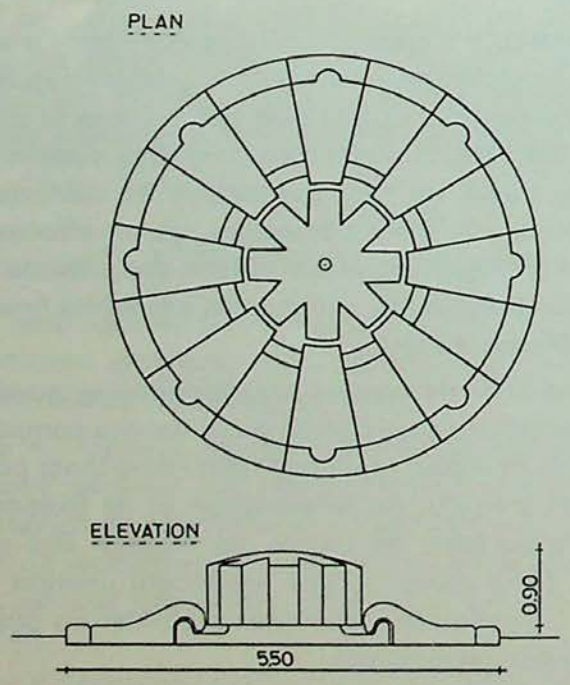


Fig. 1 : Vue d'ensemble d'une fontaine (sculpteur Andrea Cascella)

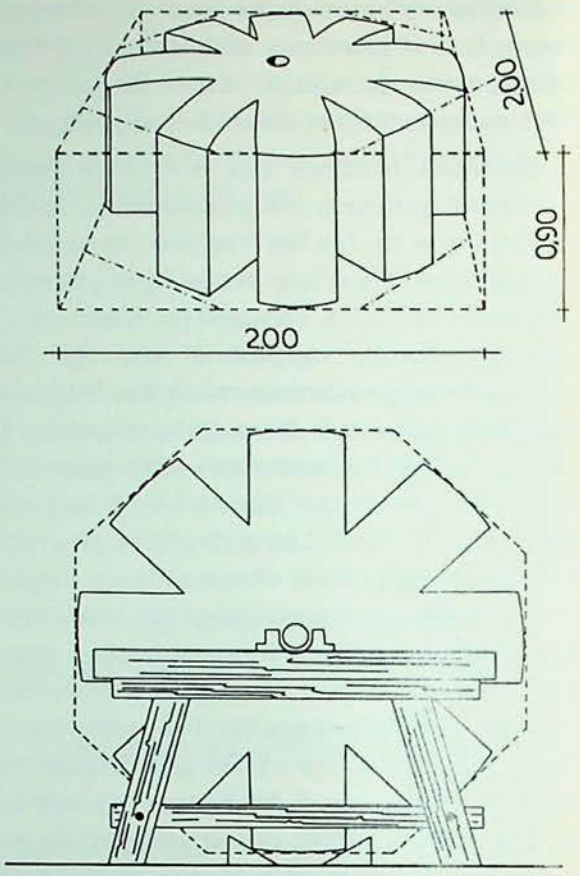


Fig. 2 : Réalisation d'une fontaine - schémas illustrant la succession des tailles auxiliaires (partie centrale)

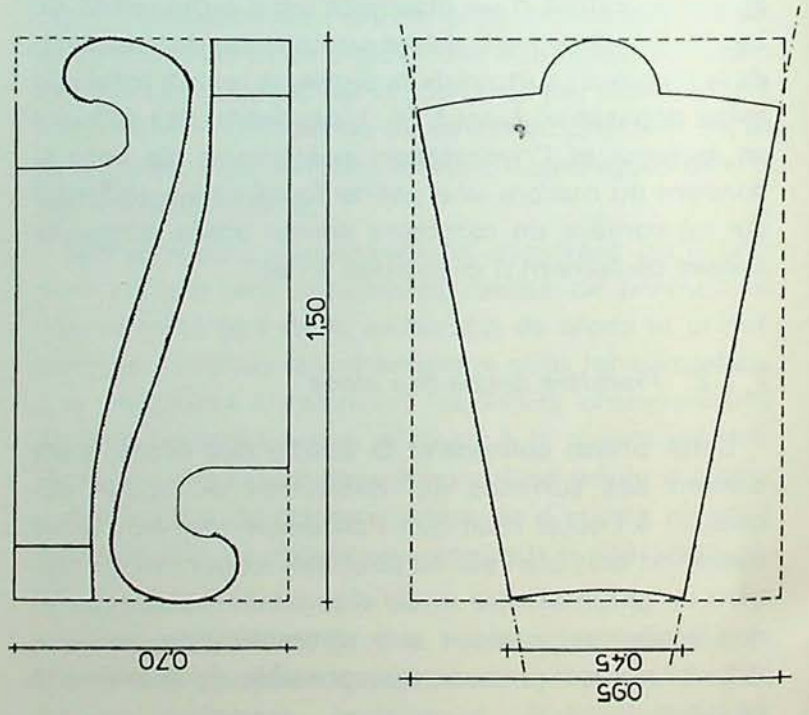


Fig. 3 : Réalisation d'une fontaine - schémas illustrant la succession des tailles auxiliaires (partie centrale)

2.2. *Elaboration des plaques sciées de grandes dimensions* (classe B)

2.2.1. *Généralités*

L'élaboration des plaques de marbre sciées de grandes dimensions représente traditionnellement une opération importante dans le cycle de transformation des blocs pour la production d'éléments destinés au domaine du bâtiment.

Ces vingt dernières années, la technique de sciage des blocs en plaques a subi une évolution et a été l'objet d'améliorations qui quelquefois ont atteint des niveaux considérables. L'introduction des outils diamantés, qu'ils soient utilisés pour la coupe alter-

native en scierie ou pour la coupe circulaire continue, est un des aspects les plus importants de cette évolution.

C'est en 1947 que les premières concrétions diamantées synthétiques furent fabriquées; ces dernières n'étaient d'ailleurs pas destinées du tout aux outils de sciage du marbre, mais à la réalisation de couronnes pour l'exécution de sondages en roches dures.

Les diamants utilisés pour les premières couronnes diamantées avaient une granulométrie correspondant à 0,1 carat environ. La fixation des grains dans les matrices métalliques était obtenue par frittage d'un liant constitué lui-même d'un alliage métallique spécial, adouci par l'addition de bronze. Le frittage était réalisé dans un four électrique dans une atmosphère d'azote. Ces concrétions, appelées « Diamit », étaient utilisées sur des couronnes devant attaquer des roches particulièrement dures et abrasives. Les concrétions du type « Diaborit » sont ensuite apparues sur le marché; les grains de diamant utilisés pour celles-ci étaient plus petits (0,03 carat environ) et coûtaient dès lors moins cher (pour le même nombre de carats contenus).

La première scie circulaire à disque diamanté destinée à la coupe du marbre fut réalisée à la fin des années '50 par une fabrique belge d'outils diamantés. Les concrétions présentes sur ces disques étaient constituées de diamants de 0,01 carat environ et d'un liant dont les caractéristiques étaient réglées en fonction du marbre à couper.

L'introduction de ce type d'outil dans l'industrie marbrière eut un impact technico-commercial immédiat. Elle amorça une réaction en chaîne qui eut pour effet d'améliorer et quelquefois de transformer complètement les machines utilisées auparavant.

L'utilisation de concrétions diamantées pour les scies alternatives n'apparut que dix ans plus tard, et ce fut également la source de modifications radicales aussi bien en ce qui concerne la cinématique des lames que pour le dimensionnement des organes moteurs, les systèmes de contrôle de la puissance absorbée par les machines, les systèmes de lubrification,... Rappelons que l'utilisation de lames diamantées ne s'applique aujourd'hui qu'aux marbres, les granits et roches assimilées étant pour le moment exclus.

Dans les paragraphes suivants, les progrès réalisés dans le domaine du sciage des blocs, du polissage des plaques seront exposés de manière plus précise. Il sera longuement question de l'utilisation de châssis à mélanges abrasifs pour le sciage des blocs, des solutions apportées au problème du sciage des marbres dont la qualité ne permet pas l'utilisation économique des lames diamantées, des problèmes posés par les roches dures (granits et roches assimilées).

2.2.2. *Caractéristiques dimensionnelles des blocs - Aptitude au sciage*

Dans le commerce, la valeur d'un bloc brut est calculée de la manière suivante :

$$V = L \times h \times \frac{s}{0{,}025} \times C - (S + T) \qquad (1)$$

expression dans laquelle :

- L = mesure réelle de la longueur du bloc en mètres
- h = mesure réelle de la hauteur du bloc en mètres
- s = mesure réelle de la largeur du bloc en mètres
- C = cours des plaques
- S = coût du sciage (outils,...)
- T = coût du transport de la carrière ou du dépôt jusqu'à la scierie.

La présence du facteur 1/0,025, c'est-à-dire 40, provient du fait qu'un bloc d'un mètre de largeur peut donner après sciage 40 plaques de 2 cm d'épaisseur.

Les coûts de transport et de sciage sont rapportés aux mesures géométriques réelles qui représentent le paramètre dimensionnel effectif à utiliser dans l'estimation des frais de transformation, comme nous le verrons par la suite. Dans le commerce des pierres d'ornementation, on utilise généralement les mesures dites « commerciales » :

L_c = longueur commerciale = $\eta_l \times L$
h_c = hauteur commerciale = $\eta_h \times h$
s_c = largeur ou épaisseur commerciale = $\eta_s \times s$

où η_l, η_h et η_s représentent les coefficients de réduction des mesures, lesquels font l'objet d'un arrangement entre contractants et ceci pour chaque affaire conclue.

On peut alors exprimer la valeur d'un bloc par la formule suivante :

$$V = 40 \times L_c \times h_c \times s_c \times C - (S + T).$$

Si nous posons $\eta = \eta_l \times \eta_h \times \eta_s$ (*) et divisons les deux membres de cette relation par le volume réel L x h x s, nous pouvons dire que la valeur unitaire d'un bloc (valeur par unité de volume) est donnée par l'expression (2)

$$V = 40\,\eta\,C - (S + T) \qquad (2)$$

(*) η est appelé coefficient volumétrique de mesure commerciale. La mesure de la longueur, de la largeur et de la hauteur a conventionnellement une signification commerciale bien définie qui dépasse la mesure géométrique. En effet, la mesure de la longueur L et de la hauteur h se rapporte à la section correspondant au plan de sciage (future face des plaques). Le plan de sciage doit tenir compte de la structure de la pierre : orientation par rapport à la stratification pour les roches sédimentaires, par rapport à d'éventuelles directions d'iso-orientation de veines chromatiques ou des minéraux caractéristiques dans les roches éruptives et métamorphiques.

De l'expression (2), nous pouvons conclure que la valeur unitaire d'un bloc est nulle si :

$$\eta = \frac{S + T}{40.C} \qquad (3)$$

On peut donc dire que, lorsque le coefficient volumétrique de mesure commerciale (rapport entre volume commercial et volume géométrique) est égal au rapport entre les coûts de sciage - transport et la valeur marchande de 40 m² de plaque, la valeur du bloc est nulle.

Dérivons l'expression (2) par rapport à η, il vient :

$$\frac{\partial V}{\partial \eta} = 40\,C = \mathrm{tg}\alpha$$

expression qui donne le coefficient angulaire de la droite représentant l'expression (2) dans un système d'axes V, η. Les différentes droites données à la figure 4 correspondent à différents cours C.

Les coefficients linéaires de réduction commerciale η_l, η_b, η_s se rapportent au niveau de finissage des surfaces obtenues après sciage, mais doivent également tenir compte de la présence éventuelle de défauts (diaclases, fractures, taches non admises à la surface de la plaque sciée, traces de perforations réalisées lors de la découpe des blocs en carrière,...). La détermination de ces coefficients demande donc une estimation de l'état de surface des plaques au départ de la partie visible du bloc.

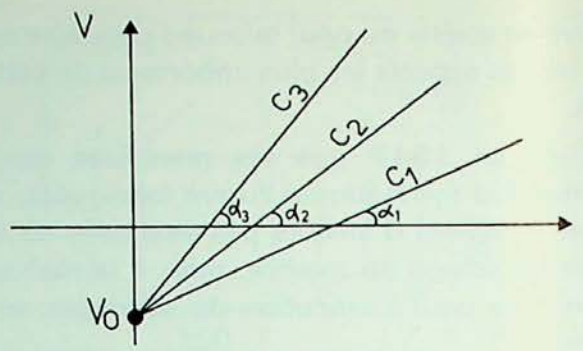


Fig. 4 : Valeur unitaire d'un bloc en fonction du coefficient volumétrique de mesure commerciale pour différents cours de plaques

$$V_o = \frac{C_3\ C_2\ C_1}{} (S + T)$$

Les coefficients linéaires généralement adoptés sont les suivants :

Mode d'équarrissage	*Réduction en cm*	
Faces équarries au fil hélicoïdal ou au châssis monolame	3	
Faces équarries par une taille manuelle (à l'aide de lacets et de pannes)	3 à 4	mode d'équarrissage tombé en désuétude dans le pays à cause du prix de la main-d'œuvre
Faces équarries par la perforation soignée de trous parallèles (éventuellement complétée par une taille manuelle)	4 à 6	
Faces obtenues par la technique de la fente (régulière)	6 à 10	En ce cas, on contracte souvent le prix par unité de poids
Faces obtenues par la technique de la fente (irrégulière)	10	

S'il existe des défauts susceptibles d'altérer l'uniformité chromatique des plaques, la pratique commerciale impose un « rabais ». Ce dernier se traduit par une réduction des mesures linéaires.

Il faut noter que, suivant la dimension sur laquelle on fait porter le rabais, les coefficients de réduction résultants sont tout à fait différents et ceci, parce que les trois dimensions d'un bloc ont généralement des mesures bien différentes. Cette dernière remarque a des conséquences que tout contractant, même peu expérimenté, connaît bien. Prenons l'exemple d'un bloc de longueur réelle L, de hauteur réelle 1/3 L et d'épaisseur réelle 1/2 L. Le volume réel de ce bloc vaut donc 1/6 L^3. La variation de volume commercial obtenue par un rabais sur l'épaisseur, la hauteur et la longueur, vaut respectivement :

$$\Delta V = \frac{L^2}{3}\Delta s;$$

$$\Delta V = \frac{L^2}{2}\Delta h;$$

$$\Delta V = \frac{L^2}{6}\Delta l^2$$

Cela signifie que, pour un bloc considéré, une même variation unitaire a une incidence :

$\frac{L^2}{2}$ —quand le rabais est accordé sur la hauteur

$\frac{L^2}{3}$ —quand le rabais est accordé sur l'épaisseur

$\frac{L^2}{6}$ —quand le rabais est accordé sur la longueur

De toute façon, nous pouvons dire que généralement le rabais sur la longueur affecte moins le volume qu'un rabais sur l'épaisseur ou sur la hauteur.

En ce qui concerne la valeur unitaire des blocs, on peut également dire que deux blocs ont une valeur unitaire identique quand leurs cours de plaques respectifs sont dans un rapport

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\eta_1}{\eta_2} \qquad (4)$$

expression obtenue en retenant les expressions simplifiées donnant les valeurs unitaires : $V_1 = \eta_1 C_1 - S$ et $V_2 = \eta_2 C_2 - S$ et en posant $V_1 = V_2$.

La relation liant les cours aux coefficients de réduction de 2 blocs est illustrée à la figure 5.

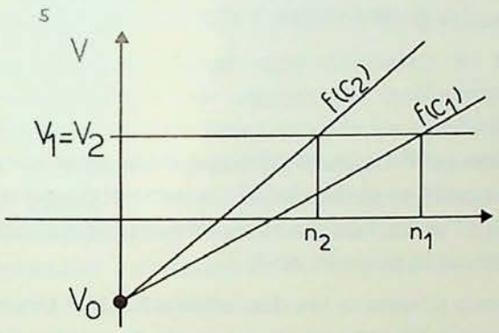


Fig. 5 : Illustration graphique de la relation (4)

L'étude du programme de sciage doit être étroitement liée au programme de production et de commercialisation des plaques; le découpage d'un bloc en deux ou trois pièces est parfois souhaitable lorsque des variations de qualité sont observées. Le programme de sciage a donc une incidence certaine sur le cours des plaques.

A ce sujet, indiquons que, avant le sciage proprement dit, il est nécessaire de faire des coupes pour les deux raisons suivantes :

- ajustement des mesures du bloc pour améliorer le coefficient de remplissage du châssis (ce point précis sera explicité dans les paragraphes suivants);
- découpage en plusieurs pièces d'un bloc présentant des variations de qualité (couleur, compacité, aptitude au polissage,...); les blocs ainsi obtenus pourront donner lieu à la production de plaques de cours différents.

A chaque fois, il faudra déterminer si cette dernière opération est indiquée et pour cela il faudra tenir compte de la valeur d'origine du bloc et de la somme des valeurs des blocs obtenus après découpage préliminaire, ainsi que des frais de sciage. La découpe sera réalisée généralement dans des installations fixes de chantier du type châssis diamanté monolame, fil hélicoïdal à pulpe abrasive ou fil diamanté.

2.2.3. *Sciage à l'aide de pulpes abrasives*

La scie à châssis est la machine la plus fréquemment utilisée dans la transformation des blocs en plaques de grandes dimensions. Cette machine est constituée des éléments suivants :

a) un ensemble de lames en acier parallèles et portées par un cadre suspendu et soumises à une traction très intense par des tendeurs mécaniques ou hydrauliques;
b) une structure métallique de soutien du châssis porte-lames par l'intermédiaire de bras oscillants;
c) des organes mécaniques réglant le déplacement vertical des bras oscillants de manière telle que la coplanarité du porte-lames ne soit pas affectée pendant son mouvement oscillatoire et sa descente progressive;
d) un système bielle-manivelle et un organe de transmission mécanique imposant un mouvement alternatif au cadre porte-lames et donc à celles-ci;
e) une installation assurant la circulation du mélange abrasif à partir du puisard situé sous le châssis jusqu'à un dispositif spécial d'arrosage qui répand la pulpe sous forme dispersée sur la partie supérieure du bloc;
f) un dispositif de contrôle de la pulpe assurant l'élimination des grains abrasifs les plus fins et une alimentation en éléments frais;
g) un dispositif éventuel d'alimentation en éléments additifs très abrasifs (carborundum, quartz moulu, silicates) et d'additifs chimiques anti-oxydants (oxyde de calcium en poudre, solution diluée d'hydrate de calcium).

2.2.3.1. *Cinématique de la lame*

Le sciage est obtenu par une démolition de structure par micro-trituration d'une mince couche verticale de pierre au fur et à mesure que le cadre porte-lames descend dans le châssis. L'épaisseur de cette entaille est légèrement supérieure à celle de la lame (4 à 6 mm).

Cette démolition résulte de l'action de la pulpe sur la pierre. La pulpe est entraînée et appliquée sur le matériau par la face inférieure de la lame (fig. 6).

La force P appliquée par la lame sur la pierre est obtenue par un déplacement constant. Elle donne naissance à un travail de friction

$$T = f \cdot P \cdot s \qquad (5)$$

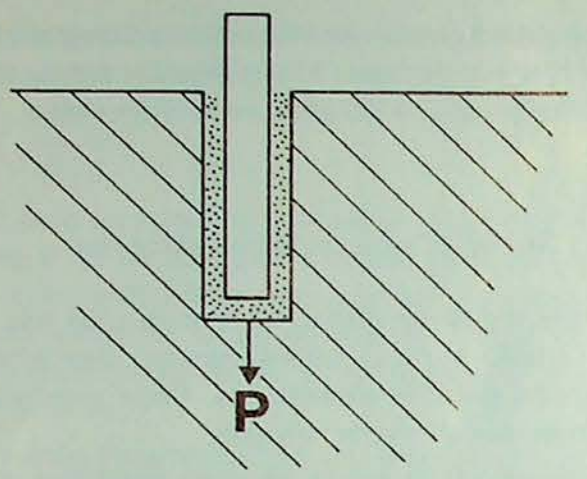


Fig. 6 : Action de la lame sur le matériau en cours de sciage (coupe)

où f = coefficient de frottement de la pulpe abrasive sur le matériau et s = déplacement de la lame.

La puissance de friction vaut donc

$$W = f \cdot P \cdot v \qquad (6)$$

où v représente la vitesse de la lame.

Le régime est atteint si la vitesse de descente du cadre correspond exactement à la vitesse de trituration de la pierre.

Si le cadre descend trop rapidement, la valeur de P augmente anormalement et il s'ensuit :

- une rupture du film de pulpe abrasive entre la lame et la pierre;
- un contact direct lame-pierre et une usure rapide de l'acier de la lame;
- une déviation de la lame du plan vertical et la formation de plaques tordues;
- une consommation énergétique anormale de la machine.

Il faut de toute façon remarquer que, dans un châssis, la trajectoire des lames n'est pas linéaire; le contact lame-pierre n'est ni continu ni constant, principalement en ce qui concerne la pression spécifique imposée au bloc par l'accouplement prismatique.

Il faut remarquer que la valeur de s dans l'expression (5) ne correspond pas au déplacement effectif du cadre porte-lame projeté dans un plan horizontal, cette grandeur représente la longueur de la trajectoire le long de laquelle la lame et le bloc ont un contact réel produisant un frottement. Cette longueur est déterminée par la cinématique de la lame et, par conséquent, par la géométrie des organes mécaniques. La valeur de s est donc une caractéristique du châssis et même un paramètre caractéristique de productivité réelle de la machine avec le nombre de tours par unité de temps (encore appelé « nombre de coups » par les marbriers) du système bielle-manivelle.

Aucune étude systématique n'a encore été menée afin d'optimaliser la valeur de s. En 1979, certains constructeurs dont Giorgini e Maggi se sont livrés à de nombreuses expériences, mais leurs dispositifs expérimentaux et les résultats obtenus n'ont jamais été diffusés.

La cinématique généralement utilisée dans les châssis actuels peut être présentée par le schéma de la figure 7. Les flasques oscillants en position de repos déterminent deux plans convergents symétriques. Ils forment avec le cadre porte-lames un angle dièdre caractéristique de la machine.

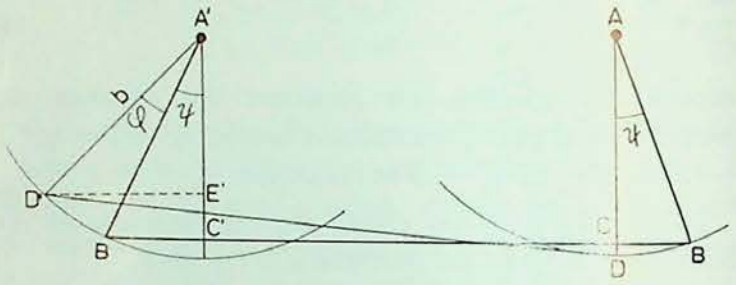


Fig. 7 : Cinématique du châssis porte-lames

Lorsqu'un flasque se déplace de la position de repos à la position verticale (déplacement du point D sur la fig. 7), l'autre flasque subit une rotation d'un angle φ (amenant le point B' en D').

Si nous projetons les déplacements sur la verticale et que nous désignons par ψ l'angle caractéristique de repos, nous pouvons écrire les relations suivantes :

$$(BD)_{vert} = AD - AC = b - b \cos \psi = b (1 - \cos \psi)$$

$$(B'D')_{vert} = A'C' - A'E'$$
$$= b \cos \psi - b \cos (\psi + \varphi)$$
$$= b [\cos \psi - \cos (\psi + \varphi)]$$

Le cadre porte-lames monte et descend sous l'action du mouvement alternatif imposé par la bielle.

Le cycle est réalisé de manière symétrique, mais l'angle de rotation des flasques dépend bien sûr de l'inclinaison moyenne de la bielle par rapport à l'horizontale (fig. 8), c'est-à-dire de la position du cadre porte-lames par rapport à l'axe de rotation de la manivelle. La figure 8 montre que la course s du cadre porte-lames est réduite lorsque la position moyenne de la bielle forme un angle α avec l'horizontale, le taux de réduction valant approximativement cos α.

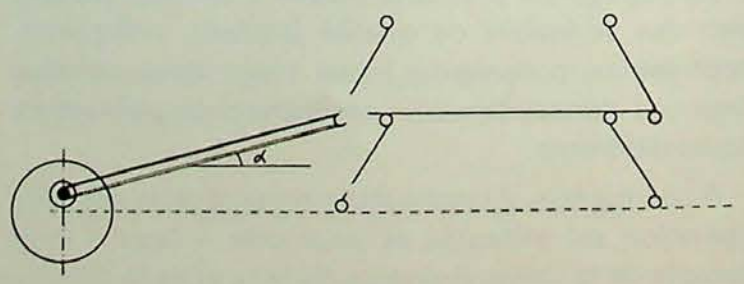


Fig. 8 : Déplacement vertical du châssis porte-lames et incidence sur sa course

Cette dernière observation justifie la nécessité de disposer d'une bielle à longueur variable ou de dispositifs similaires (châssis à bielle courte, attaches des flasques à structure courbe,...)

Le mouvement oscillant du cadre porte-lames (voir Consiglio - Le Marbre [3]) a une fonction d'éloignement de la pulpe usée par l'abrasion contenant des fines de l'élément abrasif, ainsi que des débris de la pierre. Ce phénomène d'évacuation, qui est réalisé par effet dynamique, peut être compris aisément; il nécessite la présence de protections métalliques spéciales.

L'oscillation du cadre porte-lames (et donc des lames) semble également accomplir une fonction hydrodynamique beaucoup plus importante : la pulpe abrasive se trouvant entre le bord inférieur des lames et la pierre est entraînée par adhésion sur la lame. Du fait que la section ménagée entre ces surfaces varie au cours d'une oscillation, la vitesse d'évacuation de la pulpe subit des variations qui créent une pression dynamique au sein même de la suspension.

Cette pression dynamique donnerait au film de pulpe abrasive une résistance suffisante pour empêcher le contact direct entre le bord inférieur des lames et la pierre et, par conséquent, l'usure rapide de ces dernières. Il faut donc souligner l'importance des caractéristiques hydrodynamiques de la pulpe et en particulier l'importance du nombre de Reynolds qui joue un rôle capital.

2.2.3.2. *La pulpe abrasive*

Il est nécessaire d'approfondir l'étude de la pulpe abrasive, notamment pour pouvoir préciser la valeur du coefficient de frottement f figurant dans la relation (5).

Le circuit suivi par la pulpe est schématisé à la figure 9.

Ce circuit comporte trois unités :

- Un puisard, situé sous le sol, où tombe la pulpe qui a servi au sciage et où arrivent également une suspension fraîche d'abrasif, ainsi que la pulpe provenant de l'unité de séparation granulométrique.
- Un dispositif d'arrosage des blocs alimenté par une pompe semi-fixe immergée dans le puisard.
- Une unité de classification granulométrique où la pulpe est débarrassée de ses éléments les plus fins. Ce traitement est généralement réalisé en discontinu et l'élimination des éléments indésirables est compensée par l'addition d'abrasif frais dans le circuit.

Les abrasifs couramment utilisés pour le sciage des blocs sont les suivants :

1) pulpe constituée par une suspension de sable (quartz) provenant de préférence d'un dépôt sédimentaire récent;
2) pulpe décrite au n° 1 avec ajout de quartz broyé ou de carborundum;
3) pulpe constituée de fonte fragmentée sous forme de micro-éclats;
4) pulpe constituée de microbilles de fonte;
5) pulpe constituée de grains d'acier.

Pour le sciage du marbre et des pierres ne présentant pas une dureté trop élevée, l'emploi de châssis à lames diamantées remplace de plus en plus l'utilisation des pulpes abrasives. Cependant, dans certains cas particuliers, le sciage à l'aide de pulpes abrasives reste la seule méthode valable.

C'est le cas des marbres présentant des inclusions siliceuses (calcédoine) et de certaines roches ophiolitiques (vert des Alpes, rouge Levanto,...).

Dans ces cas, l'utilisation de pulpes contenant du quartz moulu ou du carborundum s'impose.

L'utilisation des châssis à suspensions abrasives est également conseillée lorsque l'épaisseur des plaques à produire varie régulièrement. Dans ce cas, le réglage de l'écartement des outils diamantés représenterait un temps mort inadmissible pour la productivité de ce type de matériel. De même, lorsque les blocs présentent des défauts non parallèles à la direction de sciage (des fissurations par exemple), la vitesse de coupe ainsi que la pression exercée par les lames, toutes deux particulièrement élevées dans le cas des outils diamantés, peuvent occasionner des

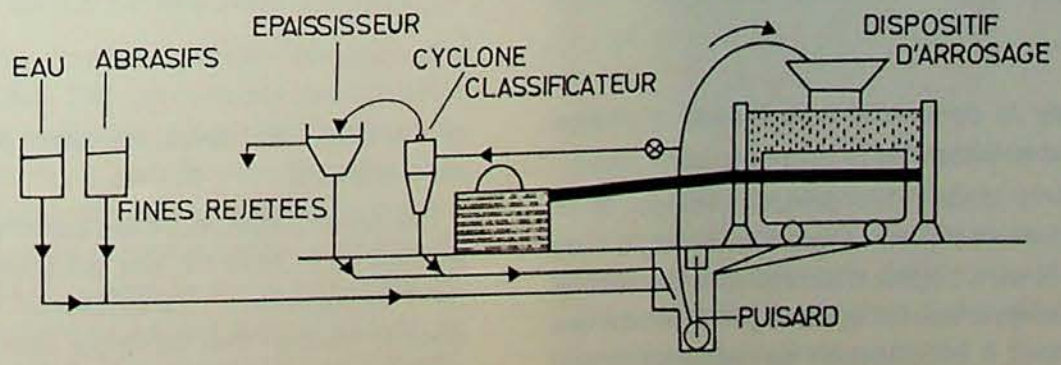


Fig. 9 : Circuit de la pulpe abrasive

dégâts graves. Ici encore, l'utilisation de châssis à pulpe abrasive sera préférable.

Dans tous les cas, la pulpe doit faire l'objet d'une surveillance stricte afin de maintenir ses caractéristiques (nombre de Reynolds, granulométrie des solides contenus,...).

Il n'est sans doute pas inutile de signaler que la composition de la charge abrasive dépend non seulement de la nature de la pierre à scier, mais également du type de châssis utilisé.

D'importantes études expérimentales sont menées aujourd'hui visant la mise au point d'outils diamantés adaptés aux roches dures (granits et roches éruptives assimilées), mais elles n'empêchent pas de réaliser des progrès importants dans la technique du sciage traditionnel, seule méthode adaptée et utilisée actuellement pour le sciage de matériaux durs de grandes dimensions.

Dans les paragraphes suivants, nous allons décrire différentes méthodes d'analyse et de contrôle des propriétés abrasives de la charge afin de maintenir le châssis au point de fonctionnement jugé optimal par le « scieur » expérimenté.

Pour illustrer ce point, nous prendrons l'exemple d'une scierie de granit dans la province de Brescia. Six châssis de facture italienne de 3 m sur 3,20 m y sont utilisés pour la production de plaques sciées à façon.

Pour maintenir un niveau de qualité élevé, celles-ci doivent :

- présenter deux surfaces parfaitement parallèles;
- être d'une épaisseur rigoureusement constante;
- présenter une rugosité minimale (absence d'éléments grossiers dans la charge abrasive);
- être privées de cassures résultant du fonctionnement du châssis en présence de « dents » (selon la terminologie des marbriers) lorsqu'on omet de changer la longueur de la bielle.

Les paramètres étudiés sont les suivants :

a) *Contrôle de la charge de circulation : échantillons A*

Cinq échantillons de pulpe ont été examinés. Ils ont été prélevés pendant 10 minutes toutes les 2 heures sur le même châssis juste après le traitement opéré par le classificateur granulométrique. Le tableau I donne les résultats des mesures de caractéristiques effectuées sur chacun des 5 échantillons.

TABLEAU I. — Echantillons A :
Charge abrasive après l'intervention du classificateur

Caractéristiques mesurées		Echantillons A1		Echantillons A2		Echantillons A3		Echantillons A4		Echantillons A5		Moy. arith.	Ecart quadr. moy.
Poids par unité de volume (g/litre)		1.940		1.975		1.930		1.925		1.945		1943	±1,39 %
Teneur en solide (g/litre)		1.262		1.310		1.198		1.230		1.200		1.240	±7,01 %
Distribution granulométrique													
Mesh	μ	%	% CUM.	%	% CUM.	%	% CUM.	%	% CUM.	%	% CUM.	%	
+65	208	27,28	99,92	28,10	99,97	26,40	99,99	29,65	99,96	28,05	99,98	27,89	
100÷65	208÷140	5,84	72,64	5,03	71,87	6,43	73,59	5,50	70,31	7,10	71,93	5,98	
200÷100	140÷75	11,40	66,80	11,10	66,84	10,52	67,16	9,61	64,81	8,32	64,83	10,19	
325÷200	75÷42	5,44	55,48	5,72	55,74	5,63	56,64	5,40	55,20	−4,50	56,51	5,40	
−325	42	50,04	50,04	50,02	50,02	51,01	51,01	49,80	49,80	52,01	52,01	50,57	

b) *Contrôle de la continuité abrasive de la charge circulante : échantillons B*

Le tableau II donne les caractéristiques de 5 échantillons prélevés juste avant l'intervention du classificateur et sans apport d'abrasif frais (en réalité, ils ont été prélevés 2 heures après le prélèvement des échantillons dont il est question au paragraphe précédent). Le mode de prélèvement est le même.

c) *Contrôle des fines sortant du classificateur : échantillons C*

Ces échantillons, dont les caractéristiques sont indiquées au tableau III, ont été prélevés à la surverse de l'hydrocyclone classificateur. Ils représentent donc la fraction fine de faible densité séparée de la pulpe.

TABLEAU II. — Echantillons B :
Charge abrasive avant l'intervention du classificateur

Caractéristiques mesurées		Echantillons B1		Echantillons B2		Echantillons B3		Echantillons B4		Echantillons B5		Moy. arith.	Ecart quadr. moy.
Poids par unité de volume (g/litre)		1.660		1.665		1.675		1.640		1.651		1.658	±0,21 %
Teneur en solide (g/litre)		976		970		968		980		985		975	±0,34 %
Distribution granulométrique													
Mesh	μ	%	% CUM.	%	% CUM.	%	% CUM.	%	% CUM.	%	% CUM.		
+65	208	7,68	100,00	7,45	99,95	7,30	99,83	6,85	100,10	8,05	99,85		
100÷65	208÷140	2,64	92,32	2,50	92,50	2,40	92,53	2,90	93,25	2,30	91,80		
200÷100	140÷75	8,48	89,68	8,20	90,00	8,28	90,13	8,80	90,35	8,50	89,50		
325÷200	75÷42	9,88	81,20	9,70	81,80	8,80	81,85	9,75	81,55	9,00	81,00		
−325	42	71,32	71,32	72,10	72,10	73,05	73,05	71,80	71,80	72,00	72,00		

TABLEAU III. — Echantillons C : *Fines sortant du classificateur*

Caractéristiques mesurées		Echantillons C1		Echantillons C2		Echantillons C3		Echantillons C4		Echantillons C5		Moy. arith.	Ecart quadr. moy.
Poids par unité de volume (g/litre)		1.560		1.540		1.550		1.580		1.575		1.561	±0,47 %
Teneur en solide (g/litre)		840		835		820		815		855		833	±0,8 %
Distribution granulométrique													
Mesh	μ	%	% CUM.	%	% CUM.	%	% CUM.	%	% CUM.	%	% CUM.	%	
+65	208	0,40	99,80	1,15	100,00	2,47	99,92	1,10	100,02	1,60	99,95	1,34	
100÷65	208÷140	4,25	99,40	4,20	97,85	3,15	97,45	3,10	98,92	4,15	98,35	3,82	
200÷100	140÷75	13,52	94,88	12,50	93,65	11,80	94,30	13,60	95,82	14,20	94,20	13,12	
325÷200	75÷42	9,12	81,36	8,05	82,15	9,30	82,50	10,12	82,22	11,10	83,00	9,53	
−325	42	72,44	72,44	74,10	74,10	73,20	73,20	72,10	72,10	71,90	71,90	72,74	

Comparaison des échantillons : Les différentes tranches granulométriques des trois séries d'échantillons ont été examinées au microscope. Les microphotos des figures 10 à 24 montrent l'identité de forme des solides appartenant à une même tranche granulométrique et ce, pour les 3 familles d'échantillons. Cette observation semble prouver que les trois séries d'échantillons présentent une identité de forme en ce qui concerne les solides contenus.

En comparant les courbes granulométriques des échantillons A et B (fig. 25), on constate que la courbe relative à la charge après traitement (échantillons A) peut être divisée en trois parties : un segment convexe entre 0 et 80 microns, une partie linéaire entre 80 et 170 microns et un segment concave au-delà de 170 microns. Après 2 heures de fonctionnement du châssis (sans traitement ni apport d'abrasif frais), la courbe granulométrique de la charge (échantillons B) présente également une partie convexe entre 0 et 80 microns, mais le pourcentage de matière contenue dans cet intervalle est nettement plus important et les grains de dimensions supérieures à 80 microns représentent moins de 10 % de la charge. La comparaison des deux courbes permet donc de se rendre compte du broyage réalisé par les lames de la scie. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que les diverses tranches granulométriques contiennent à la fois les grains d'abrasifs et les débris de pierres produits.

Ce type de contrôle permet de :

- caractériser de façon quantitative la pulpe, surtout en ce qui concerne son évolution au cours du sciage, et de voir ainsi si elle est adaptée au modèle de châssis utilisé et à la pierre qui doit être sciée;
- dimensionner les éléments de l'unité de traitement (dimensions du cyclone, pression d'injection, etc...), ainsi que la durée de ces traitements.

Fig. 10
Echantillon A (+ 65 mesh)

Fig. 11
Echantillon A (— 65 + 100 mesh)

Fig. 12
Echantillon A (— 100 + 200 mesh)

Fig. 13
Echantillon A (— 200 + 325 mesh)

Fig. 14
Echantillon A (— 325 mesh)

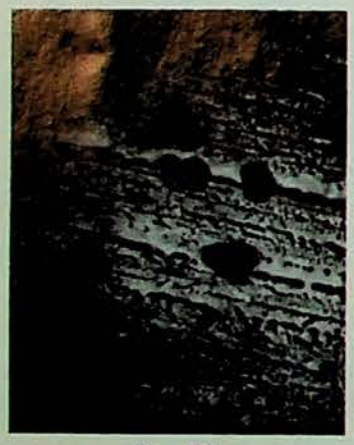


Fig. 15
Echantillon B (+ 65 mesh)

Fig. 16
Echantillon B (— 65 + 100 mesh)

Fig. 17
Echantillon B (— 100 + 200 mesh)

Fig. 18
Echantillon B (— 200 + 325 mesh)

Fig. 19
Echantillon B (— 325 mesh)

Fig. 20
Echantillon C (+ 65 mesh)

Fig. 21
Echantillon C (— 65 + 100 mesh)

Fig. 22
Echantillon C (— 100 + 200 mesh)

Fig. 23
Echantillon C (— 200 + 325 mesh)

Fig. 24
Echantillon C (— 325 mesh)

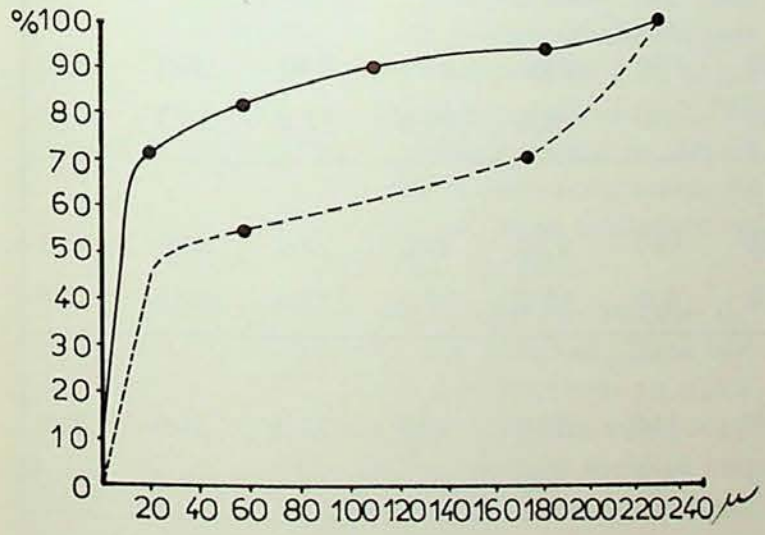


Fig. 25 : Courbes de distribution granulométrique
Echantillon A ----------
Echantillon B ———

Il faut cependant avouer que la courbe granulométrique d'une pulpe ne permet pas de caractériser la capacité d'abrasion. Pour mieux caractériser la pulpe de ce point de vue, il faut :

- Déterminer à l'aide d'un tribomètre la capacité d'abrasion réelle de chaque échantillon (tranche) représentatif de la charge circulante.

- Déterminer le pourcentage d'éléments abrasifs dans chaque tranche granulométrique. On dose le fer, par exemple, quand l'élément abrasif est constitué de fonte ou d'acier (la quantité de fer provenant de l'usure des lames étant négligeable).

La relation que l'on peut ainsi établir entre l'abrasivité et la teneur en élément abrasif permet également d'évaluer la diminution de la capacité abrasive provoquée par la réduction pondérale d'une tranche granulométrique. On aura ainsi les renseignements souhaités pour déterminer la coupure à réaliser par l'hydrocyclone et l'importance de la régénération (apport d'abrasif frais).

S'il est important de contrôler la pulpe, il est tout aussi important que la méthode de contrôle soit pratique et utilisable facilement sans quoi elle risque d'être mal appliquée, voire pas du tout.

Avant d'exposer une méthode de contrôle plus pratique, il n'est sans doute pas inutile de rappeler qu'une courbe granulométrique peut être caractérisée (du moins dans sa partie médiane) par le coefficient de sélection et la médiane. Le coefficient de sélection est le rapport des troisième et premier quartiles (c'est-à-dire le rapport des abscisses correspondant aux ordonnées 75 et 25 % de la courbe granulométrique). La médiane est quant à elle le

deuxième quartile (50 % de la distribution granulométrique); elle fournit une indication de la taille moyenne.

Etant donné que la vitesse de sédimentation est une caractéristique de la suspension abrasive que l'on peut quantifier aisément en mesurant la hauteur de la zone claire se développant dans la partie supérieure de la suspension au repos après un temps de sédimentation donné, il convient de corréler ces différentes grandeurs comme dans l'exemple qui suit et qui s'applique aux trois séries d'échantillons présentées précédemment.

Echantillons A

Coefficient de sélection = 190 μ / 12 μ = 15,83
Médiane = 25 μ

Echantillons B

Coefficient de sélection = 30 μ / 4 μ = 7,5
Médiane = 10 μ

Echantillons C

Coefficient de sélection = 25 μ / 4 μ = 6,25
Médiane = 8 μ

La mesure de la hauteur de clair peut donc donner une idée de l'abrasivité d'une pulpe fonctionnant sur un châssis et ce, à l'aide de diagrammes établis par l'expérience précédemment décrite. Ces diagrammes ne sont bien sûr valables que pour une pulpe et un châssis déterminé.

Pour les ouvriers débutants, cette méthode de contrôle est précieuse mais, une fois qu'ils auront acquis un peu d'expérience, ils pourront juger de l'état de la pulpe au bruit produit par la friction des lames pénétrant dans le bloc.

2.2.4. *Sciage à l'aide de lames diamantées*

Comme il a déjà été dit dans les paragraphes introductifs de cette communication, les méthodes de production et d'organisation ont subi d'importantes modifications suite à l'introduction dans les marbreries des machines à châssis multilames diamantées.

Les productivités s'en sont trouvées approximativement décuplées et, pour une production totale égale, un tel accroissement permit de réduire considérablement les investissements des scieries de marbres malgré le prix unitaire beaucoup plus élevé des machines à châssis diamanté.

Résultats des expériences de sédimentation

Echantillons A											
Temps (minutes)	0	30	60	90	120	150	210	240	270	300	330
Hauteur (mm)	0	1,5	3,5	6,5	10	14	19,5	25,5	32,0	38,7	46,2
Echantillons B											
Temps (minutes)	0	30	60	90	120	150	210	240	270	300	330
Hauteur (mm)	0	0,7	2,2	4,2	6,5	9,0	13,0	17,5	22,5	27,5	33,5
Echantillons C											
Temps (minutes)	0	30	60	90	120	150	210	240	270	300	330
Hauteur (mm)	0	0	0,7	1,7	3,0	4,5	7,0	10,0	13,0	16,5	20,2

Avant l'introduction de ce nouveau type de machines, le nombre de châssis était considéré comme le principal paramètre caractéristique d'une industrie marbrière parce que ce facteur représentait l'investissement le plus important (coût des machines, superficie au sol occupée).

La possibilité de scier en un poste un bloc de dimensions moyennes (au lieu d'une semaine à trois postes) a donc permis, dans de larges mesures, soit de diminuer la charge financière (à capacité de production égale), soit d'augmenter la capacité de production (à charge financière égale). La première conséquence de cette innovation fut de permettre de nouvelles initiatives dans le secteur industriel. Ces nouvelles installations ont parfois surclassé les réalisations des sociétés anciennes et bien connues malgré la différence de moyens financiers au départ.

Ce phénomène s'est amplifié depuis 1965 et peut être comparé (« mutatis mutandis » en ce qui concerne la valeur absolue des investissements) à l'introduction, en sidérurgie, de petites aciéries demandant des capitaux réduits en comparaison de ceux nécessaires pour l'installation de vastes complexes sidérurgiques.

2.2.4.1. *Cinématique de la lame diamantée*

Au paragraphe 2.2.3.1., nous avons introduit les notions de travail d'abrasion et de puissance à développer par l'accouplement prismatique. Pour le châssis à pulpe abrasive, nous avons mis en évidence successivement les points suivants :

- l'augmentation de la pression p exercée par l'outil sur la pierre ne peut en aucun cas rompre le film de pulpe séparant ces deux surfaces, situation qui provoquerait une détérioration rapide de la lame;
- l'augmentation de la vitesse du châssis est également limitée par l'inertie des masses en mouvement d'oscillation.

Pour ce qui concerne les lames diamantées, la valeur maximale de p est limitée par la dureté même de l'outil et par la résistance à la compression de la concrétion diamantée plus particulièrement (diamant + liant). Cette différence fondamentale permet par conséquent de travailler à des pressions bien plus élevées qu'avec des châssis à pulpe.

En fait, il existe un autre paramètre qui limite la pression d'appui; il s'agit de l'écartement à la verticale des lames lorsqu'elles sont soumises à un effort produisant un moment fléchissant trop important. Pour réduire au minimum la valeur de la flèche positive pendant le sciage, l'expérience conseille de prétensionner les lames de telle manière qu'elles présentent une contreflèche au montage qui vaudra 0,10 % de la longueur de lame pour des cales normales et 0,15 % pour des cales consistantes (soit 0,45 cm au maximum pour une lame de 3 m; ce qui revient à appliquer une charge équivalente de 2.295 kg uniformément répartis, pour une lame de section 0,35 x 18 cm, pour laquelle le moment d'inertie de la section droite est de 170 cm^4 et en admettant un module d'élasticité de 21.000 kg/cm^2).

Le prétensionnement est réalisé par traction excentrique et déplacement des attaches. Dans ces conditions, la lame travaille sans flèche ou du moins avec une flèche minimale ne provoquant qu'un écartement réduit. La lame se trouve ainsi soumise mécaniquement ou hydrauliquement à une traction symétrique variant de 8 à 10.000 kg.

En ce qui concerne la cinématique de la lame, la réalisation du mécanisme d'entraînement peut être simplifiée étant donné que la trajectoire du cadre porte-lames peut être parfaitement linéaire. D'autre part, les constructeurs ont actuellement résolu le problème de la lubrification du cadre porte-lames.

On trouve ainsi une large diffusion de châssis diamantés à bielle courte avec un cadre porte-lames oscillant sur des chemins guides fixes, le bloc étant porté par un chariot qui se déplace de bas en haut. Il existe également des châssis diamantés à lames verticales, mais ceux-ci sont plus rares bien qu'ils garantissent une production accrue (avancement de 0,80 m/h correspondant à une surface sciée de 1,2 m^2/h pour une lame d'une longueur de 1,30 à 1,50 m).

Ce type de châssis est actuellement l'objet d'expérimentations visant le sciage de roches éruptives (granits et roches assimilées). A la foire de S. Ambrogio di Valpolicella en 1980, des modèles ont été présentés par les sociétés Norton et Giorgini e Maggi [7].

Les lames diamantées ont une forme particulière dite en « os de chien », qui permet d'appliquer des pressions lame-bloc élevées (nécessaires pour le sciage des roches dures) sans qu'apparaissent des flèches importantes et des risques de déviation de la lame.

2.2.4.2. *Caractéristiques de l'outil diamanté*

Les lames diamantées sont constituées par un support d'acier dont le bord inférieur est garni de segments abrasifs. Ces segments contiennent les grains de diamant dispersés dans une matrice d'un alliage métallique.

La concentration des grains de diamant, ainsi que la composition de l'alliage, dépendent des caractéristiques du matériau à scier et du compromis « coût de l'outil - vitesse de coupe » choisi par l'opérateur. Les producteurs d'outils diamantés ont d'ailleurs différentes manières de définir ces paramètres et les formules adoptées ne sont pas toujours bien connues.

L'ingénieur Finnigan de la société De Beers [5] signale que la concentration de 1,32 carat/cm^3 est normale et mentionne l'importance de la résistance du liant synthétique. Pour le sciage des pierres plus tendres, l'utilisation de liants durs est recommandée car elle réduit la consommation en diamant.

Si les pierres à scier sont dures, il faut par contre utiliser des liants tendres sans quoi la concrétion diamantée est rendue passive par polissage (ou « gâchage ») et il est alors nécessaire de raviver l'outil. Quoi qu'il en soit, le sciage de pierres dures à l'aide de lames diamantées entraîne à l'heure actuelle une consommation spécifique de diamants élevée.

La granulométrie des grains de diamant couramment utilisée pour les pierres de dureté moyenne est comprise entre 40 et 50 mesh (normalisation américaine).

Des lames diamantées dites renforcées ont été commercialisées récemment (Botticino). Dans ce type de lames, la longueur des segments abrasifs a été conservée mais la vitesse de sciage a pu être pratiquement doublée, du moins pour les matériaux de dureté moyenne, et cela sans augmenter sensiblement la puissance motrice nécessaire. La composition

des segments garnissant les lames renforcées n'est cependant pas encore connue. Les utilisateurs de ces lames ont signalé qu'à coût égal, la durée de la lame (exprimée en surface sciée) représente 90 à 95 % de celle des lames traditionnelles.

2.2.4.3. *Refroidissement de l'outil*

Le refroidissement de l'outil est assuré par une circulation d'eau empêchant la graphitisation du diamant, ainsi que l'apparition de modifications dans la structure de l'agglomérant.

Le débit recommandé par les fabricants est d'environ 4 litres/min pour chaque lame pendant la phase initiale du sciage (où la vitesse de cale est maintenue réduite).

Après l'introduction complète des lames dans le bloc, la vitesse de cale pourra être augmentée et le débit d'eau de refroidissement devra être porté à 6 litres/min au moins.

L'eau de refroidissement joue également un autre rôle : elle s'infiltre dans la roche par capillarité et réduit sa compacité.

C'est le professeur A. Linholm [6] de la société De Beers qui a signalé l'importance de ce phénomène. Dans un article de 1967 [6], le professeur Linholm donne le résultat d'expériences de foration dans des granits à l'aide de couronnes diamantées refroidies par un mélange d'eau et de liquides tensio-actifs (savon mou, graisse de coupe et plus particulièrement de l'huile Dromus B de Shell). Les brillants résultats ainsi obtenus ont incité à étendre le procédé aux outils de coupe et également aux lames diamantées; il s'est avéré que l'absorption de ces liquides dans le matériau à scier a eu pour effet d'augmenter la durée de vie des segments d'au moins 20 %. Dans le même article, le professeur Linholm met également l'accent sur l'importance de la dureté de l'eau et de son effet anti-mouillant.

2.2.5. *Cycle de travail et outillage nécessaire dans un atelier traditionnel*

Le sciage des blocs en plaques de grandes dimensions alimente deux marchés différents :

1) un marché de produits semi-finis (dépôt de plaques pour la vente courante);
2) un marché de produits finis respectant des dimensions, un choix chromatique, ainsi que l'exécution de travaux particuliers.

Les plaques appartenant à la première catégorie peuvent être à l'état brut ou avoir subi un traitement de surface (sur une face généralement) : polissage, bouchardage, sablage, flambage (pour les roches acides), attaque aux acides chlorhydrique et phosphorique (pour les roches carbonatées).

Pour les plaques appartenant à la deuxième catégorie, un traitement de surface postérieur au découpage à dimensions ne peut être réalisé que si les plaques sont destinées à la réalisation de dallages plans. Dans les autres cas, le traitement superficiel est exécuté avant la mise à dimensions; viendront ensuite les éventuels polissages des chants, la réalisation de chanfreins, le marquage, l'emballage,...

2.2.5.1. *Polissage des plaques*

Le polissage est une technique qui, jusqu'à présent, n'a pas fait l'objet d'expérimentations visant à lier l'évolution, au cours du temps, de la structure pétrographique de la surface du matériau à polir, aux paramètres tels que la vitesse et la pression de l'outil, son excentricité d'action, le coefficient de frottement entre grains d'abrasif et plaque.

Les machines polisseuses peuvent être commandées manuellement (pour le polissage en discontinu) ou automatiquement.

Des chaînes de polissage automatiques peuvent parfois avoir une longueur dépassant 40 m. Plusieurs polisseuses y sont alors accouplées et un chemin de roulement emmène en continu les plaques d'une machine à une autre dont les grains abrasifs sont plus fins. Le polissage continu permet une augmentation de la productivité par la réduction des temps morts (chargement, déchargement,...).

Les photographies des figures 26 à 28 montrent différents types de machines continues pour le polissage et la lustration.

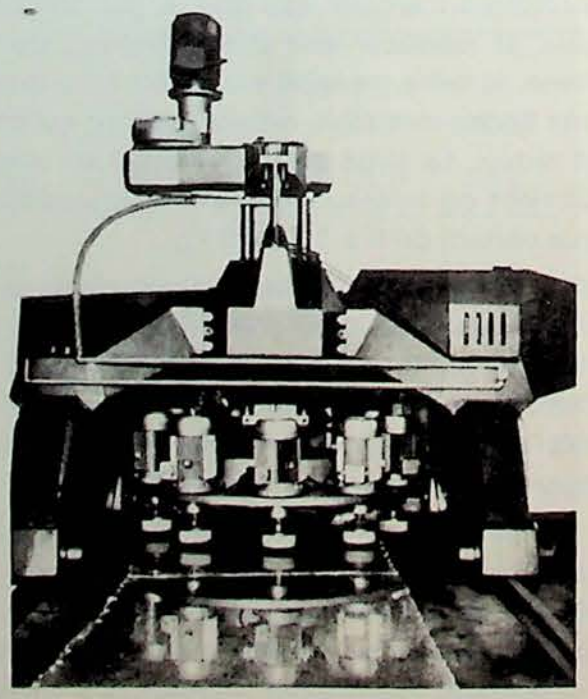


Fig. 26 : Polisseuse automatique pour granit

Une méthode statistique de mesure du degré de polissage a été mise au point par les professeurs Asumi, Rossi et Uras (Facolta Ingegneria dell' Universita de Cagliari). Cette étude a fait l'objet d'une communication au « Primo Convegno Intern. Coltivazione Pietre e Min. Litoidi - Torino 1974 ».

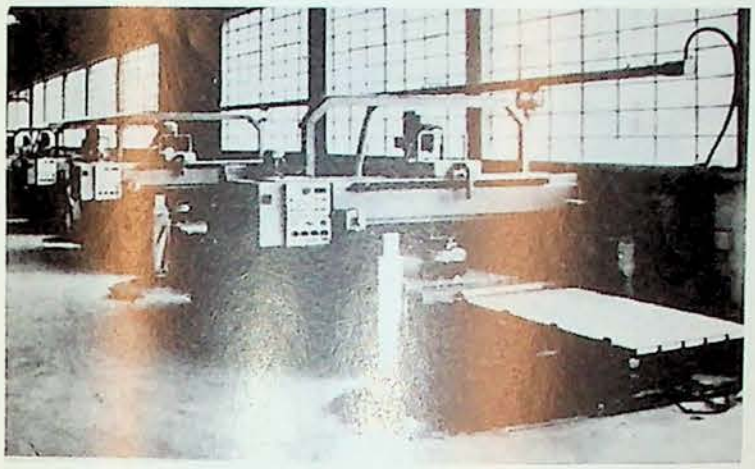


Fig. 27 : Chaîne de polissage et de lustration pour marbres et granits

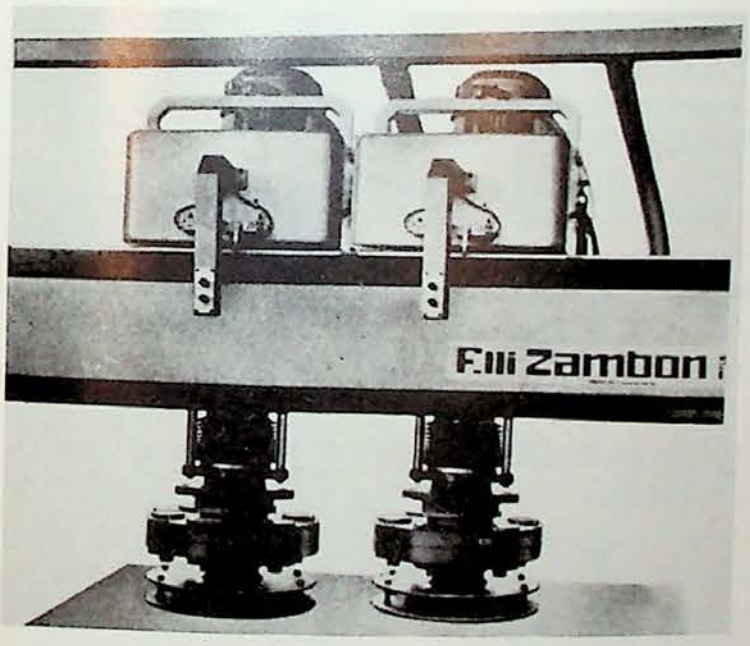


Fig. 28 : Polisseuse automatique programmable

L'utilisation d'engins de levage à « ventouses » est particulièrement conseillée pour les opérations de chargement et de déchargement lors du polissage en discontinu.

Notons qu'une machine constituée d'un grand disque roulant, auquel sont fixés 8 à 10 mandrins indépendants, a été proposée pour réaliser des productivités élevées. L'outil abrasif a, outre son mouvement propre de rotation, un mouvement de révolution dû à la rotation du disque. La structure qui supporte la machine se déplace sur rail le long d'une table de 40 m de longueur minimum. Cette machine ne réalise pas de production plus forte que les machines à chaîne.

A titre d'information, le rendement des polisseuses est généralement compris entre 5 et 7 m²/h pour les marbres; 1 et 1,3 m²/h pour les granits acides; 1,3 et 1,5 m²/h pour les granits basiques.

Des polisseuses de grandes dimensions peuvent cependant atteindre des rendements bien plus élevés, proches de 20 m²/h (granit), mais leur coût est également élevé et leur utilisation n'est justifiée que pour des unités de production importante.

2.2.5.2. *Bouchardage, flambage et autres traitements de surface finals*

Le bouchardage est l'une des plus anciennes méthodes de traitement de surface, utilisée principalement pour les matériaux de revêtement extérieur.

L'exécution d'un rayage à la surface des plaques de marbre ou de granit peut être réalisée de plusieurs manières.

Le bouchardage manuel permet d'obtenir un « écimé » lourd ou moyen suivant le tranchant du burin utilisé. Le mode manuel est encore utilisé aujourd'hui, mais son coût devient prohibitif et tend à le faire disparaître.

Le bouchardage peut être réalisé mécaniquement par des machines automatiques largement diffusées aujourd'hui. Il existe deux types de bouchardeuses : celles où le burin pneumatique coulisse sur un pont fixe, tandis que les plaques se déplacent transversalement sur un chemin de roulement, et celles où les plaques sont fixes, le pont portant le burin étant mobile. Ces machines peuvent réaliser n'importe quel type d'écimé, du plus grossier au plus fin. Elles sont généralement munies de capteurs de poussières, mais sont rarement bien insonorisées.

Les bouchardeuses les plus diffusées sont fabriquées par la firme italienne Pellegrini. Leur rendement est compris entre 8 et 10 m²/h pour un bouchardage fin sur un marbre de dureté moyenne; 6 et 8 m²/h pour le granit (chiffres donnés pour un débit d'air de 1.500 litres/min).

Les reproductions photographiques des figures 29 à 31 montrent différents états de surface en regard des burins utilisés pour le bouchardage pneumatique.

Les machines utilisées pour le flambage ressemblent aux bouchardeuses à la différence près que le burin pneumatique est remplacé par un chalumeau (simple ou à plusieurs flammes) dont le(s) dard(s) forme(nt) un angle de 45° avec la plaque.

La vitrification du quartz et des silicates donne, à la surface de la roche éruptive, un aspect vitreux dont les effets chromatiques sont caractéristiques. Ce traitement a également pour effet de rendre la surface du matériau plus résistante aux agents chimiques (et plus spécialement à la kaolinisation des feldspaths), à

l'altération mécanique d'origine éolienne ou thermique, ainsi qu'à l'abrasion (particulièrement importante lorsque les plaques servent au recouvrement des sols).

Les machines construites par Pellegrini ont un rendement généralement compris entre 15 et 25 m^2/h pour une consommation de 10 à 15 m^3/h en oxygène et de 9 à 13 litres/h en propane (liquide).

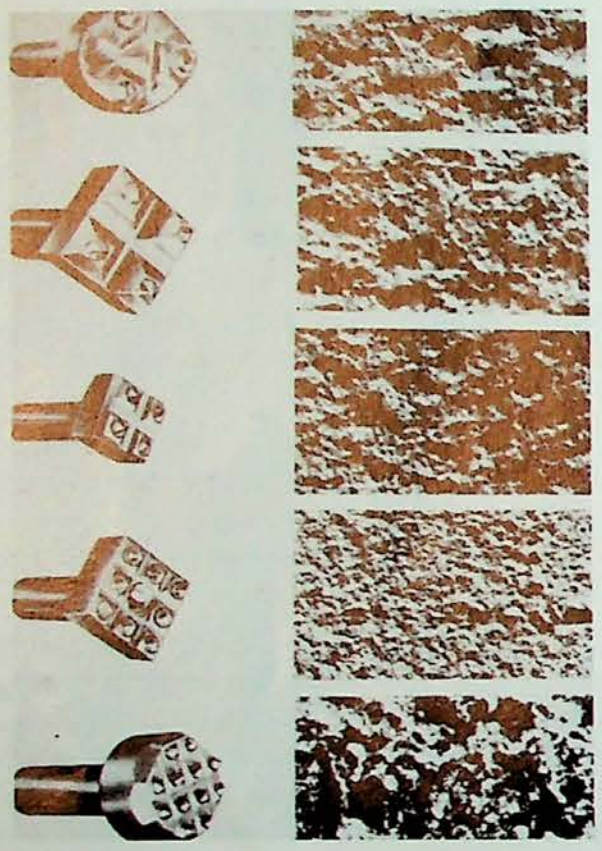


Fig. 29 : Différents états de surface obtenus par bouchardage pneumatique et outils correspondants

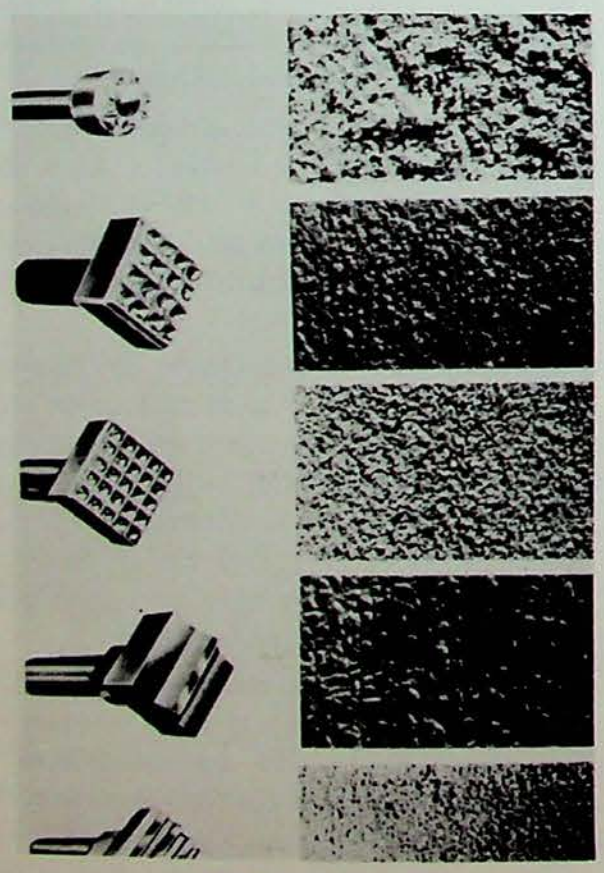


Fig. 30 : Idem

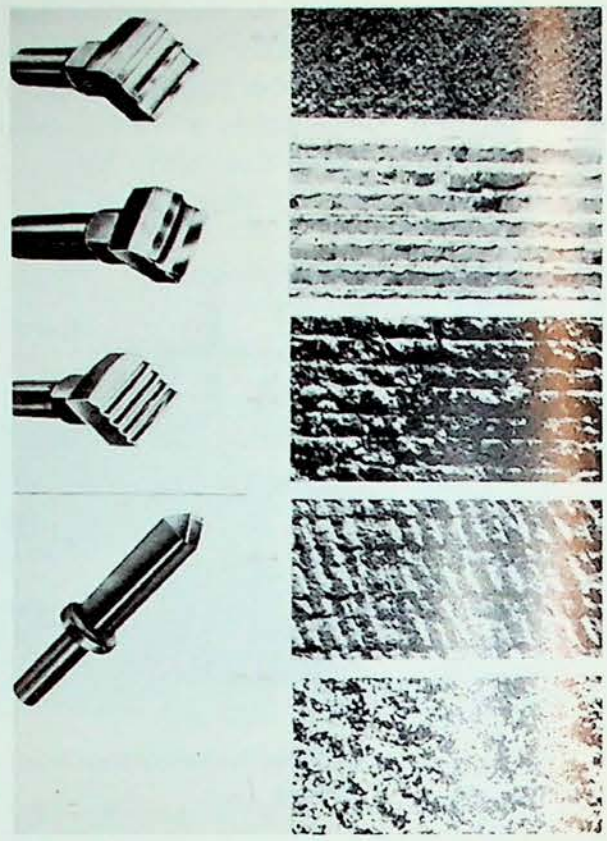


Fig. 31 : Idem

A la figure 32, on trouvera les machines les plus couramment utilisées pour le bouchardage et/ou le flambage.

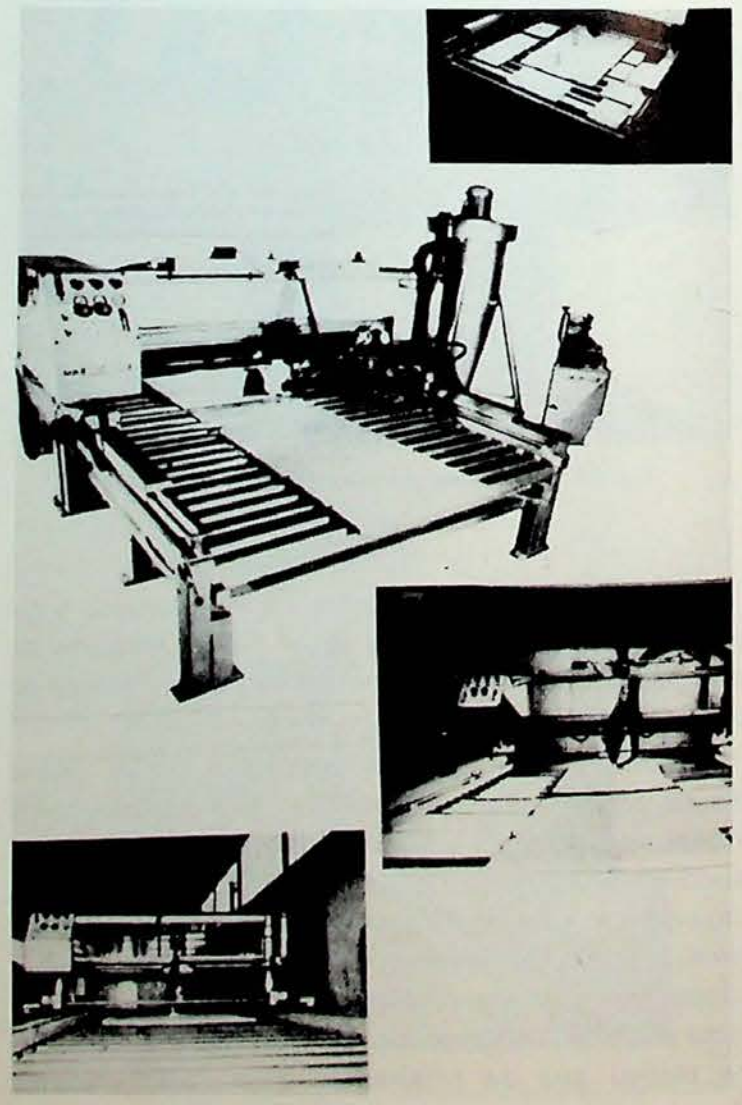


Fig. 32 : Différents types de machines de bouchardage

D'autres méthodes, comme le sablage par exemple, permettent de tracer des graphismes sur la surface des plaques et ceci à l'aide de masques en plastique laminé.

L'attaque à l'acide chlorhydrique chaud permet également de réaliser des incisions qui peuvent atteindre 4 mm de profondeur dans les roches carbonatées traditionnelles.

Enfin, pour terminer, on peut signaler l'utilisation des ultra-sons donnant à la surface des matériaux polyminéraux un aspect caractéristique. Cette méthode est cependant peu utilisée.

2.3. *Elaboration de produits de dimensions constantes*

2.3.1. *Considérations préliminaires*

La valeur V d'un bloc brut a été définie au paragraphe 2.2.2. L'expression (2) relative à la production de plaques de 2 cm d'épaisseur et qui tient compte de données commerciales a montré que la droite représentative dans un plan V, η ne passe pas par l'origine.

Autrement dit, si le coefficient volumétrique est nul, la valeur du bloc est $V_0 = — (S + T)$ (7) soit une constante pour un bloc de dimensions données. La valeur d'un bloc est négative lorsque les frais S + T sont supérieurs à 40 c.η. (valeur des plaques), c'est-à-dire lorsque η est petit. Cette situation se présente lorsque des blocs présentent plusieurs défauts (compacité, chromatisme,...).

Etant donné que les frais de fonctionnement d'un châssis sont fixes, on peut tenter d'optimaliser le coût spécifique du sciage en apportant un soin particulier à l'assortiment des blocs dans la préparation des chariots. Cette préoccupation se traduit par l'optimalisation du taux de remplissage en plan et par le respect d'une certaine uniformité dans la hauteur.

Le coût du produit scié devra tenir compte des bonifications commerciales relatives à chaque bloc, des vides séparant les blocs sur le chariot, des vides résultant de la différence de hauteur, des vides résiduels présents aux extrémités du chariot.

Ainsi, la productivité réelle d'un châssis et, par conséquent, le coût des plaques seront affectés d'un coefficient η_R (appelé « coefficient de remplissage du châssis ») qui tient compte du volume des plaques de 2 cm produites et du volume disponible dans le châssis.

L'expression (2) peut alors s'écrire :

$$V = 40\,\eta_R\,C — (S + T) \quad (8).$$

Les frais fixes mis à part, la valeur d'un bloc dépend donc du cours des plaques, des bonifications et également de la manière de l'intégrer dans le châssis. Il est nécessaire de préciser que l'appellation « petits blocs » ne se rapporte pas uniquement aux blocs ayant des dimensions nettement inférieures à celles qui déterminent le volume disponible dans le châssis. Les blocs caractérisés par un coefficient de rabais trop faible appartiennent également à cette catégorie.

L'utilisation rentable des petits blocs a pu être envisagée quand on a mis sur le marché les disques diamantés de grand diamètre. A partir de ce moment, les carriers eurent la possibilité de vendre des blocs qui étaient destinés au terril. On put même rentabiliser des carrières dont le marbre présentait peu d'uniformité (dureté, compacité, effets chromatiques,...).

Les marbriers étaient également intéressés par ce nouveau marché : l'installation d'une machine coupe-blocs représentait un investissement réduit et ils achetaient les petits blocs à des prix relativement peu élevés chez des producteurs autres que les grandes sociétés.

Aujourd'hui, ce secteur a atteint des dimensions considérables; des machines de polissage automatiques sont intégrées dans le cycle de travail et permettent d'alimenter à prix réduit un marché en développement constant.

Pour terminer ce paragraphe, il faut signaler que l'industrie des roches éruptives n'a pas connu un développement aussi important dans ce domaine. Les carriers exploitent ces roches à cause de leurs caractéristiques propres et sont peu intéressés par la valorisation et la vente des sous-produits.

2.3.2. *Sciage à l'aide de coupe-blocs*

Dans l'industrie marbrière, les premières machines à disque diamanté furent les débiteuses utilisées pour le découpage de plaques sciées au châssis. La mise au point de disques diamantés de plus grand diamètre permit de scier des épaisseurs plus importantes (la profondeur de coupe représente généralement un tiers du diamètre du disque) et il fut possible d'envisager la construction de coupe-blocs.

Les machines coupe-blocs les plus modernes ont généralement une structure à 4 colonnes (fig. 33) qui supporte un pont où sont couplés le plus souvent deux disques : le premier de diamètre plus petit tourne dans un plan de coupe horizontal, le deuxième de diamètre plus grand scie suivant un plan vertical. Le chariot porte-blocs est généralement fixe; le mandrin principal peut être déplacé, mécaniquement ou pneumatiquement, sur le pont qui, à son tour, peut être déplacé transversalement sur des chemins-guides.

Il existe un modèle plus simple et meilleur marché de machines coupe-blocs à 2 colonnes (fig. 34). Le

mandrin du disque principal peut se déplacer sur le pont dont la hauteur est également réglable, le chariot porte-blocs étant, dans ce cas, mobile.

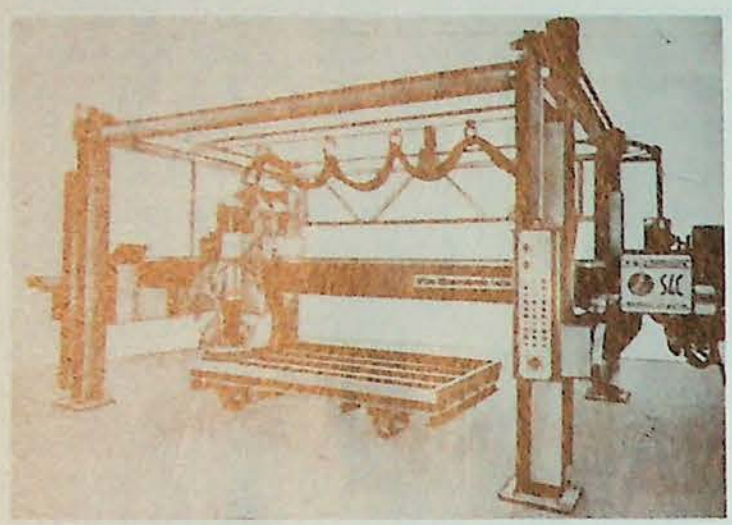


Fig. 33 : Scie-blocs à 4 colonnes

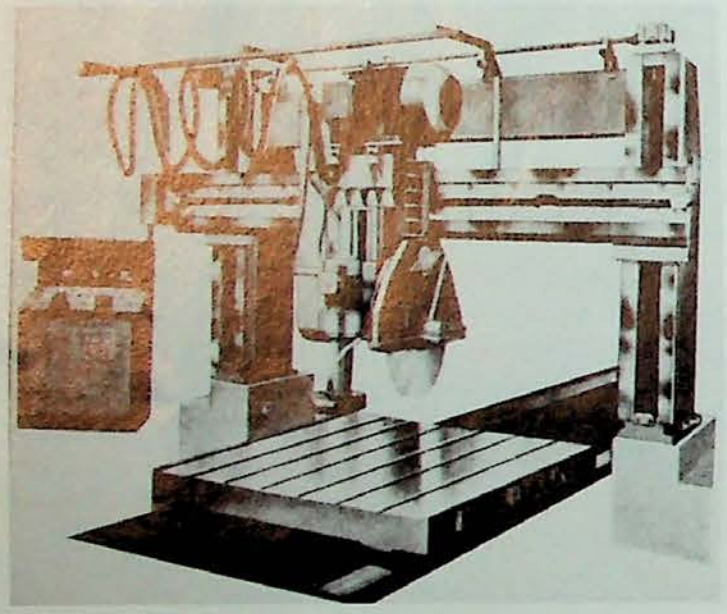


Fig. 34 : Scie-blocs à 2 colonnes

Grâce aux machines coupe-blocs, il est possible de scier des tranches de n'importe quelle épaisseur, d'une longueur égale à celle du bloc et d'une largeur égale au tiers du diamètre du disque, tout au plus.

Le diamètre de disque le plus répandu est de 1 m, il lui correspond donc une profondeur de coupe de 33 cm.

L'enlèvement de la plaque sciée peut être réalisé par un engin de levage semi-automatique qui va la positionner sur le banc d'une machine à border, « accessoire » indispensable de la machine coupe-blocs où la tranche est sciée à la longueur voulue (fig. 35).

Il est important de signaler que les plaques peuvent être sciées à l'épaisseur voulue en deux opérations :

- La première est réalisée par une machine qui découpe le bloc en tranches épaisses.
- La deuxième est réalisée par une machine « éclateuse » à un ou plusieurs disques à axe fixe. Les tranches y sont amenées par une bande transporteuse qui évacue le produit scié vers la machine à border.

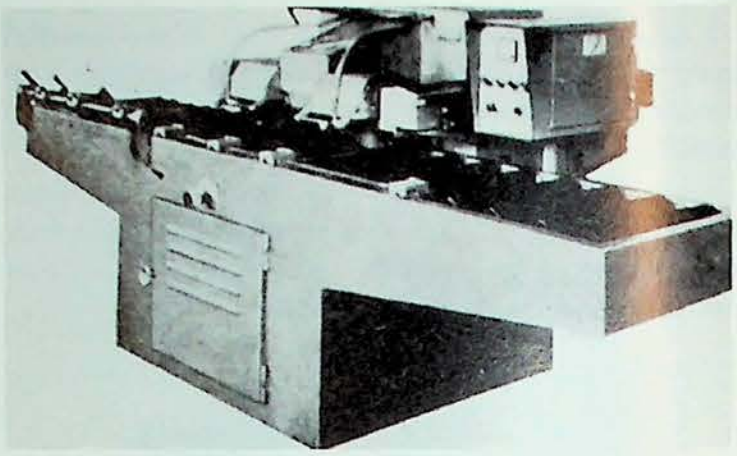


Fig. 35 : Scieuse abouteuse

2.3.2.1. *Caractéristiques de fonctionnement des disques diamantés*

Les paramètres caractéristiques du fonctionnement des disques diamantés se rapportent à :

- la géométrie du disque (diamètre extérieur, épaisseur) et des segments abrasifs (longueur, épaisseur),
- la composition des segments (concentration des diamants, nature du liant,...),
- la cinématique du disque (vitesses de rotation et de translation du mandrin),
- la profondeur de coupe.

La longueur des segments doit être telle que les espaces ménagés permettent une bonne circulation de l'eau de refroidissement. La détermination de l'épaisseur des segments doit tenir compte de la concentration en diamant, de la durée de vie souhaitée de l'outil (usure normale et usure provoquée par les vibrations latérales).

Les vitesses périphériques recommandées par les constructeurs sont les suivantes :

Matériau	Vitesse (m/min)
Quartz, quartzites	1.500
Granits, porphyres, grès compacts	1.800
Serpentines et autres roches plus dures	2.000
Marbres calcaires de dureté moyenne	2.300
Calcaires et grès très tendres	3.000

Une étude effectuée par Bailey & Wright [2] de la société De Beers, Industrial Diamond Division, a montré que :

- Les efforts exercés sur le disque sont moindres lorsqu'on travaille à faible profondeur de coupe et vitesse de rotation élevée (pour une vitesse de pro-

duction constante et comprise entre 200 et 400 cm^2/min).

- La composante verticale de l'effort de coupe exercée sur le disque est plus importante que la composante horizontale. Cette dernière est plus faible en coupe d'avancement qu'en coupe de retour.
- L'augmentation de la vitesse de production, dans les limites des possibilités de la machine, n'augmente pas sensiblement l'usure de la concrétion diamantée, du moins si le type de diamant utilisé est très résistant et peu clivable. Les auteurs admettent que les grains de diamant sont assez résistants pour supporter la charge supplémentaire résultant de l'augmentation de la vitesse.

Comme nous l'avons déjà signalé au paragraphe 2.2.4.3., l'addition de tensio-actifs dans l'eau de refroidissement permet d'augmenter la productivité.

Des expériences menées par le professeur Linholm [6] sur un granit du type Bon Accord ont donné les résultats suivants (pour une débiteuse ayant un disque de 200 mm de diamètre, une vitesse du mandrin variant de 500 à 4.500 tours/min et une vitesse d'avancement de la table de 0 à 3 m/min) :

- Pour une profondeur de coupe de 13 mm, la vitesse d'avancement est maximale pour une vitesse périphérique du disque de 15,3 m/s (l'eau de refroidissement ne contenant pas de tensio-actifs). Si la vitesse périphérique du disque est portée à 35,6 m/s, la vitesse d'avancement du sciage diminue de 42 % par rapport au maximum précédent.
- Lorsqu'on ajoute 2 % de savon mou à l'eau de refroidissement, le maximum de la vitesse d'avancement est atteint pour une vitesse périphérique de 25,4 m/s et pour une vitesse légèrement supérieure lorsque la teneur en savon mou est ramenée à 0,4 %.

Cette recherche a également montré que l'augmentation de la tension superficielle de l'eau provoque une réduction des vibrations du disque, donc aussi de la pollution acoustique.

Il est regrettable que les conclusions de ce travail ne sont prises en considération ni dans les ateliers existants ni même dans l'installation de nouveaux.

2.3.2.2. *Travail du plan et des chants*

Les plaques sciées par les débiteuses peuvent être emballées et expédiées directement pour la pose sans subir aucun traitement du fait que le plan scié au disque diamanté présente un état de surface comparable au pré-polissage.

Dans les installations modernes, des traitements complémentaires sont réalisés sur les plaques sortant des débiteuses. Celles-ci sont emmenées sur des rouleaux ou par bande transporteuse en caoutchouc vers la section de calibrage de l'épaisseur. La rectification est réalisée, soit à l'aide de disques abrasifs à secteurs diamantés, soit à l'aide de disques à structure complexe (carborundum, magnésite). Si le matériau requiert un mastiquage de petits trous (dans le cas du travertin, par exemple), une section d'essorage doit être prévue. Si le mastic est composé de résines époxy, il faut préchauffer les plaques.

Dès lors, les opérations de séchage et de préchauffage sont regroupées et réalisées à l'aide de lampes à infrarouges ou de poêles à gaz liquide. Le stade suivant correspond au polissage (fig. 36 et 37) par des meules contenant des abrasifs de granulométrie décroissante (et de numérotation croissante) et, enfin, la surface polie est lustrée au feutre ou encore par des disques à secteurs à virgule contenant la cire (pour des granits, le finissage est réalisé à l'aide de plomb ou d'oxyde d'étain).

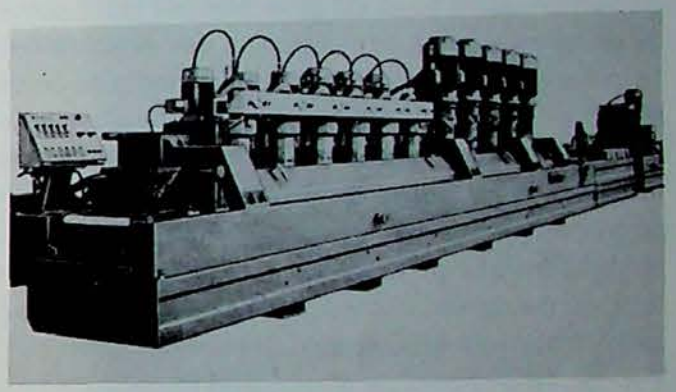


Fig. 36 : Chaîne de polissage pour dalles de marbre

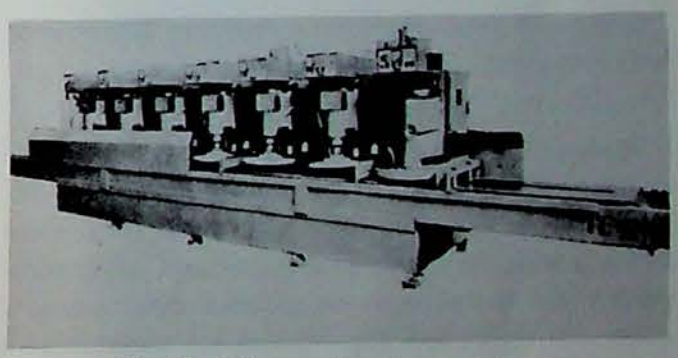


Fig. 37 : Polisseuse à bande transporteuse

Suivant la destination du produit, une section de polissage des chants et de chanfreinage peut être ajoutée à la chaîne précédemment décrite (fig. 38).

L'utilisation de chaînes de production complète va vraisemblablement se généraliser et permettre à l'avenir l'emploi du marbre dans des domaines d'où il était jadis exclu, soit pour son prix, soit pour son manque de souplesse à l'utilisation.

2.3.2.3. *Détermination du coût des plaques sciées par coupe-blocs*

Les cycles de production décrits aux paragraphes précédents sont applicables lorsque sont disponibles des blocs de petite taille ou dont le faible coefficient

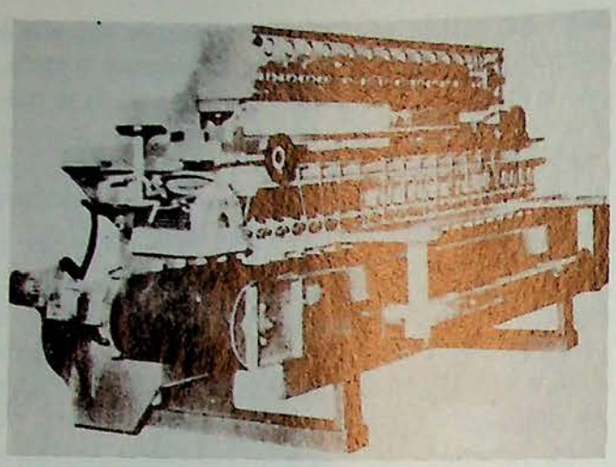


Fig. 38 : Machine de chanfreinage

de rabais diminue la valeur spécifique. Le coût de production de ces blocs est généralement faible parce qu'ils sont des produits marginaux des exploitations en carrières. Il est d'ailleurs ramené à l'unité de poids (et non de surface) et nous le désignerons par p pour la suite. Il s'ensuit que le coût relativement bas des matières premières peut compenser des coûts élevés de production. La faible valeur de la matière première ne doit pas faire négliger son incidence sur le coût total. En particulier, le choix des blocs est très important. Un marbrier expérimenté choisira des blocs dont « le poids d de pierre par mètre carré de produits finis à l'épaisseur de 2 cm » est minimum.

D'autres critères devraient également être pris en considération : les défauts chromatiques par exemple, ou la forme des blocs.

Revenons au coût de production pour indiquer qu'il est impossible de comparer le coût de production des petites et grandes plaques. En effet, la conception même et la réalisation de production sont différentes. Dans le cas des plaques de grandes dimensions, il s'agit d'un objet spécifique ayant été spécialement conçu et produit selon un processus ad hoc d'après un plan détaillé.

Dans le cas des petites plaques, on produit en série sur coupe-blocs des formes simples (carrés ou rectangles) déterminées d'avance.

Examinons le coût de cette dernière production : si c représente le coût horaire de fonctionnement des machines coupe-blocs et Q le poids du bloc que l'on peut scier par unité de temps, (c/Q) représente le coût pour scier l'unité de poids. Le prix de revient des plaques par unité de surface pourra alors s'écrire :

$$S = (p + c/Q).d \qquad (9)$$

où p est le prix d'achat de l'unité de poids.

Cette formule est très utile aux marbriers car elle permet d'évaluer le coût d'un projet et de contrôler ensuite l'évolution de ce coût en cours de réalisation.

Exemple numérique : pavement de Botticino : A l'aide d'un bloc de 12.000 kg, on obtient 120 m^2 de produits finis de 2 cm d'épaisseur.

d = 100 kg/m^2
Q = 5.000 kg/h
c = 100.000 lires/h
p = 30 lires/kg
c/Q = 20 lires/kg
S = 5.000 lires/m^2

2.3.3. *Conclusions*

Le grand développement des productions en série est un bon signe pour l'industrie marbrière.

Puisse, par son entremise, le marbre s'affirmer à nouveau en tant que symbole de la couleur et de la forme, valeurs les plus importantes de l'esprit humain.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie l'Associazione Italiana Costruttori Macchine per il Marmo - A.C.I.M.M. - et plus particulièrement son président M. Pellegrini pour sa précieuse collaboration à cette étude.

L'auteur remercie également les Organisateurs des Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale, ainsi que les participants pour leur attention et les observations qu'ils ont présentées.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Asuni - Rossi - Uras, Analisi critica delle metodologie correnti e proposta di razionalizzazione nella determinazione dei parametri atti a caratterizzare le proprietà technologiche delle rocce. Atti convegno int. coltivazione pietre e min. litoidi. Torino 1974.
[2] Bailey-Wright, Convegno De Beers - Düsseldorf, 1979.
[3] A. Consiglio, Il marmo. Edit. Edizioni Tecniche. Milano, 1964.
[4] Ferreti, Meccanica delle macchine - Ed. Pironti, Napoli, 1946.
[5] Finnigan, Lavorazione delle pietre con utensili diamantati.
[6] A.A.L. Linholm, Le ricerche sulla perforazione di rocce con diamanti e loro applicasione all'industria lapidea - De Beers Industrial Division, 1967.
[7] Marmomacchine, Revista tecnica ACIMM - Assodiam - Assomarmi, 1970 e 1980.

Utilisation du câble diamanté en carrière

Benoît THOREAU *

RESUME

La communication présente une nouvelle méthode de sciage du marbre en carrière qui permet à l'exploitant de réduire sensiblement ses coûts d'extraction. Les économies réalisées sont en effet dues aux facteurs suivants :

- une plus grande vitesse de sciage (deux à quatre fois plus rapide que le fil hélicoïdal);
- une réduction sensible des temps morts en carrière grâce à la rapidité d'installation des équipements;
- une qualité parfaite des surfaces sciées, ce qui économise les opérations ultérieures d'équarrissage;
- une grande souplesse d'utilisation permettant d'exécuter des coupes de toutes dimensions et dans les environnements topographiques les plus difficiles.

SAMENVATTING

De mededeling stelt een nieuwe methode voor van het zagen van marmer in groeven die de ontginner de mogelijkheid biedt de extractiekosten aanzienlijk te verminderen. De verwezenlijkte besparingen zijn inderdaad toe te schrijven aan de volgende factoren :

- een grotere zaagsnelheid (twee à drie maal vlugger dan de spiraaldraad);
- een aanzienlijke vermindering van de dode tijden in de groeve dank zij de snelle installatie van de uitrustingen;
- een perfecte kwaliteit van de gezaagde vlakken, wat het kantrechten nadien overbodig maakt;
- een grote gebruikssoepelheid die het mogelijk maakt sneden uit te voeren van alle afmetingen en in de moeilijkste topografische omgevingen.

ZUSAMMENFASSUNG

In dem Bericht wird eine neue Methode zum Sägen von Marmor im Steinbruch vorgestellt, die eine wesentliche Senkung der Gewinnungskosten gestattet. Die erzielten Einsparungen sind dabei auf folgende Faktoren zurückzuführen :

- eine größere Sägegeschwindigkeit (zwei- bis viermal so schnell wie mit Spiraldraht);
- eine wesentliche Reduzierung der toten Zeiten im Steinbruch infolge der schnellen Installation der Ausrüstungen;
- eine vollkommene Qualität der gesägten Ober-

SUMMARY

This paper describes a new method for marble sawing in quarries, which makes it possible to achieve a considerable reduction in the cost of extraction of the marble. The savings result from :

i) faster sawing, from two to four times the normal rate with a spiral wire;
ii) an appreciable lessening of down time in the quarry, because the equipment can be installed more quickly;
iii) perfect finish of the sawed surfaces; this saves the cost of the subsequent squaring-off work;

* Ingénieur, Diamant Boart, avenue du Pont de Luttre 74, B-1190 Bruxelles.

flächen, wodurch spätere Zurichtarbeiten eingespart werden;
- eine große Anwendungsflexibilität, die gestattet, Schnitte aller Abmessungen bei schwierigsten topographischen Umgebungen auszuführen.

iv) highly flexible operation of the equipment, making it possible to cut sections of any size, and in the most difficult conditions.

---

1. *PRINCIPES DU SCIAGE AU CABLE DIAMANTE*

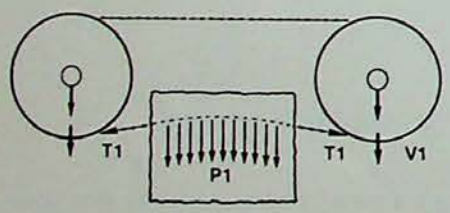
L'idée d'utiliser le câble diamanté pour l'extraction en carrière n'est assurément pas neuve.

La première utilisation de cet outil a été envisagée par Diamant Boart en 1968 pour l'équarrissage des blocs en remplacement des câbles hélicoïdaux. Cependant, cette application n'a pas connu le succès espéré pour deux raisons fondamentales :

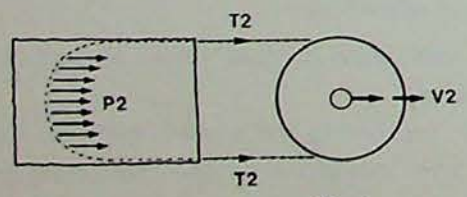
- l'équarrissage des blocs au monolame restait plus économique;
- les tensions et les flexions subies par le câble pour assurer une bonne pression de sciage étaient telles que de nombreux problèmes de résistance mécanique du câble se posaient.

Une autre idée a alors été développée et consistait à fermer le câble diamanté sur la masse à scier et à entraîner celui-ci au moyen d'une poulie de grand diamètre.

Comme le montre la figure 1, les efforts appliqués sur le câble sont devenus inférieurs grâce à cette méthode qui est maintenant appliquée de plus en plus par les carriers.



T : Tension
P : Pression sur le matériau
V : Vitesse de coupe



T1=T2	T1>T2
P1<P2	P1=P2
V1<V2	V1=V2

Fig. 1

Ceux-ci utilisent en effet le câble diamanté, soit pour mettre à dimensions des blocs abattus, soit pour scier dans la masse même du gisement après avoir foré au préalable deux trous perpendiculaires permettant le passage du câble diamanté (fig. 2 et 3).

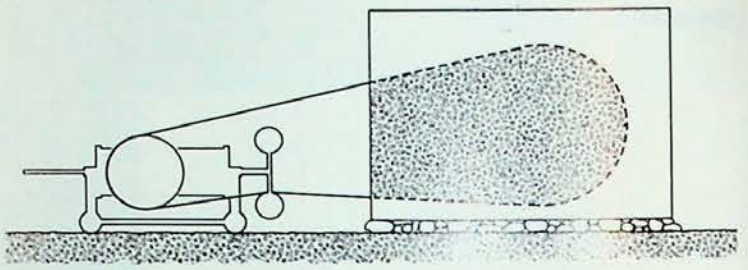


Fig. 2

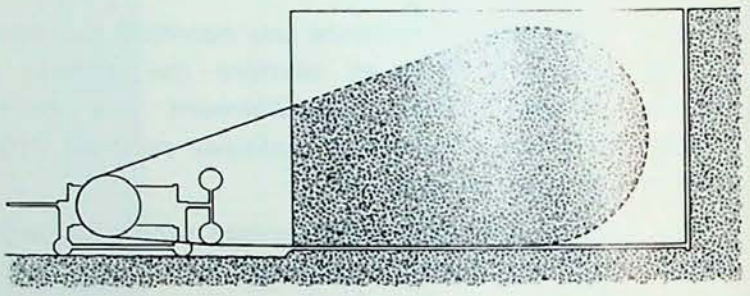


Fig. 3

Le plus souvent, les exploitants de carrière utilisent la technique du sciage au câble diamanté en conjonction avec d'autres méthodes comme le montrent les figures 4 et 5.

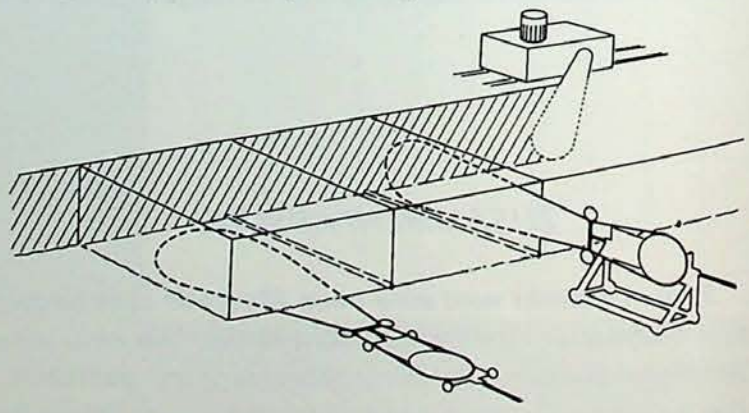


Fig. 4

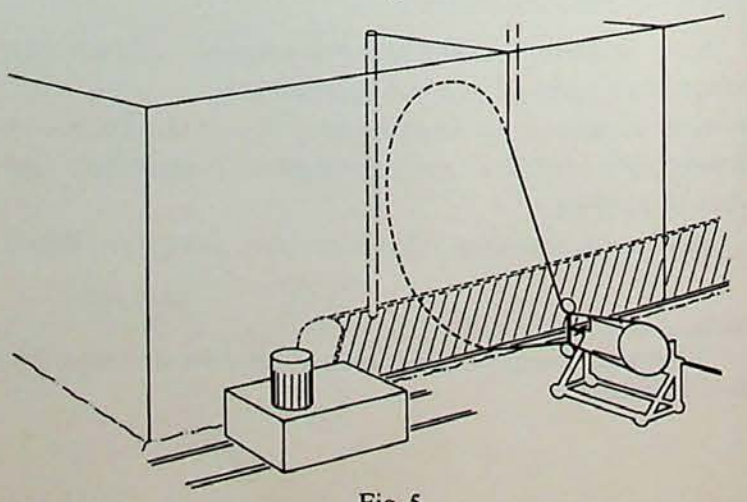


Fig. 5

2. *DESCRIPTION DES CABLES DIAMANTES*

Les câbles Diamant Boart comportent un câble porteur en acier inoxydable sur lequel sont enfilées des perles diamantées en liant électrolytique ou à concrétion. Les perles sont séparées entre elles par des intercalaires.

Ceux-ci sont disponibles en trois versions :

- intercalaires en plastique thermorétractable;
- intercalaires en plastique injecté;
- intercalaire à ressort.

Dans ce dernier cas, des entretoises en acier sont serties sur le câble à intervalles réguliers afin d'éviter aux ressorts des compressions trop importantes.

D'une longueur standard de 20 m, les câbles diamantés sont faits de deux tronçons, respectivement de 15 m et de 5 m, assemblés au moyen d'embouts et d'un manchon fileté.

Si la masse à scier requiert une longueur de câble supérieure à 20 m, plusieurs tronçons peuvent être assemblés pour atteindre la longueur requise.

3. *MACHINES UTILISEES*

Machine d'entraînement du câble

Les machines entraînant le câble diamanté sont de conception simple, facilement maniables et peu coûteuses.

Elles comportent deux éléments essentiels :

- Un châssis tubulaire équipé de la poulie d'entraînement. Celle-ci est animée par un moteur hydraulique de rotation et se déplace le long du châssis grâce à un vérin hydraulique permettant de maintenir une tension constante sur le câble pendant le sciage.
- Un groupe hydraulique alimentant le moteur de rotation de la poulie et le vérin de tension (puissance : 20 à 30 CV).

Le tableau I donne, à titre indicatif, les principaux constructeurs de machines à fil diamanté existant sur le marché.

Machine de forage

Peu de machines de forage adaptées à ce type d'application existent sur le marché. Elles doivent en effet être légères (la longueur des trous excède rarement 10 m), précises (deux forages doivent se rejoindre) et les trous doivent pouvoir s'exécuter à ras du sol ou à ras des murs de manière à perdre le moins de matière possible. Actuellement, les foreuses destinées à réaliser les puits préalables au sciage au fil hélicoïdal, ainsi que certains marteaux fond de trou (exemple : Stenuick BBAS), semblent les mieux appropriés pour ce type de travail. Pour sa part, Diamant Boart met au point une petite machine de forage spécifique pour le sciage au câble diamanté.

4. *QUELQUES DONNEES ECONOMIQUES D'UTILISATION*

4.1. *Performances de sciage*

Le tableau II montre les performances de sciage

TABLEAU I

Constructeur	Type de machine	Puissance	Caractéristiques
Procomas Carrara (Italie)	EW 115 B	30 CV	Sciage dans toutes les positions, avance par crémaillère option électrique ou diesel
Madrigali Ortonovo (Italie)	châssis pour sciage horizontal châssis pour sciage vertical	20 CV	Sciage dans position verticale ou horizontale, avance par vérin hydraulique
Fornara Turin (Italie)	Mark 2	20 à 25 CV	Sciage dans toutes les positions, avance par vérin hydraulique
Benetti Carrara (Italie)	DWP 800	25 CV	Sciage dans toutes les positions, avance par vérin hydraulique
Pellegrini Verona (Italie)	DB. 25	25 à 30 CV	Sciage en position verticale, avance par crémaillère (grande course : 2 à 3m)
Diamant Boart Bruxelles	Diafil 100	30 CV	Sciage dans toutes les positions, avance par vérin hydraulique option électrique ou diesel

TABLEAU II

Matériaux	Dureté Shore	Débit (m^2/h)	Durée de vie du câble (m^2)	Coût du câble (FB/m^2)
Marbre Carrare	50	3 à 4	400	410
Travertin romain	40 à 50	4	600	275
Pierre bleue belge	60	3	300	550
Granite Balmoral	115	1	40	4.125

obtenues avec un câble diamanté de 20 m de longueur sur différents types de pierres.

Excepté pour le Balmoral, dont le sciage ne s'est effectué jusqu'à présent qu'en station d'essai, toutes les données ci-dessus correspondent à des conditions réelles de sciage en carrière.

4.2. *Analyse du prix de revient*

Nous utiliserons la formule qui permet de calculer et qui totalise pour 1 m^2 travaillé :

- l'amortissement de l'équipement;
- les coûts de son utilisation;
- le coût de l'outil

P = amortissement de l'équipement + coût d'utilisation + coût de l'outil

plus précisément :

$$P = \frac{PI \times F}{ta \times D} + \frac{E + W + T}{D}\,(m^2) + PS$$

formule dans laquelle :

P : prix de revient total de 1 m^2 scié
PI : prix global de l'investissement en F
F : taux d'amortissement annuel
ta : temps de travail annuel en heure
D : débit horaire total en m^2/h
E : prix de l'énergie consommée en F/h
W : prix de l'eau consommée en F/h
T : coût de la main-d'œuvre en F/h
PS : prix des facteurs proportionnels à la surface sciée en F/m^2 (prix de l'outil et de certaines matières consommables).

A partir des coûts pratiqués en Europe, nous pouvons établir une comparaison du coût d'exploitation par m^2 des différentes techniques d'extraction utilisées en Belgique, à savoir :

- le fil hélicoïdal,
- le forage pneumatique,
- la haveuse à carbure,
- la haveuse à chaîne diamantée,
- la machine à disques Requin,
- le câble diamanté.

Notre comparaison s'applique à l'extraction de la pierre bleue belge (dureté shore 60) et est présentée dans le tableau III.

TABLEAU III

Facteurs du coût d'exploitation		Techniques d'extraction					
		Fil hélicoïdal	Forage pneumat.	Haveuse au carbure	Haveuse au diamant	Machine Requin	Câble diamanté
Investissement	FB	1.260.000	150.000	4.200.000	5.100.000	4.600.000	600.000
Amortissement	Taux	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Temps de travail annuel (220 jours/8 h)	Heures	1.760	1.760	1.760	1.760	1.760	1.760
Energie et eau consommées	FB/h	30	35	50	210	120	50
Main-d'œuvre	FB/h	2.000	1.000	1.250	750	500	500
DEBIT	m^2/h	1,3	0,75	1,5	4	6	3
Amortissement	FB/m^2	110	23	318	145	87	23
Energie et eau	FB/m^2	23	47	33	53	20	17
Main-d'œuvre	FB/m^2	1.540	1.333	833	188	83	167
Coût outil	FB/m^2	300	46	322	1.352	120	550
Prix de revient total	FB/m^2	1.973	1.449	1.506	1.738	310	757

La comparaison ci-dessus montre l'importance relative des différents facteurs du prix de revient pour chaque méthode d'extraction.

Elle ne reprend cependant pas des éléments spécifiques à chaque site d'exploitation comme la structure du gisement (délit, fractures, etc.) et de l'infrastructure existante (moyens de manutention, recyclage d'eau, etc.). Un autre facteur important qui n'a pas été pris en compte concerne les rendements à l'extraction et les dimensions des blocs demandés pour les ateliers de sciage.

L'intégration de tous ces éléments du coût global d'extraction doit donc se faire pour chaque carrière de manière à y définir une comparaison du prix de revient du m^3 extrait pour chaque méthode d'extraction envisagée.

5. *CONCLUSIONS*

Si l'on considère le point de vue financier de la technique du sciage au câble diamanté, celle-ci permet de substantielles réductions des coûts d'exploitation par rapport aux moyens conventionnels (forage pneumatique, fil hélicoïdal), tout en ne nécessitant qu'un faible investissement par rapport aux moyens de sciage plus sophistiqués tels que les haveuses et les machines Requin.

Du point de vue de l'exploitant des carrières, le câble diamanté peut apporter beaucoup de solutions aux problèmes d'extraction grâce essentiellement à la maniabilité et la facilité de mise en œuvre des machines à câble diamanté. Celles-ci peuvent en effet être disposées aisément dans des environnements topographiques difficiles comme à Carrare ou comme dans les pentes relativement fortes (20 %) de la carrière du Hainaut (Belgique). Il ne faut cependant pas considérer cette technique comme une panacée universelle, permettant de résoudre tous les problèmes de coupe en carrière.

Il est par exemple évident que de longs traits verticaux sur des bancs horizontaux d'épaisseur régulière seront sans doute mieux exécutés par des haveuses ou des machines à disque du type Requin et à des prix de revient moindres.

Par conséquent, la technique d'extraction au câble diamanté doit être intégrée dans un plan général d'exploitation de la carrière en tant qu'outil complémentaire aux autres techniques de sciage. Les figures présentées au début de l'exposé donnent une idée des complémentarités qui peuvent exister dans ce domaine.

Une autre limite à l'utilisation du câble diamanté est liée aux caractéristiques des roches à scier. Actuellement, les rendements de sciage sont intéressants uniquement dans les roches du type marbre, calcaire ou travertin.

Les essais de sciage dans des matériaux plus durs tels que le granite ont donné des résultats encourageants mais pas encore satisfaisants. Pour de telles roches, les perles à concrétion sont d'une efficacité meilleure que les perles en liant électrolytique. Ce meilleur comportement des perles à concrétion n'a pas encore pu être mis en évidence dans les marbres et les calcaires; des essais de sciage avec ce type de perles sont actuellement en cours d'exécution à Carrare.

Quant à la qualité des surfaces coupées au moyen du câble diamanté, celle-ci est meilleure que celle des surfaces sciées au fil hélicoïdal et comparable à celle des traits de haveuse. L'épaisseur des traits de sciage au câble diamanté (10 mm) est supérieure à celle des traits du fil hélicoïdal (3 mm) et inférieure à celle des traits de haveuse (40 mm). Ce dernier critère peut parfois aussi être important, car il peut influencer les conditions de décollement des blocs sciés.

Techniques modernes de production de dallages en marbre

Carlo BAZZANI *

Les difficultés rencontrées lors de l'élaboration des granites, des marbres et des pierres dures sont bien connues. J'entends par pierres dures les matériaux naturels colorés qui, bien que considérés comme marbres, ne sont pas exclusivement constitués de carbonate de calcium, ce qui les rend difficiles à travailler et principalement à tailler.

Généralement, les pierres sont taillées à l'aide de disques ou de lames à segments diamantés.

Ces outils ont connu un succès important pour le travail des marbres et des pierres de dureté moyenne. En effet, ils permettent d'augmenter considérablement la production sans nécessiter des dépenses supplémentaires prohibitives. Ceci n'est malheureusement pas le cas pour les granites et les marbres durs, le rendement de coupe étant très faible et le coût du travail prohibitif.

Ce dernier point est important et mérite un développement approfondi, car la demande de produits manufacturés en granites et en marbres colorés est en effet sans cesse croissante.

La solution la mieux adaptée à ce problème consiste à élaborer les produits finis en continu, à l'aide de plusieurs machines fonctionnant en série. De telles installations effectuent toutes les opérations d'élaboration automatiquement jusqu'au stade ultime de l'emballage des produits manufacturés. Ce mode de production permet d'éliminer les temps morts dus principalement au chargement et au déchargement et réduit donc fortement la main-d'œuvre qui constitue un facteur prépondérant dans le coût total de production.

Un autre facteur économique important est la diminution de l'épaisseur du produit manufacturé pour augmenter le rendement en m² de surface des blocs.

Les installations dont il a été question précédemment sont utilisées depuis longtemps pour l'élaboration des marbres de dureté moyenne. Elles ne constituent donc pas en elles-mêmes une nouveauté. La nouveauté consiste à les utiliser pour les granites et les marbres très durs, c'est-à-dire principalement les marbres colorés qui sont actuellement de plus en plus demandés par la clientèle. Ceci s'explique sans doute par le charme de leur beauté naturelle qui n'est en rien comparable aux aspects de surface donnés aux produits artificiels (les céramiques par exemple).

Les modifications apportées aux machines concernent principalement les polisseuses qui ne requièrent plus l'emploi d'appareils de calibrage à concrétion diamantée. On a également dû employer des coupe-blocs à plusieurs disques. La nécessité de scier les matériaux durs en plusieurs passes limite fortement la production et seules les machines multidisques peuvent garantir des débits importants. Le nombre de disques peut aller jusqu'à 20 et, dans ces conditions, les performances des machines dépassent de loin celles des châssis à pulpe abrasive ou diamantés.

Ces machines sont également équipées d'un disque horizontal permettant de donner une hauteur déterminée aux tranches débitées. Ces dernières devront alors être soumises à d'autres traitements parmi lesquels il faut citer la mise à dimension, le polissage, le biseautage, etc...

Le transport des produits manufacturés d'une machine à l'autre est assuré par bandes transporteuses.

Etant donné leur automatisation poussée, ces installations ne nécessitent plus la présence que de quatre ouvriers qui contrôlent les machines et de deux ouvriers pour la décharge. La production moyenne dépasse facilement 130 m².

La visite aux installations Comarbel de Franchimont sera une bonne illustration des possibilités offertes par les machines évoquées dans cette communication.

Je regrette de ne pas pouvoir approfondir davantage cet exposé en expliquant les détails du fonctionnement de ces machines et les avantages qu'elles apportent.

* Ingénieur, Directeur de l'O.M.B., Via Passo Volpe 11, 54031 Carrare Avenza, Italie.

L'importance du marbre dans le monde et les perspectives d'exportation des marbres belges

Willy MONFILS *

RESUME

Le marbre belge est réputé à l'étranger, notamment en France, aux Pays-Bas, en Italie, nos principaux débouchés. Si la demande mondiale pour ce matériau augmente, l'offre croît également car, outre les grands producteurs, des pays comme le Sénégal, le Pakistan, l'Uruguay... essaient de valoriser une industrie locale. La construction reste le débouché principal pour les exportations de marbres belges, tant en Europe que dans certains pays en voie de développement (du Moyen-Orient par exemple) où les grandes infrastructures ont été réalisées mais qui prévoient encore la construction d'immeubles de prestige. Enfin, le marché des matériaux pour objets de décoration offre des possibilités, de même que la construction de monuments funéraires. Deux obstacles à l'exportation du marbre belge : son prix élevé et la concurrence italienne. L'aide de l'Office belge du Commerce extérieur en ce domaine : organisation de journées de contact « matériaux de construction »; participation à certaines foires spécialisées dans la construction ou octroi de subsides pour une participation à ces foires; réalisation d'études de marché; diffusion d'informations sur les projets de construction; aide financière du Fonds du Commerce Extérieur.

SAMENVATTING

Het Belgisch marmer is vermaard in het buitenland, onder meer in Frankrijk, Nederland en Italië, onze voornaamste afzetgebieden. Indien de wereldaanvraag voor dit materiaal toeneemt, dan stijgt het aanbod eveneens, want behalve de grote producenten, trachten landen zoals Senegal, Pakistan, Uruguay... een plaatselijke nijverheid te valoriseren. De bouwnijverheid blijft het voornaamste afzetgebied voor de uitvoer van Belgisch marmer, zowel in Europa als in bepaalde ontwikkelingslanden (het Midden-Oosten bijvoorbeeld) waar de grote infrastructuren verwezenlijkt werden maar die de bouw van prestigegebouwen nog voorzien. Tenslotte biedt de markt van materialen voor siervoorwerpen mogelijkheden, evenals de vervaardiging van grafmonumenten. Twee factoren vormen een hinderpaal voor de uitvoer van Belgisch marmer : zijn hoge kostprijs en de Italiaanse concurrentie. De steun van de Belgische Dienst voor Buitenlandse Handel op dat gebied : organisatie van contactdagen « bouwmaterialen »; deelname aan bepaalde jaarbeurzen gespecialiseerd in de bouwnijverheid of toekenning van toelagen voor een deelname aan deze jaarbeurzen; verwezenlijking van marktstudies; verspreiding van informaties inzake de bouwontwerpen; financiële steun van het Fonds voor Buitenlandse Handel.

* Directeur général de l'Office Belge du Commerce Extérieur, W.T.C. tour 1, Boulevard E. Jacqmain 162, 1000 Bruxelles.

ZUSAMMENFASSUNG

Der belgische Marmor ist im Ausland sehr berühmt, insbesondere in Frankreich, den Niederlanden und Italien, wo unsere wichtigsten Absatzmärkte sind. Wenn die weltweite Nachfrage nach diesem Material steigt, nimmt ebenfalls das Angebot zu, da neben den großen Produzenten Länder wie der Senegal, Pakistan, Uruguay,... versuchen, eine lokale Industrie zur Geltung zu bringen. Die Bauindustrie bleibt der hauptsächliche Absatzmarkt für den Export von belgischem Marmor, und zwar sowohl in Europa als auch in gewissen Entwicklungsländern (zum Beispiel im Mittleren Osten), wo die großen Infrastrukturen verwirklicht worden sind, aber wo noch der Bau von Prestigegebäuden vorgesehen ist. Schließlich bietet der Markt der Materialien für Dekorationsgegenstände, sowie der Bau von Grabdenkmälern weitere Möglichkeiten. Für den Export des belgischen Marmors gibt es zwei Hindernisse : sein hoher Preis und die italienische Konkurrenz. Die Hilfe der belgischen Außenhandelsstelle auf diesem Gebiet umfaßt : Organisation von « Kontakt-Tagen » für Baumaterialien; Teilnahme an gewissen Fachmessen der Bauindustrie oder Gewährung von Zuschüssen für eine Teilnahme an diesen Messen; Durchführung von Marktstudien; Weiterleitung von Informationen über Bauprojekte; finanzielle Hilfe des Außenhandelsfonds.

SUMMARY

Belgian marble is highly prized abroad, especially in France, the Netherlands and Italy - which are our major markets. While the world demand for our marble is on the increase the world offer is also growing; in addition to the big producing countries, others like Senegal, Pakistan and Uruguay are trying to develop their local industries. It is for architectural uses that marble is primarily wanted, and this field forms the principal outlet for Belgian exports either to other European countries or to certain developing countries, e.g. in the Middle East, where large infrastructure projects have been completed, but which include plans for prestige buildings. Lastly, there are sales possibilities in the field of decorative articles and of gravestones. There are two obstacles to Belgian exports of marble : i) its high price and ii) Italian competition. The Office belge du Commerce Extérieur (Belgian Export Trade Bureau) helps in the following ways : organizing one-day meetings on building materials, participating in certain trade exhibitions specialized in the building trade, or subsidizing a presence at such exhibitions; carrying out market studies; distributing information on building projects; financial aid from the Fonds du Commerce Extérieur (Export Trade Fund).

Le *marbre,* matériau noble par excellence, constitue une des richesses de la région wallonne qui, jusqu'à présent, n'a pas été suffisamment valorisée.

Il faut, dès lors, se féliciter que le marbre ait été choisi comme thème de ces Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale qui, je l'espère, contribueront à mieux faire connaître le marbre belge et dont se dégageront certainement des recommandations concernant la mise en valeur et l'exploitation des sites marbriers belges.

Il m'a été demandé de traiter de l'*importance du marbre dans le monde et des perspectives d'exportation des marbres belges.*

Je n'aborderai donc pas l'aspect descriptif de l'industrie marbrière belge, sujet qui sera abordé par d'autres conférenciers. Je me propose plutôt de vous brosser un tableau de la *production mondiale* avant d'aborder le problème des exportations des marbres belges.

Il existe, comme vous le savez, de nombreuses variétés de marbres, exploitées principalement dans les pays européens. Les *principaux producteurs* en sont, outre notre pays, l'Italie, la France, l'Espagne, le Portugal, la Grèce, la Yougoslavie, la Suisse, l'URSS, la Roumanie, la Suède et la Norvège.

Il existe également une production hors d'Europe, notamment en Israël, au Maroc, en Tunisie, au Proche-Orient, au Japon, au Pakistan, en Thaïlande, au Brésil, au Chili, en Uruguay.

Une *caractéristique* commune à ces pays est qu'ils sont à la fois exportateurs, mais également importateurs de marbre. En effet, si la production locale est généralement suffisante pour satisfaire les besoins du pays et permettre également un commerce d'exportation, par contre, les préférences des utilisateurs locaux pour des marbres d'autres variétés et couleurs favorisent un courant d'importation.

La production de marbre dans le monde ne se limite pas aux seuls pays que je viens de citer. A côté de ceux-ci apparaissent de *nouvelles productions* dans certains pays en voie de développement. Des études géologiques, entreprises le plus souvent avec l'assis-

tance de l'ONUDI, ont permis de déceler des gisements dans des pays comme le Sénégal, le Soudan, le Mali, l'Uruguay, la Jamaïque, Haïti, etc.

Les marbres exploités par ces pays seront destinés, dans une première phase, au marché intérieur et viendront donc se substituer aux importations; dans une seconde phase, la production sera suffisante pour passer à l'exportation.

Un exemple à ce sujet, celui du Sénégal, qui encourage tout projet d'exploitation des marbres du Sénégal oriental.

Ce rapide tour d'horizon de la production de marbre dans le monde permet de constater que l'offre mondiale pour ce matériau va tendre à augmenter dans les années à venir.

En sera-t-il de même de la demande mondiale ?

On peut raisonnablement penser que la consommation de marbre des pays non producteurs va continuer à augmenter dans les prochaines années.

A quel niveau se situe cette consommation ?

Il est évident que le *marché de la construction* reste le débouché principal. La demande des pays européens où l'industrie du bâtiment connaît toutefois quelques difficultés n'est pas négligeable.

D'autre part, on note un accroissement des besoins en construction des pays en voie de développement, besoins importants au niveau du logement mais aussi en équipements de tous ordres, tels les immeubles de bureaux, les bâtiments d'exposition, les écoles, les ministères, les palais présidentiels ou autres, les ambassades, etc.

Le décollage économique de certains pays en voie de développement entraîne la construction de grands équipements de prestige. L'Afrique en est un des meilleurs exemples. On note également le boom immobilier de Singapour et de la Malaisie où fleurissent villes nouvelles et complexes hôteliers.

Le Moyen-Orient évidemment reste attractif, bien que les grandes infrastructures aient été réalisées : c'est par exemple le cas des aéroports, ports et équipements urbains construits dans les Emirats arabes unis.

En Arabie Saoudite, les objectifs qui demeurent en matière de construction sont révisés à la baisse.

Il faut savoir également que certains pays africains, en raison de leurs difficultés financières, se voient contraints, parfois sous la pression de la Banque Mondiale ou du FMI, de limiter leur endettement, ce qui les conduit à freiner leur programme de construction de bâtiments.

De même, on peut se demander si l'Egypte qui s'était lancée, sous le Président Sadate, dans une politique ambitieuse de création de villes nouvelles, poursuivra dans cette voie.

Enfin, des possibilités de débouchés existent également dans le domaine des ouvrages destinés à l'ameublement et à la décoration, tels les dessus de tables ou meubles, les bibelots de tous genres, les sculptures, les articles sanitaires de luxe, etc. et enfin les monuments funéraires.

On retiendra de tout ceci que bon nombre de possibilités s'offrent à l'industrie belge du marbre. Mais sont-elles suffisamment exploitées ?

Avant d'essayer de répondre à cette question, il importe de tracer les grandes lignes du *commerce extérieur du marbre* en Belgique (1).

En 1980, les exportations se sont chiffrées à :

- 8.887.000 francs belges pour les marbres en blocs,
- 60.449.000 francs belges pour les marbres sciés,
- 71.694.000 francs belges pour les marbres polis.

Quant aux importations, elles se sont élevées à :

- 71.361.000 francs belges pour les marbres en blocs,
- 82.281.000 francs belges pour les marbres sciés,
- 461.434.000 francs belges pour les marbres polis.

Ces chiffres font ressortir immédiatement l'importance des importations par rapport aux exportations et la nécessité qui en découle d'un effort spécial de promotion des marbres belges à l'étranger.

Jusqu'à présent, nos principaux clients ont été la France, la RFA, les Pays-Bas et même l'Italie.

L'*analyse des statistiques d'exportation de la Communauté Economique Européenne en 1980,* traitées par ordinateur par l'OBCE selon un programme dénommé « Asmodée », a permis de comparer la position concurrentielle des marbres et travertins belges sur les marchés étrangers à celle des partenaires de la CEE.

En ce qui concerne les marbres et travertins d'une épaisseur de plus de 25 cm, on constate que notre principal concurrent est l'Italie. Ainsi, la part de l'UEBL dans les exportations de la Communauté est de :

. 5 % sur le marché français contre 95 % pour l'Italie;
. 3 % sur le marché néerlandais contre 90 % pour l'Italie et 7 % pour la RFA;
. 16 % sur le marché italien contre 52 % pour la France, 31 % pour la RFA;
. près de 1 % sur le marché saoudien contre 98 % pour l'Italie et 1 % pour la France.

---

(1) Statistiques de l'Union des Carrières et Scieries de Marbre de Belgique.

Pour les marbres et travertins d'une épaisseur inférieure à 25 cm, notre position concurrentielle est légèrement plus favorable, notre quote-part dans les exportations de la CEE étant de :

. 3 % sur le marché français contre 95 % pour l'Italie;
. 42 % sur le marché néerlandais contre 51 % pour l'Italie;
. 6 % sur le marché allemand contre 80 % pour l'Italie, 10 % pour la France;
. 2 % sur le marché britannique contre 96 % pour l'Italie;
. 2 % sur le marché danois contre 98 % pour l'Italie;
. 5 % sur le marché suédois contre 91 % pour l'Italie;
. 33 % sur le marché finlandais contre 67 % pour l'Italie;
. 3 % sur le marché espagnol contre 97 % pour l'Italie;
. 3 % également sur le marché américain contre 96 % pour l'Italie;
. 5 % sur le marché de Hong Kong contre 95 % pour l'Italie;
. 9 % sur le marché australien contre 91 % pour l'Italie.

Que *conclure* de cette analyse ?

- Tout d'abord que la *concurrence italienne* est très forte et ceci en raison

. d'une part, de la gamme étendue des marbres italiens qui couvre de très belles variétés telles que le marbre de Carrare;
. et, d'autre part, des prix plus bas pratiqués par les marbriers italiens.

- Il ressort des études de marchés réalisées jusqu'à présent, dans certains pays arabes notamment, que les prix belges ne sont pas suffisamment compétitifs par rapport aux prix italiens.

- Ensuite que l'*éventail de nos clients est assez restreint.*

Il est vrai que, outre la concurrence du marbre italien et la pratique de prix peu compétitifs, l'industrie marbrière en général et belge en particulier doit également supporter la concurrence d'autres matériaux moins coûteux, comme le granit dur, d'origine africaine ou scandinave, ou les céramiques. Ces matériaux présentent en effet des avantages certains par rapport au marbre. Ainsi le granit est plus résistant aux intempéries, ce qui est un élément important dans des pays à climat plus rude, présentant de grands écarts de températures.

Ne dit-on pas que le granit, ce matériau avec lequel furent construits les temples de l'Ancienne Egypte, va être remis à l'honneur dans ce pays ? L'Egypte compte, en effet, remettre en exploitation ses carrières de granit et produire ainsi un matériau plus dur et moins cher que le marbre italien importé.

Ces éléments que je viens de citer, et qui semblent à première vue peu favorables au marché du marbre dans son ensemble, ne doivent toutefois pas nous faire oublier toutes les possibilités offertes aux exportations de marbre.

Le marbre est un des matériaux de construction pour lesquels la demande a le plus augmenté ces dernières années et il semble bien qu'il en sera de même dans les années à venir.

Que faut-il faire dès lors pour stimuler les exportations de marbres belges ?

Quelle est l'aide que l'OBCE peut apporter à ce sujet ?

Je rappellerai tout d'abord que le *rôle de l'Office belge du Commerce extérieur* est d'encadrer les entreprises belges et luxembourgeoises en matière de promotion des exportations.

Pour mener à bien cette tâche, l'OBCE s'appuie, tant sur des activités fondamentales à caractère permanent, telles que par exemple la diffusion d'informations relatives au commerce international ou le lancement d'études ou d'enquêtes de marchés, que sur des activités plus spécifiques comme l'organisation de missions, de journées de contact, la participation aux foires et salons spécialisés dans le monde, etc.

En ce qui concerne les activités plus spécifiquement destinées à encourager le secteur qui nous occupe aujourd'hui, je citerai :

- *L'organisation, en Belgique, de journées de contact « matériaux de construction ».*

Lors de ces journées, les fabricants ont la possibilité de rencontrer notamment des importateurs, des détaillants importants, des candidats agents susceptibles d'être intéressés par les produits présentés. Ainsi, la journée de contact « matériaux de construction » organisée récemment à Liège comptait la présence de quelque soixante acheteurs étrangers venus de RFA, France, Pays-Bas et Grande-Bretagne.

Ces acheteurs étaient des représentants de bureaux d'architectes importants, des architectes conseillers de promoteurs de grands ensembles, des grossistes en matériaux de construction, des entrepreneurs généraux de villas et maisons individuelles et des responsables d'administrations chargés des services bâtiments et travaux publics.

- *La participation à certaines foires spécialisées dans le domaine de la construction.*

En 1980 et 1981, l'OBCE a participé officiellement à la « Middle East Construction Exhibition » à Djeddah. Cette foire figure au programme des foires subsidiées par l'OBCE en 1982 (20-25/01), de même que la manifestation « Construction Indonesia » qui aura lieu à Jakarta du 2 au 6 mars 1982.

- *La diffusion d'informations sur les projets de construction par le biais des fichiers informatisés de l'OBCE.*

Il s'agit plus spécialement des fichiers « Flash » et « Flashfin » qui diffusent, auprès des entreprises répertoriées au fichier des exportateurs belges, des avis relatifs à des projets de développement, des contrats conclus à l'étranger par des entreprises étrangères et éventuellement belges, des projets industriels ou des grands projets financés par les institutions financières internationales, dont la Banque Mondiale.

Ces informations peuvent être très utiles pour les entreprises à la recherche de débouchés à l'étranger.

Enfin, je dois vous dire un mot également au sujet du *Fonds du Commerce Extérieur* dont l'Office assume le secrétariat et qui, grâce à son soutien financier, encourage les efforts de prospection de nouveaux débouchés à l'étranger d'entreprises ou d'organismes belges. Ceci comprend la reconnaissance, la conquête et la stabilisation d'un marché, ainsi que des actions spécifiques telles que des voyages d'affaires dans le but de la poursuite des projets de grands travaux ou dans la recherche d'une préqualification, la soumission de pré-études gratuites de rentabilité, la participation à des adjudications internationales ou à des appels d'offres de gré à gré par la soumission de pré-études à prix réduits, etc.

Comme vous pouvez le constater, l'OBCE met à la disposition des entreprises une série de services auxquels elles ont intérêt à recourir. L'OBCE peut aider les entreprises à conquérir de nouveaux marchés pour autant que celles-ci aient la volonté d'exporter car, en définitive, l'exportation reste l'affaire des entreprises elles-mêmes.

Pour conclure, je dirai que les perspectives d'exportation qui s'offrent à l'industrie marbrière belge sont bonnes, que le marbre belge jouit d'une bonne réputation sur les marchés étrangers et que, si une production de marbre se développe dans certains pays, notamment au Proche-Orient, il existera toujours un courant d'importation, l'utilisateur local ayant souvent tendance à penser que les marbres importés sont de meilleure qualité et ont plus de classe.

Je ne peux dès lors qu'encourager les producteurs belges de marbre à se montrer plus combatifs sur les marchés étrangers afin de saisir les opportunités d'affaires qui se présentent et, dans ce contexte, à faire davantage appel aux services que l'Office belge du Commerce extérieur met à leur disposition.

Analyse des exportations et des importations de marbres de Belgique

Victor NETELS *

RESUME

L'étude retrace l'évolution de nos exportations et importations de produits marbriers durant la période 1960-1980. On y distingue le commerce de produits marbriers bruts (blocs), semi-finis (sciés et/ou taillés) et finis (marbres divers et pierres marbrières polis).

Notre situation exportatrice tend à s'assainir, l'exportation des blocs a drastiquement diminué, alors qu'une légère tendance positive à l'exportation de produits marbriers semi-finis et finis est manifeste. Les importations de produits bruts et semi-finis décroissent de façon continue et importante depuis 1975. Ce fait attesterait d'une moindre activité industrielle du secteur marbrier. Par contre, les tonnages des produits finis importés augmentent constamment depuis 1960.

Nous constatons donc que la demande de marbre existe toujours dans notre pays mais que, malgré des efforts importants de nos marbriers, cette demande reste jusqu'à présent essentiellement satisfaite par les produits finis étrangers.

SAMENVATTING

De studie schetst de evolutie van onze invoer en uitvoer van marmerprodukten gedurende de periode 1960-1980. Men onderscheidt er de handel in ruwe marmerprodukten (blokken), half-afgewerkte (gezaagde en/of behouwen) en afgewerkte (diverse marmers en gepolijste marmerstenen).

Onze uitvoersituatie wordt weer gezond, de uitvoer van blokken is drastisch verminderd, terwijl een lichte positieve tendens tot de uitvoer van half-afgewerkte en afgewerkte marmerprodukten zich uit. De invoer van ruwe en half-afgewerkte produkten neemt op een voortdurende en belangrijke wijze af sinds 1975. Dit feit zou getuigen van een vermindering van de industriële werkzaamheden in de marmersector. Daarentegen verhoogt het aantal ton van de ingevoerde afgewerkte produkten voortdurend sinds 1960.

Wij stellen dus vast dat er nog altijd vraag naar marmer bestaat in ons land maar dat, niettegenstaande de belangrijke inspanningen van onze marmerbewerkers, tot nog toe aan deze vraag hoofdzakelijk voldaan wordt door de buitenlandse afgewerkte produkten.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung schildert die Entwicklung unserer Exporte und Importe von Marmorprodukten während des Zeitraums von 1960 bis 1980. Dabei wird unterschieden zwischen dem Handel von Marmor-Rohprodukten (Blöcken), Marmor-Halbfertigpro-

SUMMARY

This article describes the trend in Belgian exports and imports of marble products from 1960 to 1980, showing separately the trade in raw marble (blocks),

* Chercheur à l'Université Libre de Bruxelles, avenue F.D. Roosevelt 50, B-1050 Bruxelles.

dukten (gesägt und/oder behauen), und Marmor-Fertigprodukten (verschiedene Marmorprodukte und polierte Marmorsteine).

Unsere Exportsituation scheint zu gesunden; der Export von Blöcken ist drastisch zurückgegangen, während eine leichte positive Tendenz beim Export von Marmor-Halbfertigprodukten und Marmor-Fertigprodukten zu erkennen ist. Die Importe von Roh- und Halbfertigprodukten gehen seit 1975 kontinuierlich und kräftig zurück. Diese Tatsache könnte auf eine verminderte industrielle Aktivität des Marmorsektors hinweisen. Die Tonnagen der importierten Fertigprodukte nehmen dagegen seit 1960 ständig zu.

Wir stellen also fest, daß in unserem Lande immer noch eine Nachfrage nach Marmor vorhanden ist, aber daß trotz der großen Anstrengungen unserer Marmorverarbeiter diese Nachfrage bis jetzt im wesentlichen durch ausländische Fertigprodukte befriedigt wird.

semi-finished products (sawn and/or cut), and finished products (various types of marble and polished marble).

The export situation is becoming healthier; the export of marble in blocks has fallen off markedly, and there is a slight increase in the exports of semi-finished and finished marble products. Imports of raw and semi-finished products have been declining steadily and appreciably since 1975; this indicates a reduction in the activity of the marble industry. On the other hand, the tonnages of finished products imported have risen constantly since 1960.

Thus there still exists a demand for marble in Belgium; however, despite considerable efforts by our marble producers, the major part of this demand is met by finished products from abroad.

---

1. *AVANT-PROPOS*

L'étude présentée ci-après porte sur l'évolution des exportations belges entre 1960 et 1980, c'est-à-dire durant les 20 dernières années. Les chiffres que nous interprétons proviennent de l'Office Belge du Commerce Extérieur (O.B.C.E.) [1], ainsi que de l'Union des Carrières et Scieries de Marbres de Belgique [2].

Les exportations seront étudiées sous leur aspect tonnage et seront dès lors toujours exprimées en tonnes.

2. *ANALYSE DES EXPORTATIONS : SOUS FORME DE BLOCS*

2.1. *Introduction*

La dénomination « blocs » ** correspond à la classe suivante dans la nomenclature commerciale belge, définie par l'Office Belge du Commerce Extérieur :

- 2515.30 de 1960 à 1972
- 2515.11 de 1973 à 1975
- 2515.110 à partir de 1976.

La classe 2515.110 est celle des « Blocs marbres et travertins » [1]. Rappelons toutefois que le sous-sol de la Belgique ne recèle aucun gisement de travertin. D'autre part, le tonnage total exporté ne représente pas nécessairement la production de blocs de nos carrières. En effet, notre pays est aussi une zone de transit dans le commerce européen.

2.2. *Evolution globale*

Le tonnage total exporté a diminué de 6.720 t en 1960 à 1.050 t en 1980. Cette diminution affecte à des degrés variables l'ensemble des exportations vers chacun des principaux pays acquéreurs de nos blocs. Les chiffres sont à cet égard éloquents. Les exportations vers nos principaux partenaires ont évolué de la façon suivante :

	1960	1980
Allemagne	1.295 t	72 t
France	1.658 t	432 t
Italie	487 t	433 t

L'Italie constitue un cas particulier; le chiffre de 1980 est en très légère régression par rapport à celui de 1960. L'ensemble des autres pays (regroupés dans la statistique sous la rubrique « Autres pays » et à partir de 1970 « Autres pays + Espagne, Pays-Bas, Grande-Bretagne ») montrent la même tendance à la régression. Le tonnage exporté s'élevait à 3.250 t en 1960, ce qui représentait plus de 50 % du total. En 1980, il n'était plus que de 113 t et ne représentait que 10 % du total de nos exportations.

** Le terme correct est « marbre brut en blocs » que nous réduisons à « blocs » pour ne pas alourdir le texte.

La figure 1 montre l'évolution générale au cours de ces 20 dernières années. On constate que :

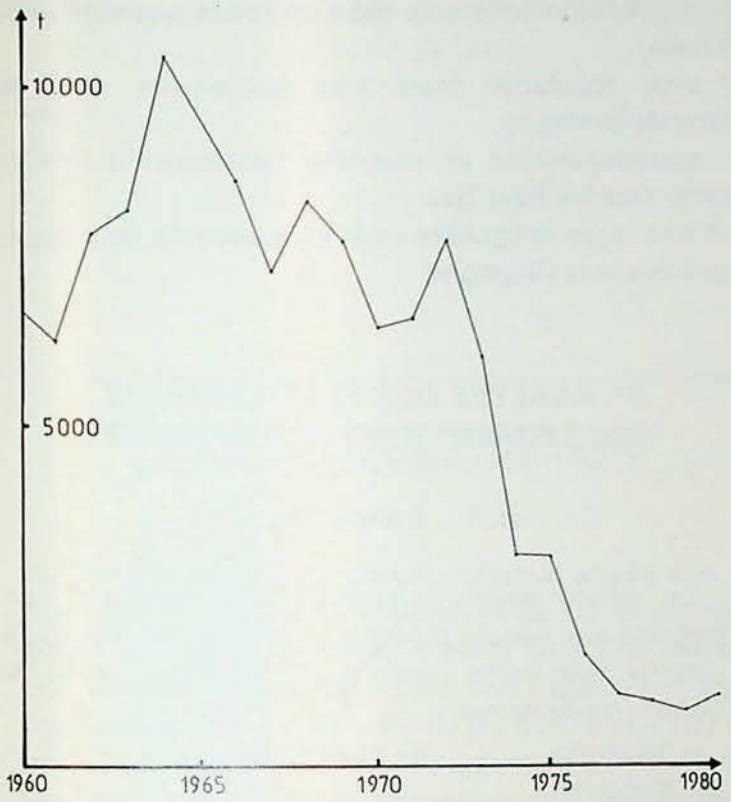


Fig. 1 : Exportation totale de marbres de Belgique sous forme de blocs (1960-1980) [2]

- la période 1960 à 1964 montre un développement constant de nos exportations qui atteignent en 1964 leur maximum avec 10.443 t;
- la période de 1965 à 1966 correspond à une décroissance continue;
- à partir de 1967 et jusqu'en 1972, nos exportations se maintiennent à un niveau élevé, supérieur à 7.000 t/an. Deux exceptions : 1970 et 1971, années où les quantités exportées étaient respectivement de 6.444 t et de 6.614 t;
- 1973 marque le début d'une diminution systématique et impressionnante de nos exportations, 6.059 t en 1973 et 823 t en 1979;
- le résultat de 1980 avec 1.050 t, soit 28 % d'augmentation par rapport au résultat de 1979, marque peut-être le début d'une nouvelle période de croissance ou du moins de relative stabilité.

2.3. *Evolution ventilée selon les pays acquéreurs*

L'évolution, par pays, est représentée sur la figure 2.

2.3.1. *Principaux pays importateurs*

On constate que, si l'on se limite aux trois meilleurs clients, Allemagne, France et Italie, trois périodes évolutives majeures se dessinent pour ces 20 dernières années.

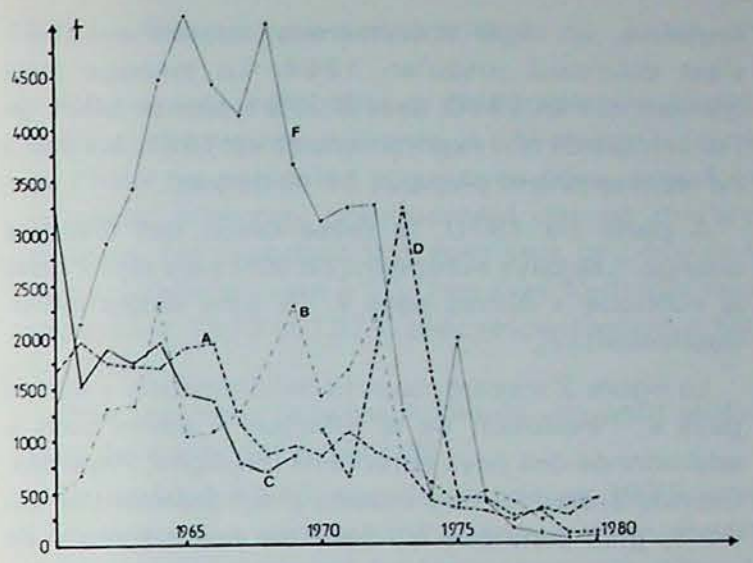


Fig. 2 : Exportation de marbres de Belgique sous forme de blocs, ventilée par pays acquéreurs (1960-1980)

F : Allemagne
A : France
B : Italie
C : Autres pays
D : 1970. Autres pays + Pays-Bas, Grande-Bretagne et Espagne [2]

Durant la première, les exportations belges augmentent ou restent stables (cas de la France). Ainsi, nos exportations, entre 1960 et 1968, vers l'Allemagne (notre importateur le plus important) sont passées de 1.295 t à 5.022 t. Cette période se termine en 1963 pour l'Italie, se prolonge jusqu'en 1967 pour la France et 1968 pour l'Allemagne.

Au cours de la deuxième période, qui se prolonge jusqu'en 1975 pour l'Allemagne et 1973 pour les autres pays, les exportations sont demeurées stables, mais après avoir subi une importante et assez brutale diminution. Durant cette période, l'Allemagne reste notre principal pays importateur pour ce type de matériau marbrier. Dans le cas de l'Italie, il faut souligner 3 années remarquables (1964, 1969, 1972) par le niveau exceptionnellement élevé des exportations belges (supérieur à 2.000 t/an).

Au cours de la troisième période qui s'arrête en 1979, on assiste à une diminution très nette des exportations. Pour le commerce avec l'Allemagne par exemple, l'année 1976 avec 358 t, soit 82 % de diminution par rapport à 1975, marque le déclin de notre commerce avec ce pays. Pour l'Italie, le niveau moyen des exportations (400 t/an) durant cette période est comparable aux résultats de 1960.

1980 est une année de reprise pour nos exportations vers la France, celles à destination de l'Allemagne ne représentent plus que 72 t.

2.3.2. *Autres pays*

De 1960 à 1970, nous constatons une diminution continue, régulière et rapide de nos exportations;

toutefois, un léger redressement amorcé en 1961 s'est poursuivi jusqu'en 1964. Le tonnage total représentait en 1960, avec 3.279 t, plus de 50 % de l'ensemble de nos exportations et, en 1969, les 857 t ne représentaient plus que 11 % du total.

A partir de 1970, la présentation des résultats change. Les pays européens ne sont plus repris dans la rubrique « Autres pays ». Ils sont traités individuellement [2].

La figure 2 montre, sous la dénomination « autres pays », l'évolution de la rubrique « autres pays » additionnée des pays européens (Espagne, Pays-Bas, Grande-Bretagne) non étudiés précédemment et qui ont le plus contribué à l'achat de nos « blocs » de marbre.

De 1970 à 1980, nos exportations diminuent assez régulièrement si l'on excepte un boom de 2 ans (1973 et 1974). Cette reprise est la conséquence d'une forte augmentation de nos exportations à destination des Pays-Bas; en 1973, 2.758 t sur un total de 3.216 t — soit environ 85 % — et, en 1974, 1.067 t sur un total de 1.640 t — soit 65 % environ. Nos exportations à destination de l'Espagne ne sont nullement à négliger. Sans atteindre les tonnages épisodiques à destination des Pays-Bas, elle constitue dans ce groupe notre principal pays acquéreur en 1971 et 1972 et ensuite à partir de 1975. A quelques années de distance, les exportations varient de 604 t (1972) à 48 t seulement (en 1980). Les mêmes fluctuations affectent notre commerce avec la Grande-Bretagne, mais les tonnages annuels sont presque toujours restés inférieurs à 50 t/an.

2.4. *Conclusions partielles*

La diminution de nos exportations de marbre sous forme de « blocs » n'aurait pu être que la conséquence d'une volonté délibérée de nos marbriers. En effet, la plus-value apportée par l'exportation d'un matériau façonné, travaillé et élevé profite directement aux entreprises productrices. D'autre part, c'est une main-d'œuvre qualifiée qui élabore le produit fini, ce qui est d'une extrême importance. Cependant, la chute de nos exportations de « blocs » semble plutôt liée à l'abandon ou à l'arrêt momentané de carrières de marbres situées dans notre région wallonne. La baisse sensible de la production autochtone signifie ipso facto le déclin des exportations de « blocs ». Simultanément, on assiste de ce fait à une plus grande dépendance de la consommation nationale vis-à-vis de l'étranger et, d'une façon plus générale, à une main-mise des milieux marbriers étrangers sur ce secteur économique.

En conclusion, nous devons reconnaître que nos exportations se dirigent :

- de moins en moins vers l'Allemagne;
- de moins en moins vers la France;
- d'une façon constante mais en faible quantité vers l'Italie;
- avec régularité mais très faiblement vers la Grande-Bretagne;
- épisodiquement en quantité relativement importante vers les Pays-Bas;
- d'une façon irrégulière mais en quantités non négligeables vers l'Espagne.

3. *ANALYSE DES EXPORTATIONS : SOUS FORME SCIEE ET/OU TAILLEE*

3.1. *Introduction*

La dénomination « sciée et/ou taillée » correspond aux classes suivantes dans la nomenclature commerciale belge, définie par l'Office Belge du Commerce Extérieur :

	2515.60	de 1960 à 1969
et	6802.10	
	2515.60	de 1970 à 1972
et	6802.05	
	2515.41	de 1973 à 1975
et	6802.05	
	2515.410	à partir de 1976
et	6802.112	

La classe 2515.410 correspond à la rubrique « Tranches marbres et travertins » et la classe 6802.112 à « Marbres, Travertins taillés ou sciés » dans l'annuaire de l'Office Belge du Commerce Extérieur [1].

3.2. *Evolution globale*

L'évolution générale est dans son ensemble positive : 3.340 t en 1960, 5.819 t en 1980.

Nos exportations totales (fig. 3) de produits marbriers semi-finis se sont maintenues à un niveau stable de 1960 à 1969 avec un tonnage annuel moyen d'environ 3.300 t/an. Ce chiffre moyen cache bien entendu des variations annuelles parfois importantes. Une excellente année ponctue la période envisagée, 1961 avec 4.657 t. Il faut signaler aussi une mauvaise année, 1968 avec 2.442 t; elle est elle-même précédée de deux années de faiblesse relative, soit 2.700 t/an d'exportation au cours de chacune. De 1970 à 1973, nos exportations suivent une courbe ascendante; en 1972, la barrière des 4.000 t/an est franchie et le meilleur résultat de cette période est atteint durant l'exercice 1973 avec 4.917 t. A partir de 1974 et jusqu'en 1978, on assiste à un

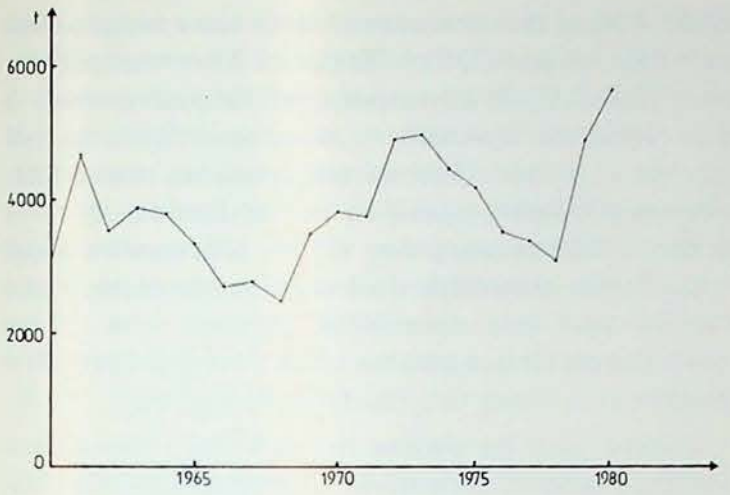


Fig. 3 : Exportation totale de marbres de Belgique sous forme sciée et/ou taillée (1960-1980) [2]

renversement de la situation : chaque année voit le total de nos exportations diminuer de 10 % par rapport à l'année précédente. A partir de 1979, les exportations totales enregistrent une forte augmentation, passant de 3.080 t en 1978 à 4.875 t en 1979, ce qui représente une augmentation de 60 %. Cette tendance positive s'est maintenue en 1980; la barrière des 5.000 t/an a été franchie pour la première fois, avec 5.819 t, ce qui représente encore une progression de 20 % par rapport au résultat de 1979.

3.3. *Evolution ventilée par pays acquéreurs*

L'évolution par pays est représentée sur la figure 4.

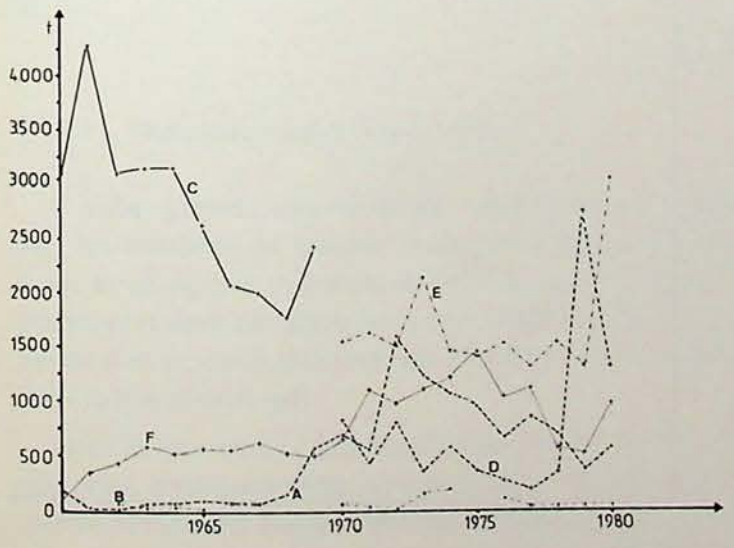


Fig. 4 : Exportation de marbres de Belgique sous forme taillée et/ou sciée ventilée par pays acquéreurs (1960-1980)
F : Allemagne
A : France
B : Italie
C : Autres pays
D : 1970 : autres pays
E : 1970 : pays européens (Espagne, Grande-Bretagne, Pays-Bas) [2]

3.3.1. *Principaux pays importateurs*

Nous examinerons dans ce paragraphe l'évolution des exportations vers la France et l'Allemagne. Le cas de l'Italie est particulier puisque ce pays, grand exportateur, n'importe pratiquement pas de marbres élaborés. Les exportations belges vers ce pays se limitent le plus souvent à 60 t/an avec toutefois deux exceptions, 1973 et 1974, avec respectivement 141 t et 182 t.

Pour nos deux principaux clients, on peut distinguer deux périodes évolutives.

De 1960 à 1973 pour la France et 1975 pour l'Allemagne, les exportations belges, tout en restant fluctuantes, progressent dans leur ensemble. Ainsi, le tonnage exporté vers l'Allemagne est passé de 91 t en 1960 à 1.438 t en 1975. Nos exportations vers la France sont restées faibles jusqu'en 1968 (200 t/an en moyenne) et atteignent leur maximum en 1972 avec 1.584 t.

Durant la deuxième période, on assiste à une chute importante des exportations. En 1979, les tonnages exportés n'étaient plus respectivement que de 349 t et 500 t.

En 1980, on assiste à une reprise : 946 t vers l'Allemagne (+ 90 % en 1 an) et 554 t vers la France (+ 15 %).

3.3.2. *Autres pays*

De 1960 à 1964, les exportations regroupées sous le vocable « autres pays » sont stables et se situent à 3.000-3.100 t/an avec un pic d'activité en 1961 propulsant nos exportations à 4.287 t. A partir de 1965 jusqu'en 1968, la diminution est constante; on passe globalement de 2.631 t à 1.765 t; 1969 représente le début d'une reprise de nos exportations en direction de ces pays. En proportion, les exportations vers ces pays ne cesseront de diminuer durant cette période, principalement au profit de l'Allemagne et de la France, passant de 92 % du total de nos exportations à 70 %. Comme dans le cas des marbres en « blocs », la rubrique « Autres pays » a été modifiée à partir de 1970. A cette date, les pays européens ne sont plus repris; ils font l'objet d'un traitement individuel [2]. La figure 4 montre, sous la dénomination « Autres pays », l'évolution de la rubrique « Autres pays » additionnée des pays européens (Espagne, Pays-Bas, Grande-Bretagne) non étudiés précédemment et qui ont contribué à l'achat de nos marbres sciés et/ou taillés.

A partir de 1970, l'évolution des exportations vers les « Autres pays » (les pays européens en sont exclus) est très discontinue. Les bons résultats, 1979 avec 2.722 t et 1980 avec 1.296 t, côtoient les

moins bons, 1970 et 1972 avec chacune 800 t, voire les mauvais résultats, 1977 avec 161 t.

A l'opposé, l'évolution des exportations vers les pays européens est d'une relative stabilité. Elle cache toutefois des fluctuations en sens divers, de même qu'une légère tendance à la baisse. A partir de 1973, l'Espagne se porte acquéreur de marbres sous forme « sciés et/ou taillés ». Nos exportations en direction de ce pays augmentent continuellement de 1973 à 1979, passant de 112 t à 280 t. En 1980, nous observons une diminution de 30 % par rapport à 1979 avec un total de 188 t exportées vers ce pays. Par contre, nos produits partant à destination de la Grande-Bretagne diminuent régulièrement de 1970 (avec 335 t) à 1980 (avec 46 t seulement). Une exception à signaler : 1978; elle ponctue avec 114 t cette décroissance. Cette reprise restera un cas isolé dans l'évolution générale. Les Pays-Bas sont notre principal acheteur depuis 1970. En moyenne, nous y exportons 1.100 t/an avec 2 années d'intense activité, 1973 (avec 1.850 t) et 1980 (avec 2.784 t, qui représentent 48 % de l'ensemble de nos exportations).

3.4. *Conclusions partielles*

La tendance générale de nos exportations de produits marbriers semi-finis est positive.

Nous pouvons dire que nos exportations

- sont pratiquement nulles vers l'Italie;
- sont en diminution vers la France, la Grande-Bretagne et l'Allemagne; vers la Grande-Bretagne, elles deviennent même négligeables;
- sont en augmentation régulière, depuis 1970, vers l'Espagne et les Pays-Bas;
- sont très irrégulières vers les pays non-européens.

Au cours des deux dernières années (1979-1980), une évolution positive semble se dessiner. Nos exportations, même à destination de l'Allemagne et de la France, y retrouvent vigueur. Si cette tendance se poursuit dans l'avenir, notre tonnage exporté atteindra de nouveau les résultats du début des années 1970. Mais il ne faut pas oublier que les évolutions des exportations par pays sont sujettes à forte fluctuation d'une année à l'autre. Des prévisions, même à courte échéance, sont dans ce cas hasardeuses.

4. *ANALYSE DES EXPORTATIONS : MARBRES DIVERS ET PIERRES MARBRIERES POLIS*

4.1. *Introduction*

Nous regroupons dans cette catégorie les produits figurant dans les classes 6802.210, 6802.312 et 6802.400 de la nomenclature douanière belge. Elles sont définies par l'Office Belge du Commerce Extérieur (O.B.C.E.) et correspondent respectivement à des « Pierres calcaires, albâtres moulurés et tournés », à des « Ecaussines, marbres, travertins, albâtres autrement travaillés, non sculptés » et enfin à des « Pierres sculptées » [1]. L'Ecaussines est l'appellation douanière du Petit-Granit; cette roche calcaire peut être considérée comme une pierre marbrière plutôt que comme un marbre à proprement parler.

Comme pour les classes précédentes, la numérotation de celles-ci varie dans le temps. Les trois classes envisagées dans le présent paragraphe ont successivement reçu les numéros suivants :

	6802.40	
	6802.60	de 1960 à 1969
et	6802.85	
	6802.43	
	6802.55	de 1970 à 1975
et	6802.85	
	6802.210	
	6802.312	à partir de 1976
et	6802.400	

4.2. *Evolution globale*

Nos exportations de marbres sous forme « polis » enregistrent globalement une augmentation (fig. 5); le tonnage total est passé de 1.339 t en 1960 à 2.204 t en 1980. Si l'on examine cette évolution avec plus de détails, on constate que :

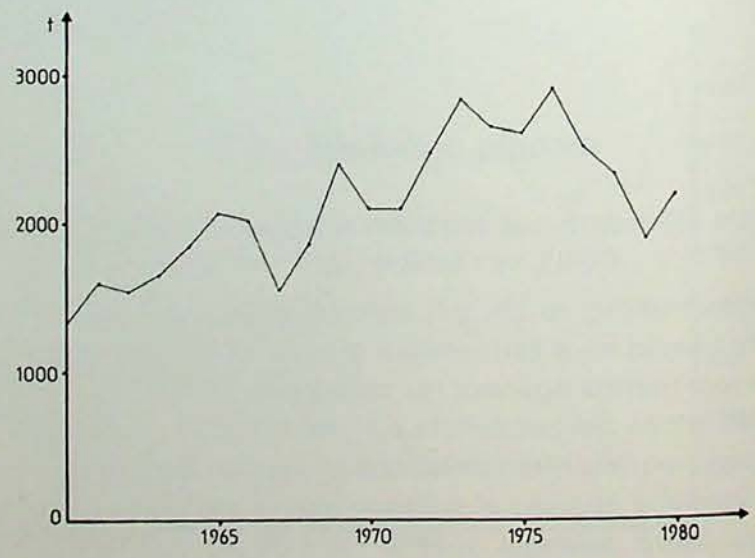


Fig. 5 : Exportation totale de marbres de Belgique sous forme de marbres divers et pierres marbrières polis (1960-1980)
[2]

- une première période de croissance du tonnage total exporté se poursuit de 1960 à 1976 (maximum de 2.924 t). L'évolution n'est toutefois pas uniforme;

la croissance est entachée de trois brèves périodes de régression : 1967; 1970-71; 1974-75;
- à partir de 1977 et jusqu'en 1979, la tendance à la baisse déjà esquissée en 1974-75 se précise. La régression est de l'ordre de 10 % par an;
- 1980 avec 2.204 t, en progrès de 16 % par rapport à l'exercice 1979, marque peut-être le début d'une nouvelle période de croissance.

4.3. *Evolution ventilée par pays acquéreurs*

L'évolution par pays est représentée sur la figure 6.

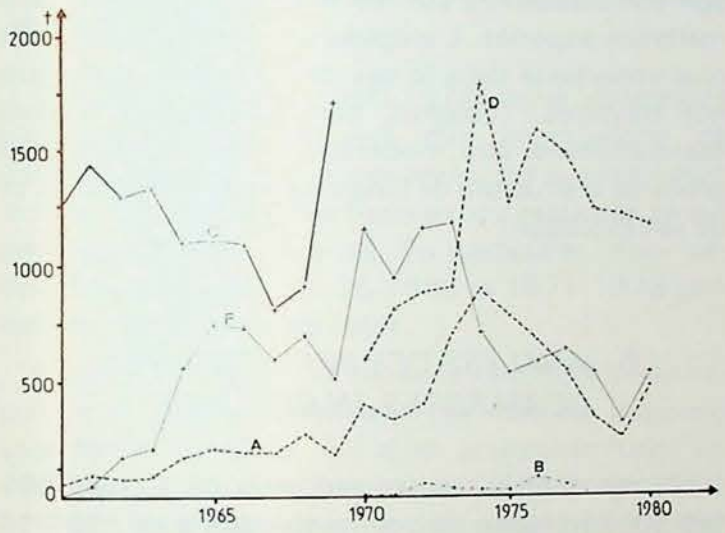


Fig. 6 : Exportation de marbres de Belgique sous forme de marbres divers et pierres marbrières polis, ventilée par pays acquéreurs (1960-1980)

F : Allemagne
A : France
B : Italie
C : Autres pays
D : 1970 : autres pays + Grande-Bretagne, Pays-Bas et Espagne
[2]

4.3.1. *Principaux pays importateurs*

L'Italie, grand pays marbrier, ne semble pas attirée par les marbres et pierres marbrières polis. Comme pour la catégorie précédente (voir § 3.3.1.), nos exportations vers ces pays sont très faibles : 50 t/an en général avec deux pointes, en 1972 et 1976 (62 t et 72 t respectivement).

Pour la France et l'Allemagne, on retrouve les deux périodes traditionnelles, une première, de croissance des exportations belges, et une deuxième, de rapide décroissance. Dans le cas envisagé, l'évolution dans la première période n'est pas très régulière.

Pour l'Allemagne, la période de croissance qui va de 1960 (avec 9 t) à 1973 (avec plus de 1.000 t) comporte une période de faible croissance, montrant même une légère tendance à la baisse, entre 1966 et 1969 (600 t/an environ). Pour la France, cette période de croissance se prolonge jusqu'en 1974 (907 t en 1974 à comparer avec 61 t en 1960). Elle comporte deux années (1969 et 1971) au cours desquelles les tonnages exportés ont diminué par rapport à ceux exportés l'année précédente.

La diminution au cours de la deuxième période a été fort rapide. En 1979, nos exportations vers la France n'étaient plus que de 256 t et celles vers l'Allemagne de 326 t. 1980 est, dans les deux cas envisagés, une année de forte reprise; 531 t d'exportation vers l'Allemagne (+ 60 % environ en 1 an) et 486 t vers la France (+ 90 %).

4.3.2. *Autres pays*

Jusqu'en 1969, la rubrique « Autres pays » regroupait les exportations vers les pays européens et d'outre-mer. A partir de 1970, les exportations vers les pays européens ont été enregistrées séparément [2].

De 1960 à 1969, les exportations à destination des « Autres pays » restent relativement stables avec des tonnages annuels supérieurs à 1.000 t. En pourcentage du tonnage global exporté, cette stabilité absolue cache une diminution de notre commerce vers ces pays à mesure que se développe notre activité à destination de la France et de l'Allemagne (95 % du tonnage global en 1960 vers les « Autres pays », 71 % en 1969 après avoir chuté à 49 % en 1968).

A partir de 1970 et jusqu'en 1974, l'évolution des exportations vers les pays non-européens est positive; nous passons de 600 t en 1970 à 1.779 t en 1974. 1975 (1.268 t) accuse une chute de 30 % par rapport au résultat de l'exercice 1974; cette année marque un arrêt dans cette évolution favorable. Ensuite, et jusqu'en 1980, les exportations se stabilisent à 130 t/an environ.

Parmi les autres pays européens, les Pays-Bas représentent notre meilleur client. Sa part est presque toujours supérieure à 70 % et atteint même 87 % (avec 1.020 t) en 1979. Deux années plus faibles se singularisent, 1974 avec 41 % et 1977 avec 53 %. Signalons enfin que, contrairement aux marbres sciés, la Grande-Bretagne reste un marché marginal pour les marbres et les pierres marbrières polis. Nos exportations y atteignent 25 t/an jusqu'en 1978, s'annulant pratiquement ensuite.

4.4. *Conclusions partielles*

La tendance générale indique une légère augmentation sur l'ensemble des 20 dernières années. Nous pouvons dire que nous exportons nos produits marbriers finis :

- très peu vers l'Italie et la Grande-Bretagne;

- de moins en moins vers l'Allemagne et la France; 1980 marque peut-être un changement de tendance;
- très régulièrement et en grande quantité vers les Pays-Bas (du moins à partir de 1970, date à laquelle les statistiques sont explicites).

5. *CONCLUSIONS : EXPORTATIONS*

La figure 7 montre l'évolution de nos exportations de produits marbriers sous forme de blocs, sciés et/ou taillés, et de marbres divers et pierres marbrières polis.

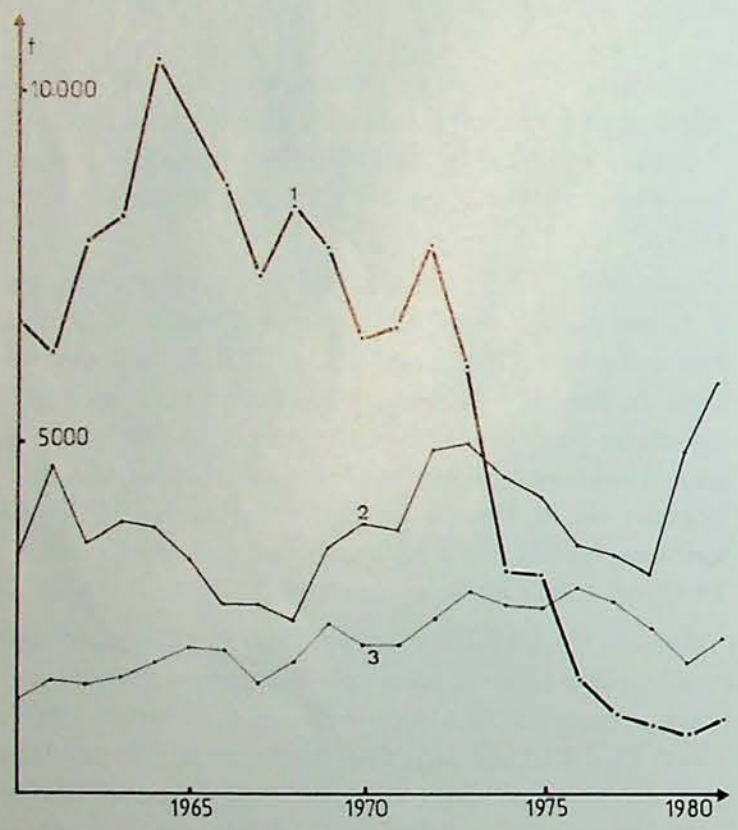


Fig. 7 : Exportation de marbres de Belgique (1960-1980).
Evolution comparée : blocs-sciés-polis
1 : sous forme de blocs
2 : sous forme sciée et/ou taillée
3 : sous forme marbres divers et pierres marbrières polis [2]

Nous pouvons conclure de l'examen de cette figure qu'il existe une certaine analogie entre l'évolution des tonnages exportés de marbres finis et semi-finis. Cependant, les courbes sont souvent décalées dans le temps. Ces variations sont imputables à des facteurs commerciaux à l'échelle mondiale. Notons toutefois que, durant la période 1963-1966, les tendances évolutives pour ces deux catégories envisagées sont divergentes; nous constatons une diminution des exportations des produits marbriers semi-finis, alors que nos exportations de produits marbriers finis augmentent.

Les fluctuations annuelles des tonnages de blocs exportés sont très importantes. D'une façon générale, l'exportation de blocs tend à diminuer. De 1972 à 1975 cette tendance s'accentue fortement. De ce fait, le tonnage de blocs exportés devient inférieur à celui des matériaux marbriers semi-finis (1974) et finis (1976). Notre situation exportatrice devient plus saine. Nous exportons, à l'heure actuelle, plus de matériaux marbriers élaborés que de blocs. La plus-value prise par ces derniers profite directement à l'économie nationale.

Nos exportations de marbres semi-finis restent en permanence supérieures à celles des produits finis. La tendance générale pour ces deux types de matériaux marbriers exportés, sur l'ensemble de ces 20 dernières années, est ascendante.

Les fluctuations des marchés extérieurs semblent agir semblablement sur les trois types de produits marbriers exportés. L'ampleur de ces influences est plus importante dans le cas de matériaux marbriers non travaillés. Toutefois, cette conclusion devrait éventuellement être modérée par un examen plus précis de la structure de l'industrie marbrière belge et de son évolution.

6. *ANALYSE DES IMPORTATIONS DE MARBRES EN BELGIQUE*

Comme dans le cas des exportations, l'étude portera sur l'évolution de nos importations de marbres divers et pierres marbrières polis, de 1960 à 1980, c'est-à-dire durant les 21 dernières années.

Les statistiques proviennent également de l'Office Belge du Commerce Extérieur (O.B.C.E.) [1] ainsi que de l'Union des Carrières et Scieries de Marbres de Belgique [2].

7. *ANALYSE DES IMPORTATIONS : SOUS FORME DE BLOCS*

7.1. *Introduction*

Rappelons que la dénomination « blocs marbres et travertins » correspond à la classe 2515.110 de la nomenclature définie par l'Office Belge du Commerce Extérieur [1].

Les changements de numérotation ont été donnés au § 2.1.

7.2. *Evolution globale*

La figure 8 montre l'évolution de nos importations totales durant la période 1960-1980.

Deux périodes majeures peuvent être définies.

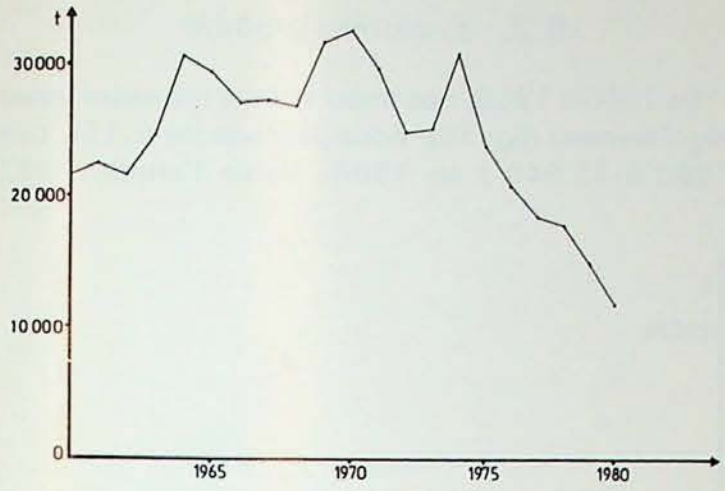


Fig. 8 : Importation totale de marbres en Belgique sous forme de blocs (1960-1980)

Durant la période 1960-1974, nous constatons globalement une stabilité des importations de marbres sous forme de blocs après une augmentation initiale. Cependant, des fluctuations majeures se superposent à cette stabilité. En particulier, deux périodes de régression 1965-1968 et 1971-1973 perturbent l'évolution esquissée.

A partir de 1975, on constate une diminution régulière et rapide du tonnage des marbres importés sous forme de blocs, qui s'est poursuivie jusqu'en 1980; en 1974, nous importions 30.865 t, en 1980 11.765 t seulement, soit une diminution de 60 % sur une période de 6 ans.

7.3. *Evolution ventilée par pays fournisseurs*

L'évolution par pays est représentée dans la figure 9.

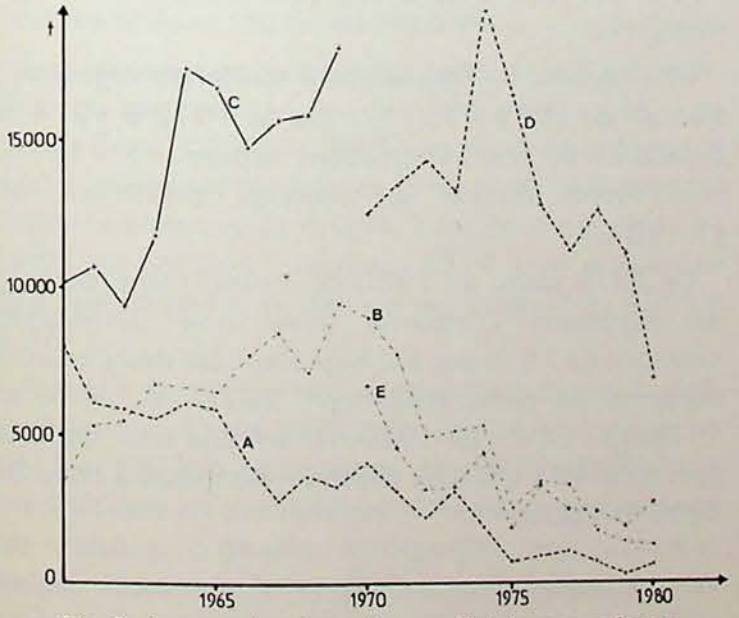


Fig. 9 : Importation de marbres en Belgique sous forme de blocs, ventilée par pays fournisseurs (1960-1980)

A : France
B : Italie
C : Autres pays
D : 1970 : Portugal
E : Autres pays + Grande-Bretagne, Pays-Bas, Espagne [2]

7.3.1. *Les principaux partenaires de la Belgique*

Nous exprimerons dans ce paragraphe l'évolution de nos importations en provenance des trois principaux partenaires commerciaux de la Belgique du point de vue des marbres : l'Allemagne, la France et l'Italie. Ajoutons immédiatement que l'Allemagne joue un rôle tout à fait marginal. Le tonnage de blocs importé de ce pays reste en général inférieur à 200 t/an, ce qui représente 1 % de nos importations totales. Cependant, les importations en provenance de ce pays passent par quelques pics importants : en 1962 : 746 t (3 % des importations totales de cette année), 1969 : 568 t (2 %) et en 1971 : 616 t (2 %).

Les importations en provenance de la France et de l'Italie suivent des voies divergentes jusqu'en 1970 et ensuite l'évolution est tout à fait semblable. Nos importations de marbre sous forme de blocs en provenance de la France ont, depuis ces 20 dernières années, une nette tendance à la diminution : 8.010 t en 1960 et 606 t en 1980. Cette diminution n'est cependant pas régulière; la diminution au cours des années 1967, 1972, 1975 a été beaucoup plus brutale. Il est vrai que ces années sont généralement suivies par des augmentations des importations, mais ces reprises ne résorbent jamais entièrement les pertes précédentes. Nos importations en provenance d'Italie de 1960 à 1969 sont en croissance continue. Nous passons de 3.330 t importées en 1960 à 9.510 t en 1969. A partir de 1970 commence une diminution importante et régulière de nos importations de blocs de ce pays qui se poursuivra jusqu'en 1980 : en 1970 : 8.997 t et en 1980 : 1.300 t.

7.3.2. *Autres pays*

Dans la rubrique « Autres pays », les pays européens ne sont plus repris à partir de 1970. Ces derniers seront traités individuellement [2]. La figure 9 montre jusqu'en 1969 l'évolution de la rubrique « Autres pays » et à partir de 1970 jusqu'en 1980, l'évolution de la rubrique « Autres pays » y compris les pays européens (Grèce, Espagne, Pays-Bas) non étudiés précédemment et qui participent à nos importations de produits marbriers sous forme de blocs. De plus, nous avons tenu à traiter séparément l'évolution du tonnage de blocs importés du Portugal; celui-ci est depuis 1970 notre principal fournisseur.

Nos importations en provenance des « Autres pays » progressent de 1960 à 1969. Les tonnages importés représentent de 45 à 59 % du tonnage total : 10.175 t en 1960, 18.224 t en 1969. A partir de 1970, les pays non-européens continuent à nous fournir une quantité très importante de blocs de marbre : 3.789 t en 1970, 1.693 t en 1978. Une exception toutefois : 1975 avec 165 t.

Parmi les pays européens, le Portugal occupe une place prépondérante. De 1970 à 1974, le tonnage importé en provenance de ce pays augmente; nous passons de 12.520 t en 1970 à 18.901 t en 1974. Ce dernier chiffre correspond au tonnage maximal importé et représentait 61 % du total de nos importations. A partir de 1975, nos importations diminuent régulièrement pour n'atteindre plus que 6.940 t en 1980, ce qui représente toujours 59 % de nos importations totales.

Les autres pays européens ne contribuent que faiblement ou d'une façon épisodique à nos achats. La tendance générale est à la baisse. La Grèce est, par exemple, un pays qui participe irrégulièrement à nos importations: en 1975, nous avions importé 1.628 t de ce pays, alors qu'en 1979 nos importations n'étaient plus que de 1 t. Il en est mutatis mutandis avec le commerce avec l'Espagne. En 1970 et 1971, les quantités de blocs importés étaient respectivement de 2.750 t et 1.533 t. Depuis 1972, nos importations en provenance de ce pays sont marginales avec une moyenne annuelle inférieure à 50 t/an. Les Pays-Bas ne contribuent que très faiblement à nos importations avec une moyenne sur les 11 dernières années de 100 t/an.

7.4. *Conclusions partielles*

La tendance générale de nos importations de marbres sous forme de blocs indique une croissance de celles-ci jusqu'en 1974.

A partir de 1975, elle diminue d'une façon constante jusqu'en 1980. Nous pouvons dire que nos importations de produits marbriers de ce type proviennent :

- très peu d'Allemagne et des Pays-Bas;
- de moins en moins de France, d'Italie et du Portugal, mais les importations en provenance de ce dernier pays ont connu une augmentation de 1970 à 1974;
- épisodiquement de Grèce et d'Espagne; les quantités peuvent être importantes;
- en quantités importantes mais de manière relativement irrégulière des pays non-européens.

8. *ANALYSE DES IMPORTATIONS : SOUS FORME SCIEE ET/OU TAILLEE*

8.1. *Introduction*

La dénomination sciée et/ou taillée a été définie au § 3.1. dans lequel est également détaillée l'évolution des deux classes (2515.410 et 6802.112) durant les vingt dernières années [1].

8.2. *Evolution globale*

De 1960 à 1968, nos importations croissent assez régulièrement (fig. 10); nous passons de 6.150 t en 1960 à 13.949 t en 1968. Seule l'année 1962

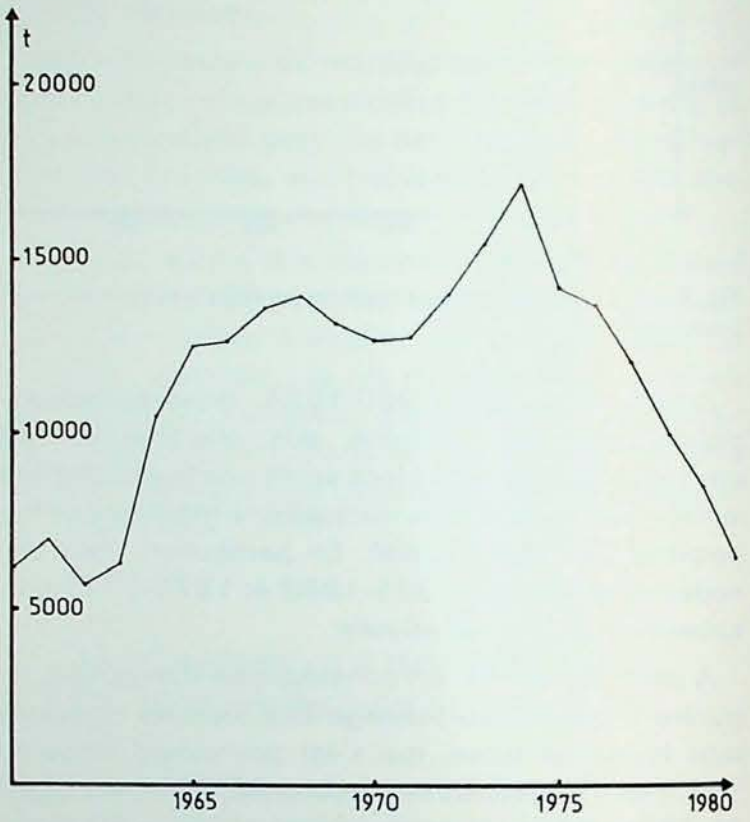


Fig. 10 : Importation totale de marbres en Belgique sous forme sciée et/ou taillée (1960-1980) [2]

constitue une exception, elle présente avec ses 5.620 t une régression de 20 % par rapport au résultat de 1961. Dès 1963, cette régression est en voie de résorption.

Une période de stagnation à tendance régressive s'établit de 1969 à 1971, mais de 1972 à 1974 la croissance de nos importations reprend. En 1974, nous avons importé un tonnage maximum de 17.198 t.

De 1975 jusqu'en 1980 se poursuit une période de régression constante avec une diminution moyenne de 15 % par an. Signalons les deux valeurs extrêmes de cette tendance : 1975-76 : 4 % et 1979-80 : 24 %. En 1980, le tonnage total importé était de 6.483 t, il était presque identique à celui de 1960 (6.150 t).

8.3. *Evolution ventilée par pays fournisseurs*

L'évolution par pays est représentée dans la figure 11.

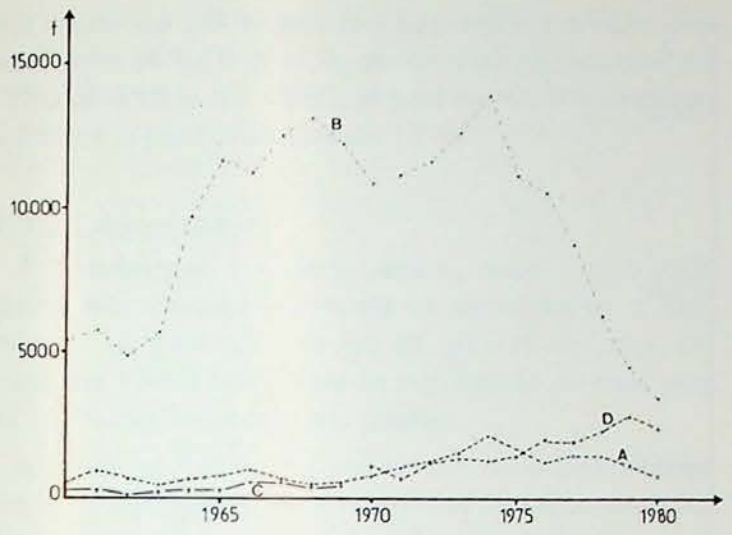


Fig. 11 : Importation de marbres en Belgique sous forme sciée et/ou taillée, ventilée par pays fournisseurs (1960-1980)
A : France
B : Italie
C : Autres pays + Allemagne
D : 1970 : autres pays + Allemagne, Pays-Bas, Portugal [2]

8.3.1. *Les principaux partenaires de la Belgique*

Compte tenu des évolutions étudiées précédemment, il n'est pas étonnant de trouver l'Italie au premier rang de nos fournisseurs. Depuis 1960, ce pays intervient pour plus de 50 % de nos importations. Les fournitures italiennes représentent même 92 % du total de nos importations en 1969 et 51 % en 1980. En valeur absolue, les importations en provenance de l'Italie présentent deux périodes de stabilité 1960-63 (avec une moyenne de 5.500 t/an) et 1965-75 (avec plus de 11.000 t/an de moyenne) séparées par une période de transition à croissance très rapide (1963-65). A l'intérieur de ces deux périodes, on constate des années de ralentissement important. Le maximum est atteint en 1974 avec 13.900 t de marbres sciés et/ou taillés importés.

La France est un fournisseur relativement modeste, bien qu'elle occupe la deuxième place jusqu'en 1976. Entre 1960 et 1967, ses exportations vers la Belgique restent constantes (650 t/an de moyenne) avec des alternances de pics positifs et négatifs. De 1968 se poursuit jusqu'en 1974 une croissance continue de nos importations qui passent de 458 t à 2.077 t.

A partir de 1975, nos importations diminuent régulièrement. Cette diminution est entrecoupée en 1977 et 1978 d'une période de relatif maintien. Les importations en provenance d'Allemagne sont pour des raisons d'études incorporées aux « Autres pays ». Notons que les importations belges en provenance de ce pays sont très faibles jusqu'en 1977. On constate ensuite un accroissement très rapide, au point qu'à partir de cette date, l'Allemagne devient notre deuxième fournisseur. Le maximum est atteint en 1979 avec 2.153 t et en 1980 on constate une diminution avec seulement 1.809 t.

8.3.2. *Autres pays*

A la rubrique « Autres pays », nous avons additionné les résultats en provenance d'Allemagne.

Les tonnages annuels importés en provenance de ce groupement de pays restent, jusqu'en 1969, inférieurs à 500 t/an; ils ne représentent que 1 à 4 % du total de nos importations. Il convient, en outre, de remarquer la grande irrégularité des importations en provenance des « Autres pays » durant cette période. A partir de 1970, les pays européens (Allemagne, Pays-Bas, Grande-Bretagne) sont traités individuellement [2]. Dès cette date et jusqu'en 1979, nous constatons une croissance de nos importations en provenance de ce groupement de pays, y compris l'Allemagne; nous passons de 1.052 t en 1970 à 2.850 t en 1979. Mais la part des pays extra-européens ne fait que décroître : 749 t en 1970, 153 t en 1971 et moins de 50 t/an les années suivantes. Outre l'Allemagne, il convient de citer parmi les pays européens les Pays-Bas. De 1970 à 1976, le tonnage annuellement importé de ce pays augmente continuellement, passant de 150 t en 1970 à 739 t en 1976. L'année 1977 marque le début de la chute de nos importations de marbres « sciés et/ou taillés » en provenance de ce pays; en 1980, le tonnage n'était plus que de 120 t.

Le tonnage des marbres importés du Portugal évolue sans grande régularité. Les forts tonnages, comme en 1976 avec 641 t, côtoient les faibles, 1977 avec 203 t. Cependant, jusqu'en 1974, le tonnage moyen annuel est de l'ordre de 100 t/an; pour la période 1975-1980, il est porté à 350 t/an. L'Espagne nous fournit épisodiquement des produits marbriers mais toujours en quantité très faible, ne dépassant qu'en 1973 les 100 t/an.

8.4. *Conclusions partielles*

La tendance des importations de produits marbriers sous forme sciée et/ou taillée indique une hausse jusqu'en 1974. A partir de 1975 et jusqu'en 1980, celles-ci diminuent de façon constante.

Nous pouvons dire que nos importations de ce type de matériau marbrier :

- diminuent pour l'Italie (qui reste le premier fournisseur) et pour la France;
- augmentent en provenance de l'Allemagne;
- restent importantes, jusqu'au début des années 70, en provenance des Pays-Bas, actuellement elles diminuent;
- sont faibles et très épisodiques d'Espagne;
- restent très faibles en provenance des pays non-européens.

9. *ANALYSE DES IMPORTATIONS : MARBRES DIVERS ET PIERRES MARBRIERES POLIS*

9.1. *Introduction*

La dénomination « Marbres divers et pierres marbrières polis » correspond aux trois classes 6802.210, 6802.312 et 6802.400 de la nomenclature commerciale définie par l'Office Belge du Commerce Extérieur [1].

L'évolution de la numérotation de ces trois classes a été donnée au § 4.1.

9.2. *Evolution globale*

Le tonnage total de marbres importés de cette rubrique est passé de 636 t en 1960 à 26.079 t en 1980 après avoir atteint son maximum en 1979 avec 29.710 t (fig. 12).

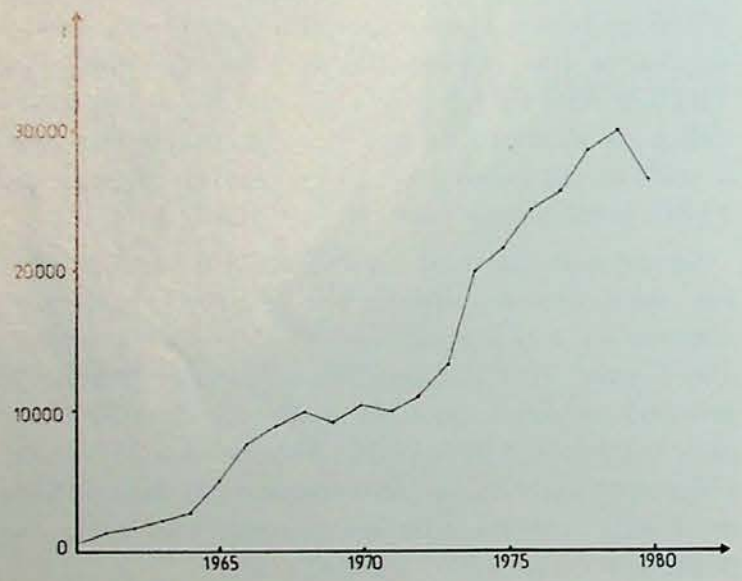


Fig. 12 : Importation totale de marbre en Belgique sous forme de marbres divers et pierres marbrières polis (1960-1980)
[2]

Incontestablement, nos importations ont augmenté en 21 ans de façon assez continue et régulière. Notons pourtant l'exception constituée par la période 1969-1972 au cours de laquelle nos importations se sont stabilisées à 10.000 t/an environ.

9.3. *Evolution par pays fournisseur*

L'évolution par pays est représentée dans la figure 13.

9.3.1. *Les principaux partenaires de la Belgique*

Comme prévu, l'Italie est le principal fournisseur de la Belgique, comme de la plupart des autres pays

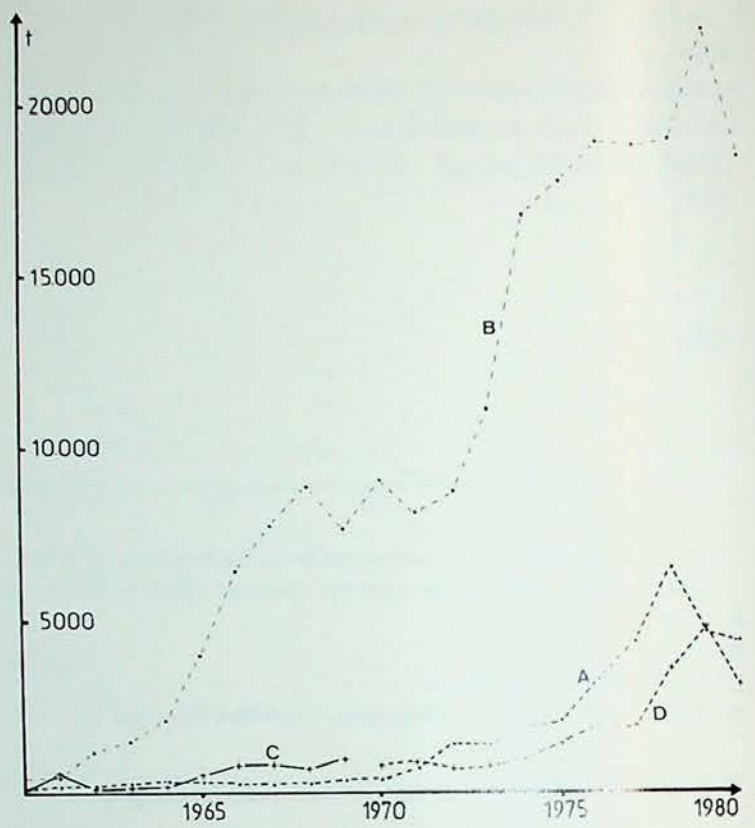


Fig. 13 : Importation de marbres en Belgique sous forme de marbres divers et pierres marbrières polis, ventilée par pays fournisseurs (1960-1980)
A : France
B : Italie
C : Autres pays + Allemagne
D : 1970 : autres pays + Allemagne, Portugal, Espagne, Pays-Bas
[2]

européens. Les importations en provenance de ce pays représentent d'une façon quasi constante plus de 70 % de l'ensemble de nos importations. Seule exception, l'année 1961 avec 36 % seulement. En valeur absolue, l'évolution du tonnage annuel importé sous forme de produits marbriers polis a été spectaculaire, passant de 477 t en 1960 à 18.486 t en 1980; après avoir atteint un tonnage annuel maximum en 1979 avec 22.181 t, soit 75 % du total de nos importations. Cette augmentation impressionnante résulte de deux périodes de croissance (1960-68, 1973-79) séparées par un palier entre 1968 et 1973. Comme prévu également, les importations des marbres en provenance d'Allemagne sont très faibles (768 t en 1980). A partir de 1970, le tonnage moyen annuel est de 430 t/an.

Les importations en provenance de la France se présentent pour la période 1960-1980 comme suit.

Durant la période 1960-1970, le tonnage annuel de marbres importés se maintient à un niveau relativement faible mais présente une certaine tendance à la hausse (350 t/an en moyenne, soit 5 à 10 % du total de nos importations). De 1971 à 1978, une progression rapide porte les tonnages de 712 t à leur maximum de 6.532 t, soit 23 % du total de nos importations en 1978. Le résultat de 1979 présente

une chute de 30 % environ par rapport à l'exercice précédent (4.666 t) et la diminution se poursuit en 1980 (4.438 t). En 1980, la part du marché prise par la France n'était plus que de 17 %.

9.3.2. *Autres pays*

A la rubrique « Autres pays », nous avons additionné les tonnages annuels en provenance d'Allemagne. La part globale de ce groupe de pays est jusqu'en 1969 très faible et représente un peu plus de 10 % des importations totales.

A partir de 1970, les importations en provenance des pays européens sont indiquées de façon explicite dans nos statistiques [2]. Les importations en provenance des Pays-Bas et du Portugal sont faibles et très irrégulières. En 1980, la Belgique a importé 822 t et 1.244 t respectivement de ces pays. Le tonnage importé d'Espagne est faible et subit des fluctuations très importantes. Ainsi, en 1979, les importations atteignent 1 320 t, soit une augmentation de 400 % par rapport à l'année précédente.

La Grèce ne se manifeste qu'épisodiquement comme en 1977 et 1978 avec respectivement 71 t et 150 t.

Les importations en provenance des pays non-européens montrent également une évolution très irrégulière. Citons par exemple 1972 avec 9 t et 1973 avec 295 t (3.400 % d'augmentation). Le tonnage est généralement très peu important et se situe le plus souvent à moins de 100 t/an; exception faite des années 1978 et 1979 avec respectivement 1.525 t et 966 t.

9.4. *Conclusions partielles*

La tendance générale de l'évolution de nos importations de produits marbriers sous forme polie indique une hausse depuis 21 ans.

Nous pouvons dire que nos importations de ce type de matériau proviennent :

- presque exclusivement d'Italie (plus de 70 %);
- d'une façon relativement stable de la France et dans une moindre mesure du Portugal;
- en faible tonnage et régulièrement d'Allemagne et des Pays-Bas;
- d'une façon irrégulière d'Espagne et des pays non-européens.

10. *CONCLUSIONS : IMPORTATIONS*

La figure 14 montre l'évolution comparée de nos importations de produits marbriers sous forme de blocs, sciés et polis.

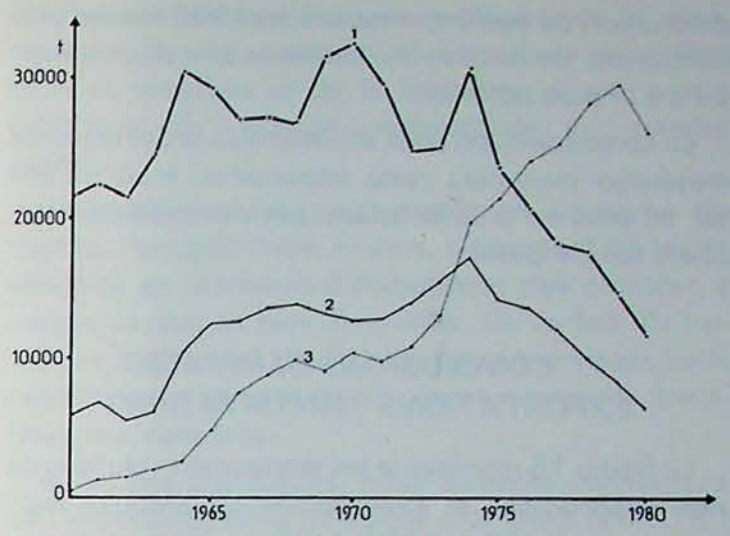


Fig. 14 : Importations de marbres en Belgique.
Evolution comparée : blocs-sciés-polis
1 : sous forme de blocs
2 : sous forme sciée et/ou taillée
3 : sous forme de marbres divers et pierres marbrières polis

Jusqu'en 1974, l'analogie entre l'évolution des importations de produits marbriers sous forme « sciés et polis » est indéniable. La tendance est à l'augmentation des tonnages importés. En 1974, pour la première fois depuis 1960, nous constatons que les importations de matériaux finis supplantent celles des produits semi-finis. Les fluctuations affectant la régularité des évolutions sont de peu d'importance et ponctuelles dans le temps. Les importations sous forme de blocs constituent l'essentiel des importations. Jusqu'en 1974 également, l'évolution de ces importations ne semble pas être corrélée aux deux autres évolutions (sciés-polis). Les diminutions brutales des importations sont importantes et ne sont généralement résorbées que lentement sur plusieurs années.

A partir de 1975, un important changement de tendance se marque :

- l'importation de produits marbriers sous forme de blocs et sciés diminue régulièrement jusqu'en 1980. L'écart entre les tonnages importés en blocs et/ou les produits sciés tend progressivement à se résorber suite à une décroissance plus rapide de nos importations sous forme de blocs. Par contre, l'importation de produits marbriers finis (polis) ne cesse de croître. 1980 marque cependant un léger recul par rapport au résultat enregistré en 1979.

Nous pouvons conclure de l'examen de la figure 14 que :

- les importations de matériaux marbriers bruts (blocs) et semi-finis (sciés) régressent considérablement depuis 1974. Ce fait atteste d'une moindre activité industrielle et commerciale de cette partie du secteur marbrier belge;
- les importations de matériaux marbriers finis (polis) se développent continuellement depuis 20 ans. La

diminution de nos importations en 1980 résulte probablement de la crise du bâtiment que nous traversons à l'heure actuelle.

En conclusion, on peut affirmer que la demande de matériaux marbriers reste importante, mais qu'elle est de plus en plus satisfaite par des produits marbriers finis importés.

11. *CONCLUSIONS GENERALES : EXPORTATIONS - IMPORTATIONS*

La figure 15 représente les tendances évolutives de nos importations et exportations de produits marbriers entre 1970 et 1980. Les produits marbriers se présentent sous forme de blocs, sciés et/ou taillés (sciés) et marbres divers et pierres marbrières polis (polis).

1980. Le Portugal demeure notre principal fournisseur. Mais il faut signaler que nos importations en provenance des pays non-européens prennent de plus en plus d'importance; nous passons de 12 % du total importé en 1970 à 22 % en 1980. Rappelons que cette augmentation relative accompagne une diminution du tonnage importé. Par contre, nos importations en provenance de France et d'Italie tendent à devenir négligeables.

L'évolution de notre commerce de produits marbriers sous forme « sciés » se présente comme suit :

Nos exportations progressent sensiblement de 1970 à 1980 atteignant cette année-là 5.819 t. Le principal acquéreur demeure les Pays-Bas. L'Allemagne, les pays non-européens et dans une moindre mesure la France restent traditionnellement nos clients pour ce type de matériaux marbriers.

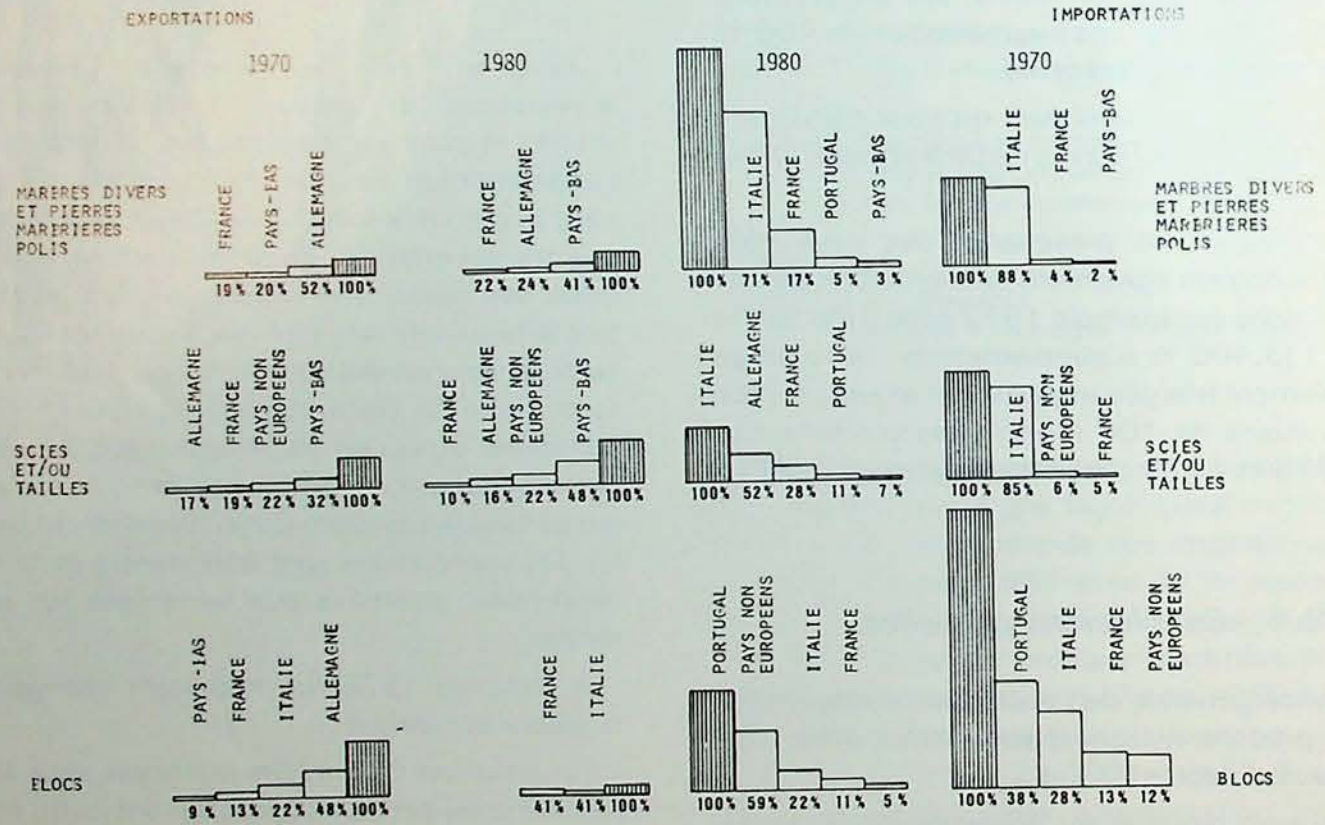


Fig. 15 : Evolution des importations et exportations de marbres en Belgique de 1970 à 1980; sous forme de blocs, sciée et/ou taillée, et de marbres divers et pierres marbrières polis

L'évolution de notre commerce de produits marbriers sous forme de blocs peut être résumée de la façon suivante.

Nos exportations de blocs se sont effondrées. Elles n'atteignent plus en 1980 que 1.050 t. Elles sont pour l'essentiel dirigées, à parts égales, vers la France et l'Italie (chacun de ces pays importe 41 % du total de nos exportations de blocs).

Nos importations de blocs ont subi la même évolution régressive. Le total importé s'élève à 11.765 t en

Nos importations diminuent très sensiblement. Le total de nos importations s'élève à 6.483 t en 1980. L'Italie demeure notre principal fournisseur, mais nous constatons que l'Allemagne, la France ainsi que le Portugal nous fournissent de plus en plus de produits marbriers sous forme « sciés ».

L'évolution de notre commerce de produits marbriers sous forme « polis » (marbres divers et pierres marbrières polis) se présente comme suit.

Nos exportations de produits marbriers polis restent stables ou présentent une légère tendance à l'augmentation. Le total s'élève, en 1980, à 2.101 t. Les Pays-Bas sont devenus notre principal débouché. Les exportations vers la France restent relativement stables; les exportations à destination de l'Allemagne se sont effondrées.

Nos importations augmentent considérablement et elles atteignent, en 1980, 26.076 t. L'Italie domine le marché marbrier de ce type. Un fait à ne pas négliger est le développement des importations en provenance de France et du Portugal et dans une moindre mesure des Pays-Bas.

Les échanges commerciaux de produits marbriers sous forme de blocs, sciés ou polis, sont une condition de la survie d'une activité industrielle marbrière. Toutefois, il est important, pour notre industrie marbrière, de diminuer le plus possible nos exportations de produits marbriers bruts (blocs) et semi-finis (sciés). La diminution du tonnage exporté sous forme de blocs semble être de rigueur. Mais est-elle vraiment voulue par nos marbriers ou résulte-t-elle simplement de l'arrêt de l'exploitation de nos carrières de marbre au profit d'une activité purement de commerce ?

La hausse de nos exportations de marbres sciés devient, au-delà d'un certain tonnage, dangereuse. Nous pensons qu'une partie au moins des quantités exportées sous cette forme nous revient sous forme « polis »; ce phénomène est particulièrement accentué dans notre commerce avec les Pays-Bas.

Nous devons reconnaître que notre exportation de produits marbriers finis, pour croissante qu'elle SOIT, pourrait, dans le cadre industriel actuel, montrer beaucoup plus de vigueur exportatrice. Cette vitalité défaillante n'est peut-être que le résultat de la diminution de nos importations de matériaux marbriers bruts et semi-finis et de la limitation d'une partie importante de l'activité commerciale au marché intérieur.

Il semble que les pays riches en carrières de marbre, Portugal, Italie, France, s'équipent de façon accélérée en machines d'élaboration des marbres à usages de plus en plus diversifiés. De ce fait, ils travaillent directement chez eux les blocs extraits et nous expédient une gamme de plus en plus large de matériaux marbriers finis.

Au vu des statistiques, nous sommes convaincus de l'importance de la demande intérieure (26.079 t de marbres polis importés en 1980) et des larges possibilités de notre commerce extérieur (tendance à la croissance de nos exportations), surtout si notre industrie se spécialise en produits marbriers de qualité et en produits nouveaux (dalles, plaques, plinthes, etc...). Nos exportations présentent des signes d'assainissement, mais nos industriels devraient faire preuve d'une activité de promotion en vue de percées significatives.

L'évolution des importations montre clairement que le travail marbrier se fait de moins en moins en Belgique. Il est peut-être plus simple de devenir un boutiquier de marbre qu'un véritable Maître marbrier !

BIBLIOGRAPHIE

[1] Annuaire statistique. *Office Belge du Commerce Extérieur.*
[2] Importations-Exportations : Statistiques. *Union des Carrières et Scieries de Marbre de Belgique.*

Présentation des méthodes de protection des marbres contre la pollution atmosphérique

Théodore SKOULIKIDIS *

RESUME

Pour pouvoir retarder ou arrêter une réaction, il faut connaître son mécanisme, c'est-à-dire l'étape déterminant sa vitesse et les conditions de sa réalisation. Ce n'est qu'après une connaissance complète du mécanisme des réactions relatives à l'attaque atmosphérique des marbres que l'on peut trouver des méthodes satisfaisantes pour leur protection. Or, des deux principaux types d'attaque des marbres : l'attaque acide (SO_2, SO_3, NO_x, eau de pluie) et la sulfatation (SO_2, SO_3, humidité), seul le mécanisme du premier était connu. Le mécanisme des réactions du deuxième type est resté inconnu jusqu'en 1975. Les recherches effectuées au laboratoire de l'auteur pendant les années 1976-1981 ont permis de préciser ce mécanisme.

Dans ce but, des mesures à la microbalance de quartz de la sulfatation accélérée de poudres de calcite et de marbre et la valeur de l'énergie d'activation conduisent à un modèle de pile galvanique : (−) $CaCO_{3(s)}$/ $CaSO_4.2H_2O_{(s)}$ / $SO_{2(g)}$, $O_{2(g)}$, $H_2O_{(g)}$ (+). L'étape déterminant la vitesse de la sulfatation est la diffusion en état solide des ions de calcium, c'est-à-dire la sulfatation se fait par le même mécanisme que la corrosion uniforme des métaux (mécanisme de Wagner); les preuves de ce mécanisme sont présentées.

Compte tenu de ce mécanisme, on peut affirmer que les couches organiques ou inorganiques utilisées jusqu'à présent pour la protection des marbres ne sont

SAMENVATTING

Om een reactie te vertragen of te onderbreken, dient haar mechanisme gekend te zijn, dit is het stadium dat haar snelheid en de voorwaarden voor haar verwezenlijking bepaalt. Enkel na een volledige kennis van het mechanisme van de reacties betreffende de atmosferische aantasting van marmer, kunnen bevredigende methodes worden gevonden voor de bescherming ervan. Van de twee voornaamste aantastingstypes van marmer : aantasting door zuren (SO_2, SO_3 NO_x, regenwater) en de sulfaatvorming (SO_2, SO_3, vocht) is enkel het mechanisme van het eerste type gekend. Het mechanisme van de reacties van het tweede type bleef onbekend tot in 1975. De onderzoekingen, uitgevoerd in het laboratorium van de auteur tijdens de jaren 1976-81, hebben het mogelijk gemaakt dit mechanisme nader te omschrijven.

Met dit doel leiden metingen met de kwartsmicrobalans van de versnelde sulfaatvorming van calciet- en marmerpoeders en de waarde van de activeringsenergie tot een model van galvanische zuil : (—) $CaCO_{3(s)}$ / $CaSO_4.2H_2O_{(s)}$ / $SO_{2(g)}$, $H_2O_{(g)}$ (+). Het stadium dat de snelheid van de sulfaatvorming bepaalt, is de diffusie van calciumionen in vaste toestand, d.w.z. dat de sulfaatvorming plaatsheeft volgens hetzelfde mechanisme als de eenvormige corrosie van de metalen (mechanisme van Wagner); de bewijzen van dit mechanisme worden voorgesteld.

Rekening houdend met dit mechanisme kan bevestigd worden dat de organische of anorganische lagen die tot nu toe gebruikt werden om marmer te beschermen, niet bevredigend zijn en dat sommige zelfs

* Professeur à l'Université Technique Nationale d'Athènes, rue du 28 Octobre, Athènes, Grèce.

pas satisfaisantes et même que plusieurs d'entre elles favorisent ou accélèrent l'attaque. Or, en se basant sur le mécanisme découvert, il est possible de définir les propriétés des couches protectrices donnant des résultats satisfaisants. Quelques réflexions sur ce sujet sont présentées.

ZUSAMMENFASSUNG

Um eine Reaktion verzögern oder anhalten zu können, muß man ihren Mechanismus kennen, das heißt den Abschnitt, der ihre Geschwindigkeit und die Bedingungen ihres Ablaufs bestimmt. Erst nach vollständiger Kenntnis des Mechanismus der Reaktionen, die bei dem atmosphärischen Angriff von Marmor ablaufen, wird man zufriedenstellende Methoden zum Schutze des Marmors : dem sauren Angriff (SO_2, SO_3, NO_x, Regenwasser) und der Sulfatation (SO_2, SO_3, Feuchtigkeit), war nur der Mechanismus der ersten Angriffsart bekannt. Der Mechanismus der Reaktionen der zweiten Art ist bis zum Jahre 1975 unbekannt gewesen. Aufgrund der Forschungen, die während der Jahre 1976-1981 im Labor des Autors durchgeführt wurden, konnte dieser Mechanismus bestimmt werden.

Mit diesem Ziel durchgeführte Messungen der beschleunigten Sulfatation von Kalzitpulver und Marmorpulver mittels einer Quarzmikrowaage und Messungen der Aktivierungsenergie führen zu einem Modell eines galvanischen Elementes : (—) $CaCO_{3(s)} / CaSO_4.2H_2O_{(s)} / SO_{2(g)}$, $O_{2(g)}$, $H_2O_{(g)}$ (+). Der Abschnitt, der die Sulfatationsgeschwindigkeit bestimmt, ist die Diffusion der Calciumionen im festen Zustand, das heißt, die Sulfatation erfolgt nach dem gleichen Mechanismus wie die gleichmäßige Korrosion der Metalle (Mechanismus nach Wagner); die Beweise für diesen Mechanismus werden vorgelegt.

In Anbetracht dieses Mechanismus kann bestätigt werden, daß die bis jetzt für den Schutz von Marmor verwendeten organischen oder anorganischen Schichten nicht zufriedenstellend sind, und daß sogar mehrere von ihnen den Angriff begünstigen oder beschleunigen. Aufgrund des entdeckten Mechanismus ist es möglich, die Eigenschaften für Schutzschichten anzugeben, die zufriedenstellende Ergebnisse bringen. Einige Überlegungen über dieses Thema werden mitgeteilt.

de aantasting begunstigen of versnellen. Door zich echter te baseren op het ontdekte mechanisme, is het mogelijk de eigenschappen te bepalen van de beschermende lagen die bevredigende resultaten opleveren. Enkele overwegingen betreffende dit onderwerp worden voorgesteld.

SUMMARY

To be in a position to slow down or stop a reaction, one must know its mechanism, i.e. the stage which determines the rate and the conditions of reaction. Only when we have obtained a complete understanding of the mechanism of the reactions affecting marble can we establish satisfactory methods of protecting it. Of the two principal types of reaction affecting marble : i) acid attack by SO_2, SO_3, NO_x, rainwater; and ii) formation of sulphates by SO_2, SO_3, humidity, only the mechanism of the first was known; that of the second remained unknown until 1975. The studies carried out in the author's laboratory over the period 1976-81 made it possible to describe the mechanism precisely.

Quartz microbalance measurements of the accelerated transformation - into sulphates - of calcite or marble in powder form and of the value for the activation energy led to a design of a galvanic battery of the form : (—) $CaCO_{3(s)} / CaSO_4.2H_2O_{(s)} / SO_{2(g)}$, $O_{2(g)}$, $H_2O_{(g)}$ (+). The stage determining the rate of sulphate formation is the diffusion in the solid state of the calcium ions, i.e. mechanism of sulphate formation is the same as the Wagner mechanism which governs the uniform corrosion of metals. The proofs of this observation are presented in the article.

In the light of this discovery, we can state that the organic or inorganic coatings used hitherto as a protection for marble are unsatisfactory, and can even affirm that several such coatings favour or speed up the degradation. The knowledge of the mechanism involved can serve as a basis for defining the properties of satisfactory protective coatings. The article closes with some remarks on this point.

O. *INTRODUCTION*

O.1. *Généralités*

Nous croyons utile de rappeler ci-dessous les divers types d'attaques atmosphériques des calcites et des marbres, nos connaissances de leurs mécanismes, les conséquences, l'influence de la pollution. Nous passerons également en revue les méthodes de protection utilisées, ainsi que les techniques de réparation ou de restauration des dégâts. Nous présenterons comme exemples les monuments et statues de l'Acropole. Nous examinerons principalement la sulfatation, dont nous avons élucidé le mécanisme [1-8]. La connaissance du mécanisme permet de déterminer les propriétés des couches protectrices permettant de retarder ou supprimer toute sorte d'attaques, à l'exception de l'attaque biologique qu'il faut examiner séparément.

Fig. 1
La partie inférieure est un tambour artificiel en béton armé remplaçant le tambour manquant et introduit pendant la restauration de Balanos. La partie supérieure est un tambour original en marbre. Les armatures du béton ont été encastrées dans le tambour authentique (Parthénon)

O.2. *Types d'attaques atmosphériques de la calcite et du marbre*

On peut distinguer les familles suivantes :

A. *Types d'attaque mécanique :*

1) Congélation de l'eau dans les fissures et les pores quand la température devient inférieure à zéro. Conséquences : fissuration de la roche à cause du gonflement (expansion) de l'eau lors du passage de l'état liquide à l'état solide [9].
2) Erosion par des particules en suspension dans l'air (une sorte de sablage). Conséquence : piqûres, exfoliation et élimination des hauts-reliefs des statues [10].
3) Erosion due aux visiteurs (touristes). Conséquence : usure et courbure caractéristique des escaliers [1].
4) Dépôt des particules colloïdales en suspension dans l'air sur les surfaces du marbre. Conséquence : coloration des surfaces en rouge (Fe_2O_3) ou en noir (carbone) [1] et accélération de l'attaque par les polluants. En effet, les colloïdes absorbent les polluants et, de ce fait, la concentration de ces derniers sur les particules colloïdales est supérieure à celle dans l'air.
5) (Attaque indirecte). Gonflement par corrosion des goujons et ossatures métalliques utilisés pendant la construction ou les restaurations. Conséquence : la fissuration du béton et du marbre [3-6] [10-16] (fig. 1-3).

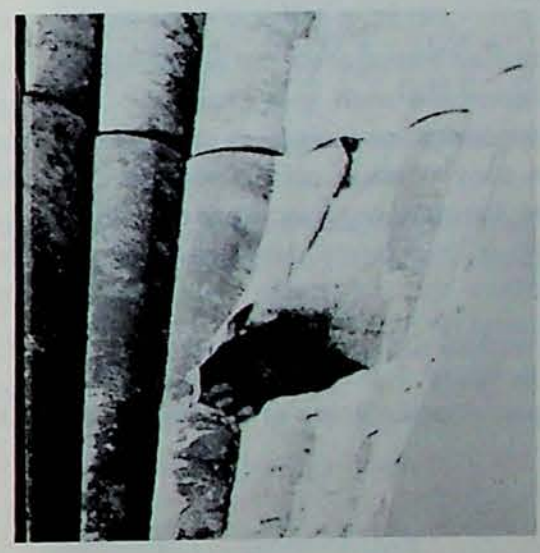


Fig. 2
Détachement des pièces de marbre à cause de la corrosion du goujon

Fig. 3
Fissure interne du marbre, causée par la corrosion d'une armature en acier, révélée par les rayons γ

B. *Attaque biologique (biodétérioration) :*

1) Formation de colonies de bacilles et de microorganismes végétaux sur les marbres. Conséquence : dissolution locale de la surface.

2) (Attaque indirecte). Oxydation du SO_2 en SO_3. Conséquence : accélération de la sulfatation [17-21].

C. *Attaque chimique, attaque par la pluie acide (des surfaces qui viennent en contact avec l'eau de pluie) :*

1) $CaCO_{3(s)} + CO_{2(g)} + H_2O_{(l)} \rightarrow Ca^{2+} (HCO_3)^{2-}_{2(aq)}$

2) $CaCO_{3(s)} + SO_{2(g)} + 0,5\ O_{2(g)} \rightarrow Ca^{2+} SO^{2-}_{4(aq)} + CO_{2(g)}$

3) $CaCO_{3(s)} + 3\ NO_{2(g)} \rightarrow Ca^{2+} (NO_3)^{2-}_{2(aq)} + NO_{(g)} + CO_{2(g)}$

Les conséquences de ces réactions chimiques sont la dissolution des surfaces et la disparition des hauts-reliefs, la dissolution des surfaces intergranulaires et le détachement de morceaux de marbre [1].

4) Diverses réactions chimiques des polluants en solution avec les impuretés du marbre. Conséquence : formation des cavités sur les surfaces.

D. *Attaque électrochimique : Sulfatation des surfaces qui ne viennent pas en contact avec l'eau de la pluie (la caractérisation de ce type d'attaque a été donnée par nous-mêmes après avoir élucidé son mécanisme) :*

$CaCO_{3(s)} + SO_{2(g)} + 0,5O_{2(g)} + 2\ H_2O_{(g)} \rightarrow CaSO_4 . 2\ H_2O_{(s)} + CO_2)$

Conséquence : la formation de gypse sur les surfaces qui sont le siège préférentiel de l'évolution de colonies de microorganismes (perte du marbre, destruction à long terme des détails des statues [1]), coagulation des particules colloïdales, absorption plus intense de SO_2.

Sur la figure 4 on peut distinguer les deux types d'attaque, attaque acide et sulfatation, sur la même statue.

0.3. *Influence de l'augmentation de la pollution sur les divers types d'attaque*

En considérant séparément chaque type d'attaque que nous venons de définir, on peut conclure que :

A.1) L'influence de la pollution (SO_2, SO_3, NO_x, H_2S, CO_2, etc...) sur le type A.1) est favorable. En effet, la dissolution de ces polluants dans l'eau de la pluie abaisse le point de congélation de l'eau et augmente la tension superficielle (présence d'électrolytes forts). La congélation et l'entrée de l'eau dans les fissures et les pores de la roche sont donc rendues plus difficiles.

A.2), 4). Les attaques A.2) et A.4) sont accélérées par l'augmentation de la pollution. En effet, le nombre des particules en suspension augmente. Cette augmentation qui peut représenter des quantités énormes est principalement imputable aux industries (96 % en été et 97 % en hiver), aux automobiles (3 % en été et en hiver) et au chauffage central (0 % en été et 1 % en hiver) [22-23].

A.3) L'attaque A.3) tend à diminuer, car, à cause de l'augmentation de la pollution, le nombre de touristes diminue (à Athènes et ailleurs).

A.5) Nous avons démontré que l'augmentation de la pollution accélère de 30 % l'attaque A.5) [5, 6, 12, 13].

B. L'attaque B a également été accélérée car la sulfatation et la présence de SO_2 ont augmenté.

C., D. Les attaques des types C et D sont dues à la pollution et elles se sont donc accélérées par l'augmentation de celle-ci. Indiquons que le SO_2 atmosphérique provient pour 54 % en été et 49 % en hiver des industries, pour 37 % en été et 34 % en hiver des centrales électriques, 0 % en été et 9 % en hiver du chauffage central, et pour 9 % en été et 8 % en hiver de la circulation automobile [22-23].

Fig. 4
Attaque atmosphérique d'une Caryatide. Partie droite de la statue : attaque acide (la surface était en contact avec l'eau de la pluie) : dissolution préférentielle des hauts-reliefs; partie gauche de la statue, sulfatation (la surface n'était pas en contact avec l'eau de la pluie) : formation d'une couche de gypse conservant à sa surface des détails de la statue, déjà éliminés à l'interface marbre-gypse

0.4. *Méthodes de protection contre les divers types d'attaque*

Si l'on considère séparément chaque type d'attaque, on peut appliquer les méthodes de protection suivantes :

A.1) L'effet et le mécanisme de la congélation de l'eau sont bien connus. On peut les supprimer si on met les statues, frises, ornements et monuments à l'abri pour éviter le contact direct avec l'eau de la pluie. Une solution serait la suggestion du Professeur Schwab [24] de traiter les surfaces par des solutions de tensioactifs pour abaisser le point de la congélation de l'eau. Si les dégâts sont déjà apparus, on peut les réparer en utilisant du ciment blanc et du sable normalisés.

A.2).4) Pour éviter l'érosion par les particules en suspension dans l'air et le dépôt des particules colloïdales, il est possible de prévoir des obstacles d'une grandeur convenable et à une certaine distance des monuments lorsqu'on connaît la direction et la vitesse des courants d'air. L'application de cette méthode peut faire l'objet de calculs aérodynamiques. Si des dépôts se sont déjà accumulés on peut les éliminer, soit par des lasers thermiques [25], soit par de l'attapulgite, qui les absorbe [26].

A.3) Pour la détérioration, principalement des escaliers en marbre par les touristes, on peut exiger que ceux-ci portent des pantoufles couvrant leurs chaussures. On peut également mettre les escaliers sous un abri en bois. La restauration des escaliers ayant déjà une courbure peut se faire à l'aide de ciments à résine époxy.

A.5) Pour éviter le gonflement par corrosion des goujons métalliques, on peut utiliser, selon notre suggestion [1, 12, 15], des pièces en titane. Si les goujons sont en acier et des dégâts ont déjà apparu, la seule solution est de démolir le monument et de remplacer les goujons en acier par des goujons en titane. Nous avons appliqué cette solution dans le cas de l'Acropole [3].

B. Les Professeurs Palenti et Curri, spécialistes italiens, ont trouvé sur les monuments de l'Acropole une microflore zymotique et mycétique et des thiobacilles oxydants et les ont détruits par l'antibiotique chlorure d'isothiazolinone [3].

C. Les trois réactions, qui constituent l'attaque chimique (acide), sont très bien connues du point de vue de leur mécanisme (étape déterminant la vitesse) [27-34]. La mesure habituelle contre cette attaque était la pose d'une couche protectrice organique ou inorganique sur les surfaces des marbres.

Plus spécialement, on utilisait, et on utilise encore, les matières suivantes : des résines époxy, des ciments résiniques, des dérivés polyvinyliques, polyacriliques et paraffiniques; des polyamides, méthylcellulose, polyéthylène, polyfluorures, siliconnes, etc..., des dérivés fluosilicates et esters silicates, qui forment sur les surfaces une couche de silice; de l'acide fluorhydrique, qui forme du fluorure de calcium, des hydroxydes de calcium, de baryum et de strontium, qui forment des carbonates, qui à leur tour se transforment en sulfates; des sels thioniques du baryum, qui forment du sulfate de baryum, etc...

Selon la charte de Venise [35], ces substances doivent présenter les propriétés suivantes :

- l'utilisation des films protecteurs ne doit pas changer la structure, la couleur et la valeur archéologique et historique de l'objet;
- la vie du film doit être très longue;
- les films ne doivent pas changer de couleur sous l'action des rayons UV;
- ils doivent être solubles dans un solvant non destructeur de la pierre;
- on doit être absolument sûr que l'intervention ne va pas, à long terme, conduire à l'accélération de la détérioration de la surface des marbres.

Un petit nombre de ces substances satisfait à ces prescriptions. Signalons que, dans bien des cas, les substances proposées favorisent ou accélèrent l'attaque [1, 36, 37].

D'autre part, on doit diminuer la pollution locale. Ceci a été réalisé dans les environs de l'Acropole [1, 5, 6].

Le tableau I résume les données qui viennent d'être exposées.

1. *Sulfatation*

1.1. *Généralités*

Nous avons précisé dans l'introduction que la sulfatation (attaque des marbres par les SO_2 et SO_3 avec formation de gypse) affecte les surfaces des marbres qui, dans leur emplacement, sont protégés contre la pluie, les surfaces des statues placées dans les musées, ou encore, en absence de pluie, les surfaces non protégées. On peut raisonnablement se demander si l'attaque acide et la sulfatation sont vraiment supprimées par les couches protectrices. En effet, c'est seulement par la connaissance parfaite du mécanisme de cette réaction qu'on peut être sûr des méthodes de protection proposées et le mécanisme de la sulfatation n'était pas connu avant 1975. Mais faisons d'abord le point de ce qui était connu jusqu'en 1975.

1.2. *Données sur le mécanisme de la sulfatation connues avant 1975*

Jusqu'en 1975, seules les données suivantes concernant ce type d'attaque étaient connues :

TABLEAU I

Types d'attaque atmosphérique des marbres : conséquences, influence de la pollution, méthodes de protections
(Données connues en 1975)

Types d'attaques	Conséquences	Influence de la pollution	Mécanisme	Méthodes de protection utilisée	Méthodes des restaurations
A. *Attaques mécaniques* I. Congélation de l'eau dans les pores et les fissures	Fissuration supplémentaire due à l'augmentation du volume de l'eau pendant la congélation	Défavorable : elle fait baisser le point de congélation et augmenter la tension superficielle	Connu depuis 1900	Mettre les monuments et les statues à l'abri afin d'éviter le contact immédiat avec l'eau de pluie. Suggestion : appliquer des substances hydrophobes ou tensioactives sur les surfaces	Utilisation de ciment blanc
II. Erosion par les particules en suspension dans l'air	Destruction des couches superficielles et surtout des hauts-reliefs	Favorable : augmentation de l'émission des particules fines par les industries (96 %), les automobiles (3 %) et le chauffage central (1 %) (chiffres valables pour la Grèce)	Connu depuis 1880	Déviation des vents par des obstacles définis sur base de données aérodynamiques	—
III. Erosion due aux visiteurs	Usure et courbure des escaliers en marbre	Défavorable : elle décourage la visite des villes polluées par les touristes	Connu depuis 1600	Pantoufles obligatoires pour les visiteurs, protection des escaliers par un abri en bois ou en terre	Utilisation des ciments résiniques
IV. Sédimentation des particules colloïdales en suspension dans l'air	Coloration des surfaces en noir (carbone), en rouge (Fe_2O_3), etc... Accentuation de l'attaque par les polluants absorbés	Favorable : augmentation de la concentration des particules en suspension dans l'air	Connu depuis 1920	Déviation des vents par des obstacles définis sur base de données aérodynamiques	Lavage à l'eau chaude; laser thermique; substances absorptives
V. Corrosion des goujons et ossatures métalliques, introduits pendant la construction ou les restaurations	Fissuration des marbres	Favorable : le SO_2, le SO_3 et le NO_x augmentent de 30 % la corrosion de l'acier (mesures effectuées dans notre laboratoire et in situ)	Connu depuis 1935, mais aussi depuis l'antiquité	—	Démolition des monuments et (notre suggestion pour l'Acropole) utilisation de titane
B. *Attaques biologiques* Formation de colonies de microorganismes végétaux et animaux	Dissolution des marbres; accélération de la transformation de SO_2 en SO_3	Favorable : les microorganismes se fixent préférentiellement sur les surfaces en gypse, formées par le SO_2	Connu depuis 1960, mais pas tout à fait élucidé	Utilisation d'antibiotiques appropriés	—
C. Attaques chimiques : (contact des surfaces avec l'eau de pluie) I $CaCO_{3(s)} + CO_{2(g)} \rightleftharpoons Ca^{2+}(HCO_3)^{2}_{2(aq)}$ II $CaCO_{3(s)} + SO_{2(g)} + 0.5\ O_{2(g)} \rightarrow Ca^{2+}\ SO^{2}_{4(aq)} + CO_{2(g)} + H_2O_{(l)}$ III $CaCO_3 + 3NO_2 \rightarrow Ca^{2+}(NO_3)^{2}_{2} + NO + CO_2$ IV Plusieurs réactions avec les impuretés du marbre	Dissolution des marbres et surtout des hauts-reliefs; détachement des morceaux en marbre. Formation de cavités	Favorable : le CO_2, le SO_2 (50 % industries, 35 % centrales électriques, 6 % chauffage central, 9 % circulation) et les NO_x augmentent	Connu depuis 1945	Appliquer des couches de matériaux organiques ou inorganiques et combattre la pollution	—
D. *Attaque électrochimique*. Caractérisée ainsi par nous-mêmes après élucidation de son mécanisme; (absence de contact de la surface avec l'eau de pluie) : sulfatation, formation du gypse : $CaCO_{3(s)} + SO_{2(g)} + + 0,5\ O_{2(g)} + 2H_2O_{(g)} \rightarrow \rightarrow CaSO_4 . 2H_2O_{(s)} + CO_2$	Elimination des couches des surfaces et des détails des statues (nos propres observations)	Favorable : le SO_2 augmente	Inconnu jusqu'à 1975; complètement connu en 1981 (nos propres recherches)	Appliquer des couches de matériaux organiques ou inorganiques et combattre la pollution	—

1) Dans l'atmosphère, le soufre se trouve sous forme de SO_2, SO_3 et H_2S. La proportion de SO_2 est d'environ 80 % et la teneur en SO_3 est d'environ 20 % [1, 2, 36]; malgré ces rapports, le gypse est contenu dans les couches de sulfatation des marbres jusqu'à une proportion de 100 %. Or, il s'agit d'un produit de SO_3.

2) Cette apparente disproportion est due à la transformation catalytique de SO_2 en SO_3 sur la surface même des marbres. Les catalyseurs sont le marbre lui-même [37-40], ses impuretés [37], l'humidité [38, 40], le gypse déjà formé [40], les sédiments constitués de particules en suspension [37] et les thiobacilles oxydants [17-21]. Alors, la sulfatation se produit en deux étapes :

$$SO_{2(g)} \xrightarrow[cat.]{air} SO_{3(g)} \quad \text{(réaction rapide catalysée)}$$

$$CaCO_{3(s)} + SO_{3(g)} + 2\,H_2O_{(g)} \rightarrow CaSO_4 \cdot 2\,H_2O_{(s)} + CO_{2(g)}$$

3) La vitesse de la sulfatation dépend de la qualité du marbre, de ses impuretés, de la concentration de SO_2 dans l'atmosphère, de l'humidité et de la température. Cette conclusion était bien connue [1, 37-40].

4) La littérature ne signale qu'une seule étude [40] consacrée avant 1975 au mécanisme de la sulfatation de la calcite, constituant principal et quasi exclusif des marbres.

Toutefois, aucune référence à la sulfatation des marbres n'est faite. En outre, les conclusions ne sont fondées sur aucune preuve expérimentale et sont souvent en désaccord avec la thermodynamique et la cinétique chimique; elles ne pouvaient donc pas être retenues.

Selon l'auteur de ce travail [40], on peut distinguer deux stades de sulfatation. Durant le premier, qui correspond à la formation d'un film de gypse d'une certaine épaisseur (non précisée, ni calculée), l'étape déterminant la vitesse de la sulfatation est, selon l'auteur [40], la diffusion du SO_2 ou du CO_2 en direction inverse; cette conclusion n'était pas basée sur la valeur de l'énergie d'activation correspondante, qui elle non plus n'était pas calculée. Le second stade, celui d'une évolution parabolique, a comme étape déterminant la vitesse, une réaction chimique. La diminution de la valeur de l'énergie d'activation en présence de vapeurs d'eau, prouve, selon l'auteur [40], que celles-ci ont une action catalytique sur la réaction. Il donne les valeurs suivantes :

27,2 kcal/mol	$CaCO_{3(s)} + SO_{2(g)} + N_{2(g)} \rightarrow CaSO_{3(s)} + CO_{2(g)} + N_{2(g)}$ $2\,CaSO_{3(s)} + SO_{2(g)} \rightarrow 2\,CaSO_{4(s)} + S_{(1)}$	60-80 % 40-20 %
27,9 kcal/mol	$CaCO_{3(s)} + SO_{2(g)} + \text{air} + 2\,H_2O_{(g)} \rightarrow CaSO_{4(s)} + CO_{2(g)}$	100 %
18,7 kcal/mol	$CaCO_{3(s)} + SO_{2(g)} + \text{air} + 2\,H_2O_{(g)} \rightarrow CaSO_4 \cdot 2\,H_2O_{(s)} + CO_{2(g)}$	100 %

et il conclut : « pour le moment, rien n'est clair en ce qui concerne les étapes individuelles de la réaction ».

Il faut noter que, dans ce travail [40], les deux réactions qu'on compare (avec ou sans vapeur d'eau) sont différentes, non seulement par la présence ou non de vapeur d'eau, mais aussi par leurs produits finals, la première conduisant à $CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$ et CO_2 et la seconde à $CaSO_4$ et CO_2.

Remarquons aussi qu'on ne peut pas attribuer à un réactif (ici la vapeur d'eau) des propriétés catalytiques dans une réaction hétérogène s'il se présente comme composant, en proportions stoechiométriques, d'un des produits finals (ici $CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$). La seule notion acceptable de catalyse dans ce cas serait celle d'« autocatalyse », c'est-à-dire admettre que les cristaux de $CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$ déjà formés (ou les cristaux de gypse préalablement ajoutés dans le système) agissent comme germes de cristallisation; dans ce cas, l'équation de l'évolution de la sulfatation serait sigmoïde. Nous exposons ci-après la voie suivie pour élucider le mécanisme et les conséquences qui en découlent.

1.3. *Partie expérimentale*

1.3.1. *Observations macroscopiques* (Acropole, laboratoire)

1) Par des analyses chimiques, nous avons trouvé[1] que les films de sulfatation contiennent effectivement 97 % de gypse.

2) Nous avons mesuré [2] les épaisseurs de ces films par une méthode nouvelle, simple et non destructive que nous avons appelée la « sonde à épingle » (fig. 5). Ainsi, nous avons trouvé des épaisseurs comprises entre 0,1 et 1,5 cm ! Nous avons aussi relevé sur des photos et des dessins l'attaque acide, les sédiments et l'épaisseur du gypse.

3) Nous avons comparé [6] les photos de mêmes statues prises au cours des 50 dernières années. Dans la figure 6, nous voyons la photo d'une même caryatide en 1955 (à gauche) et en 1965 (à droite). Sur la photo 7, on voit également une accélération de la corrosion pour une statue en Westphalie(Allemagne). Nous avons aussi comparé des statues et leurs copies faites à l'aide de moules, entre 1945 et 1970. On a ainsi pu constater la sérieuse détériora-

tion due à l'augmentation de la pollution de ces statues au cours des 25-30 dernières années. On conclut que les dégâts causés à l'Acropole par la pollution les 25 dernières années sont plus importants que ceux causés durant les 2.500 ans de son existence.

4) Les observations nous ont aussi permis de constater pour la première fois [41] que, sur la surface des films de gypse, les détails des statues ont été conservés, alors que ces détails avaient déjà disparu à l'interface marbre-gypse.

Dans ce but, et au lieu d'éliminer les films avec de l'eau comme on faisait jusqu'à présent, nous avons commencé à élaborer des méthodes pour les consolider. En particulier, nous avons pu inverser la sulfatation au laboratoire, c'est-à-dire transformer le gypse en marbre [41, 42].

5) Nous avons effectué des essais d'attaque accélérée par le SO_2 sur des échantillons en marbre traités avec 35 plastiques différents, utilisés dans un but de protection. Dans tous les cas, nous avons trouvé du

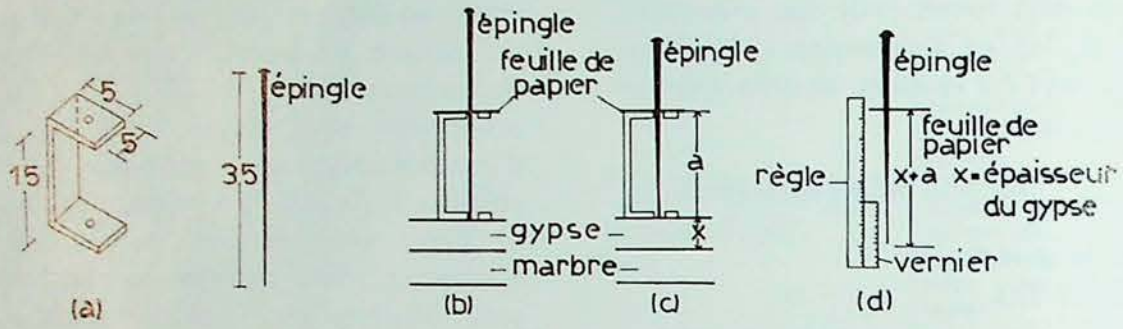


Fig. 5
La nouvelle méthode de « la sonde à épingle » pour mesurer l'épaisseur des films de gypse. (a) L'appareil. (b), (c), (d) Stades successifs du procédé. Nous utilisons maintenant la même méthode sous forme de micromètre à épingle

Fig. 6
La même Caryatide en 1955 (à gauche) et en 1965 (à droite). On constate une détérioration sévère en 10 ans

Du fait que les films de gypse se fissurent dès qu'ils atteignent une certaine épaisseur, il faut, soit les consolider afin que les détails retenus sur leur surface ne soient pas définitivement perdus, soit arrêter la sulfatation.

gypse [2] dans les films en plastique ou/et sur leur surface (fig. 8). Nous avons aussi constaté des fissurations de ces films.

Ces résultats ayant donc montré le danger d'une protection in situ des statues, nous avons proposé leur transport dans un musée. Ainsi, la statue de Cécrops-Pandrossos et les Caryatides sont déjà abritées dans le musée de l'Acropole. Mais comme l'attaque par le SO_2 continue dans le musée, les statues ont été mises dans des caisses transparentes étanches et climatisées par une circulation d'azote. Cette protection est utilisée pour la première fois.

2. *LE MECANISME DE LA SULFATATION*

2.1. *Généralités*

Dans le cadre des activités du Comité pour la Sauvegarde des Monuments de l'Acropole, qui a été fondé en 1975, nous avons assumé la responsabilité de suggérer l'application ou non des couches protectrices —déjà utilisées à l'étranger — sur les surfaces des monuments et des statues de l'Acropole. C'est ainsi que nous avons entrepris des recherches pour élucider le mécanisme de la sulfatation.

Nous avons suivi toutes les étapes prévues par la cinétique chimique hétérogène et nous avons révélé celle déterminant la vitesse de la sulfatation. Des résultats préliminaires ont été communiqués en 1979

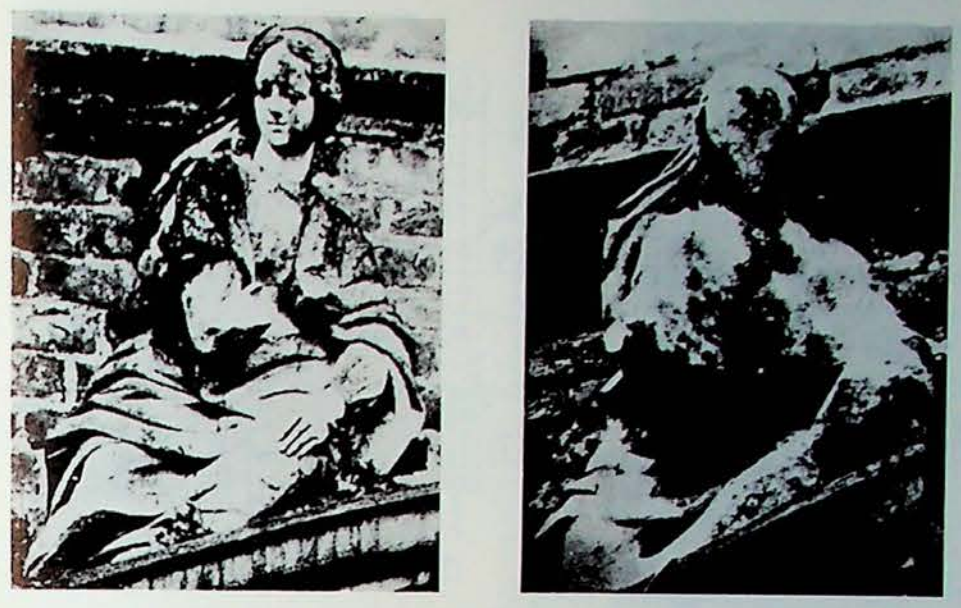


Fig. 7
Une statue en Westphalie (Allemagne), qui a été placée dans un château en 1702. La photo de gauche a été prise en 1908, la photo de droite en 1969

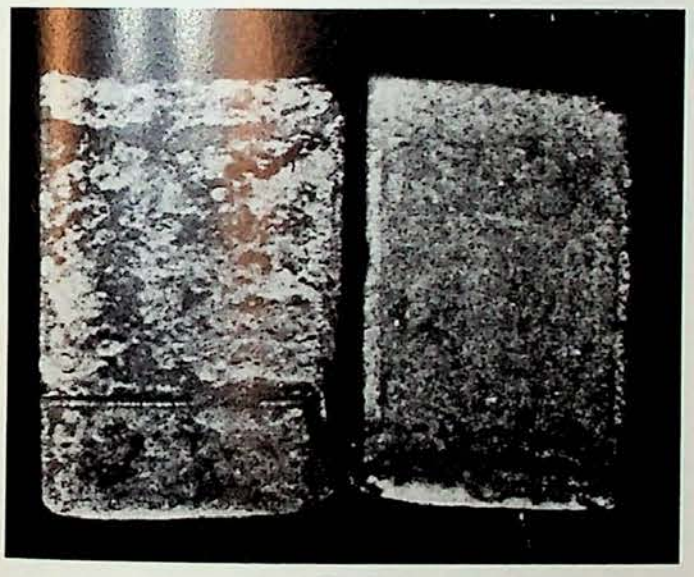


Fig. 8
Eprouvette en marbre traitée avec du plastique; à gauche, avant et à droite après son exposition à une atmosphère artificielle de SO_2 + air + humidité. On observe la formation du gypse dans et sur la couche de plastique

au Troisième Congrès International sur la Détérioration et la Protection de la Pierre à Venise [2]. Des preuves additionnelles ont été communiquées successivement au Congrès International de Salonique sur « Les Lois contre la Pollution », en 1979 [5], au Congrès International sur « La Corrosion Atmosphérique » tenu aux U.S.A. en 1980 [6] et dans des publications du British Corrosion Journal en 1981 [7, 8].

Nous présentons ci-dessous l'ensemble de ces travaux avec des données récentes additionnelles.

2.2. *Détermination de la vitesse de la réaction à diverses températures et calcul de l'énergie d'activation*

Pour suivre l'évolution de la sulfatation, nous avons utilisé du $CaCO_3$ p.a. et un débit gazeux constitué d'un mélange de 84 % de SO_2 et de 16 % d'air, le tout saturé avec de la vapeur d'eau. L'appareillage de base comprend un ressort spiralé en quartz ayant une sensibilité de 0,6 mg. La quantité de $CaCO_3$ utilisée était de 40 à 100 mg pour chaque essai. L'appareillage utilisé a été schématisé sur la figure 9.

Sur la figure 10, nous avons tracé la courbe représentant le taux de sulfatation en fonction du temps à la température de 400 °C, avec une déviation standard de ± 3 % et, sur la figure 11, les courbes représentant le taux de sulfatation en fonction du temps à diverses températures entre 375 °C et 500 °C.

On constate que l'allure de toutes ces courbes n'est pas continue.

Pour un taux de transformation en gypse de 11 % environ (de 9 à 13 %), l'évolution est linéaire et obéit à une équation du type $\gamma_1 = K_1 t_1$ (γ_1 : % gypse produit, K_1 : constante de vitesse, t : temps). Cette ligne droite correspond au premier stade de la réaction [40] qui se poursuit en tenant compte de la surface spécifique réelle de la poudre de $CaCO_3$ jusqu'à la formation d'une couche de gypse d'environ 300 Å. Après cette transformation, la forme de la courbe change et (fig. 10) une équation parabolique du type $\gamma_2^2 = K_2 (t_2 - t_0)$ est suivie. Les points de discontinuité des courbes pour chaque température ont été calculés en combinant les deux équations :

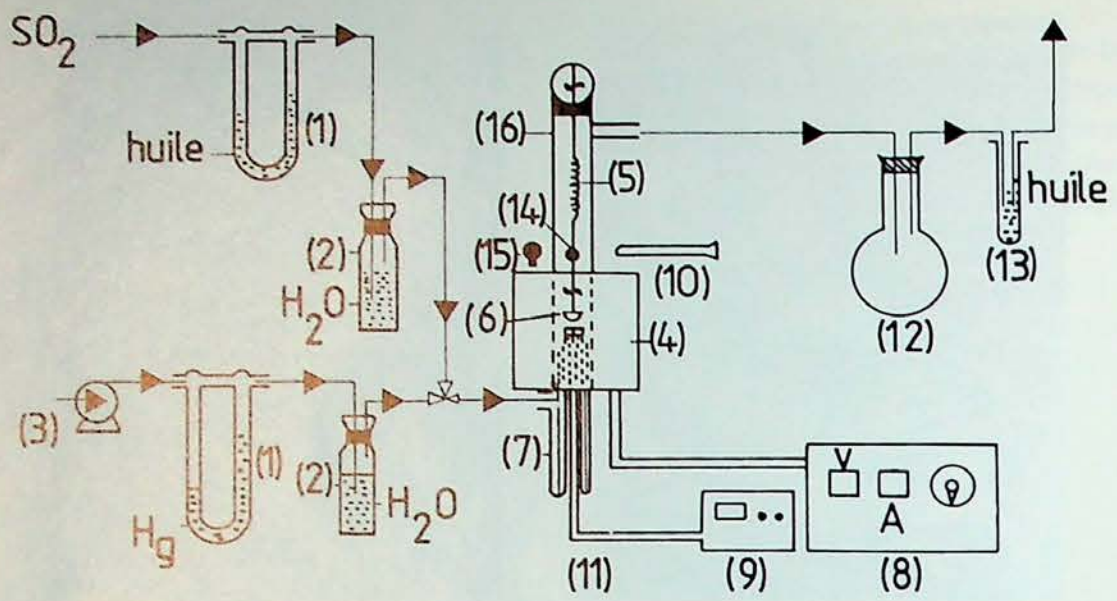


Fig. 9

Représentation schématique de l'appareillage utilisé pour mesurer la vitesse de la sulfutatio.

1. Débitmètre
2. Barboteur
3. Pompe
4. Four
5. Ressort spiralé en quartz
6. Récipient
7. Tuyaux capillaires
8. Stabilisateur de tension
9. Enregistreur de température
10. Viseur
11. Thermocouple
12. Flacon sphérique
13. Eprouvette
14. Tache d'encre de Chine
15. Lampe
16. Tuyau en verre

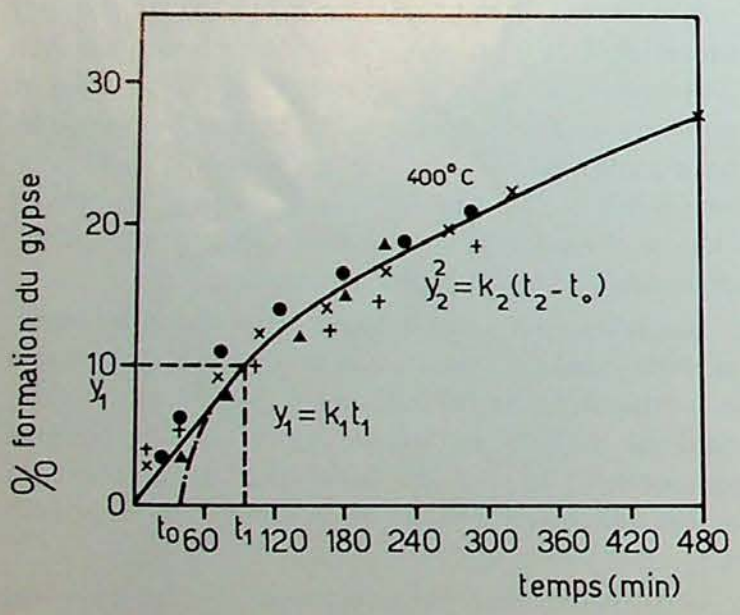


Fig. 10

Diagramme de l'évolution de la sulfatation en fonction du temps à une température de 400 °C

$$\gamma^2 - \frac{K_2}{K_1}\gamma + K_2 t_o = 0 \text{ (fig. 10).}$$

Sur la figure 12, les lignes droites d'Arrhenius ont été tracées.

Après calcul, on a trouvé pour le premier stade de la réaction une énergie d'activation de 14,3 ± 1,5 kcal/mol et pour le deuxième stade 17,7 ± 1,5 kcal/mol [40].

2.3. *Hypothèse pour les étapes déterminant la vitesse pour les deux stades de la sulfatation; modèle d'une pile galvanique*

Nous croyons que la méthode continue, que nous avons utilisée pour la première fois, donne des résultats plus précis que les méthodes mentionnées dans la littérature, et dès lors, nous sommes convaincus que les valeurs des énergies d'activation, que nous avons trouvées, sont plus précises.

En particulier, l'énergie d'activation du deuxième stade que nous avons trouvée : 17,7 ± 1,5 kcal/mol est plus précise que la valeur de 18,7 ± 1,5 kcal/mol mentionnée dans la littérature [40]. Une conséquence importante de cette précision est la suivante : si nous ajoutons à la valeur 17,7 l'erreur possible de 1,5, nous trouvons la valeur maximum de 19,2. Celle-ci est inférieure à 20 kcal/mol, valeur représentant la limite inférieure pour qu'une réaction chimique soit l'étape déterminant la vitesse d'une réaction.

Nous avons donc été amenés à une autre interprétation de cette valeur; plus précisément, nous admettons qu'elle est liée à une diffusion en état solide comme étape déterminant la vitesse dès le début du deuxième stade parabolique de la sulfatation. En effet, pour un grand nombre de réactions hétérogènes [41-51] et l'oxydation anodique de l'aluminium pour

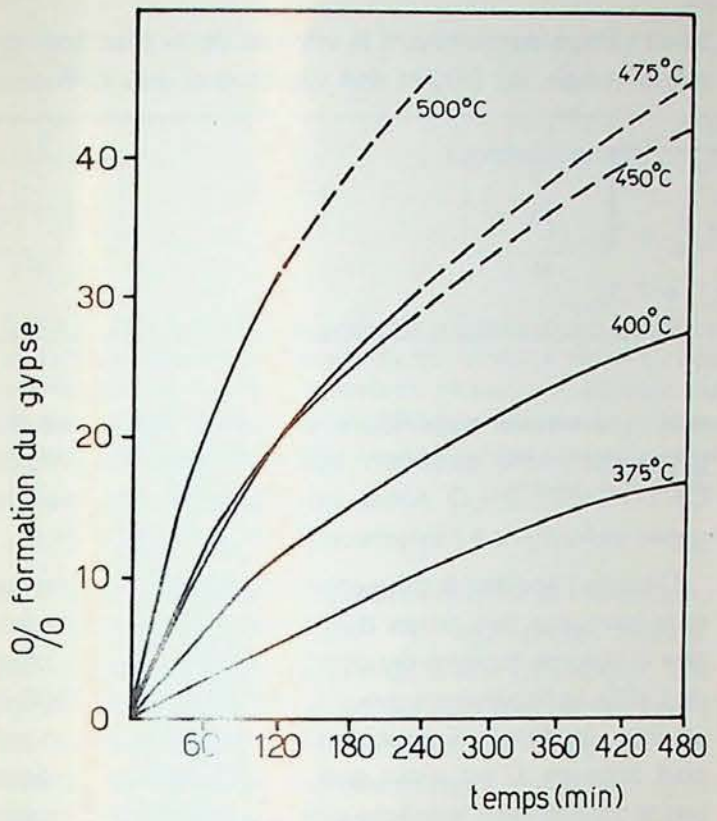


Fig. 11
Diagramme de l'évolution de la sulfatation en fonction du temps à des températures de 375, 400, 450, 475 et 500 °C

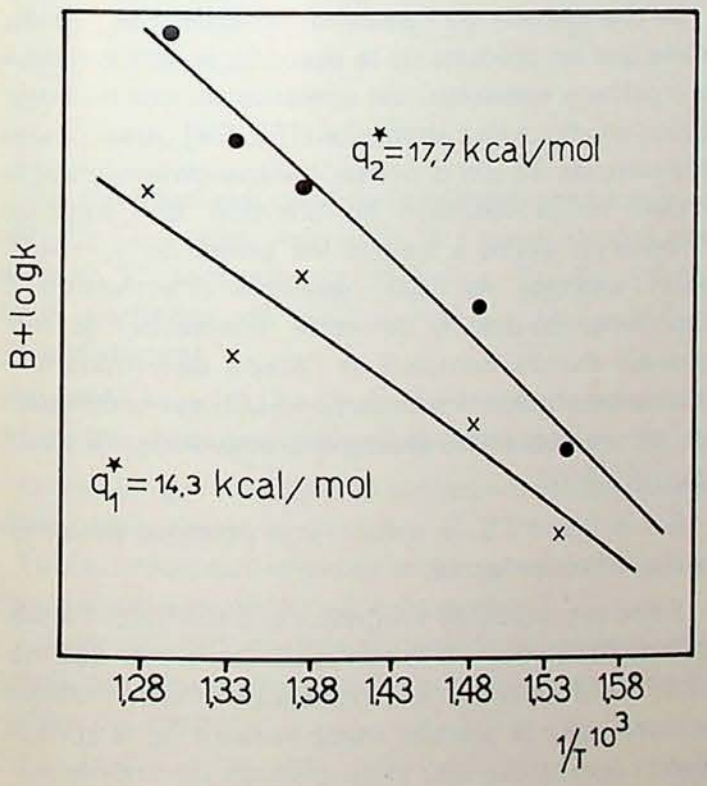


Fig. 12
Diagramme d'Arrhenius pour les deux stades de la sulfatation

une épaisseur d'oxyde supérieure à 36 μm [52-58], l'énergie d'activation est comprise entre 16 et 19 kcal/mol et l'étape déterminant la vitesse est la diffusion des ions en état solide, même à la température ambiante [47-59].

Selon ces données, et en se basant sur la théorie de Wagner [44-47], selon laquelle l'oxydation uniforme des métaux se fait par formation d'une pile galvanique, soit :

$$(—)\ Fe_{(s)} / Fe_2O_{3(s)} / O_{2(g)}, H_2O_{(g)}\ (+),$$

nous avons proposé [2] d'interpréter le mécanisme de la sulfatation d'une manière similaire; entre le $CaCO_3$ fonctionnant comme pôle négatif, le gypse comme électrolyte, et le SO_2 + air + vapeur d'eau comme pôle positif, il se forme la pile galvanique suivante :

$$(—)\ CaCO_{3(s)} / CaSO_4 2H_2O / SO_{2(g)} + \text{air} + H_2O_{(g)}\ (+)\ \text{(fig. 13)}.$$

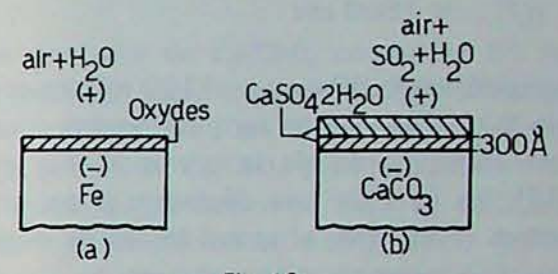


Fig. 13
(a) Modèle de Wagner interprétant le mécanisme de la corrosion des métaux. (b) Modèle de pile galvanique proposé et démontré pour la sulfatation des marbres

En accord avec ce mécanisme, l'étape déterminant la vitesse du stade parabolique de la réaction est la diffusion en état solide d'un des ions Ca^{2+}, CO_3^{2-} ou SO_4^{2-}. Parmi ces ions, Ca^{2+} a le plus petit rayon [60]. Selon donc la théorie des désordres [44-46], ces ions Ca^{2+} sont les seuls qui peuvent se déplacer à des sites de désordres réversibles en absorbant l'énergie d'activation; devenant ainsi mobiles, ils peuvent migrer (diffuser). En outre, il est bien connu que le $CaCO_3$ et le $CaSO_4$ sont des conducteurs des cations à des températures supérieures à 350 °C [61], tandis que le gypse est un conducteur d'électrons. Sous le potentiel de la pile galvanique formée, cette diffusion peut aussi avoir lieu à la température ambiante.

Ainsi, le courant électrique de la pile galvanique est assuré par la diffusion des ions Ca^{2+} vers le milieu corrosif et par le mouvement des électrons dans la même direction, comme dans le cas du modèle Wagner pour la corrosion des métaux (fig. 14).

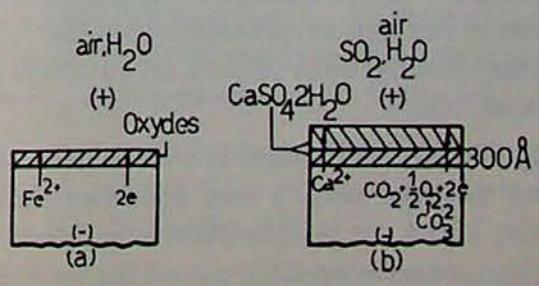


Fig. 14
(a) Modèle de Wagner pour la corrosion des métaux sous forme d'une pile galvanique. (b) Mécanisme analogue, proposé et démontré pour la sulfatation des marbres.

Les réactions électrochimiques sur chaque pôle peuvent être représentées comme suit :

$SO_2 + 0{,}5\ O_2 \rightarrow SO_3$ (réaction catalysée rapide)

$$(+)\ SO_{3(g)} + 0{,}5\ O_{2(g)} + 2e \rightarrow SO^{2-}_{4(s)}$$

$$(-)\ CaCO_{3(s)} \rightarrow Ca^{2+}_{(s)} + CO^{2-}_{3(aq)} \rightarrow Ca^{2+}_{(s)} + CO_{2(g)} + 0{,}5\ O_{2(g)} + 2e$$

$$CaCO_{3(s)} + SO_{2(g)} + 0{,}5\ O_{2(g)} + 2\ H_2O_{(g)} \rightarrow CaSO_4.2\ H_2O_{(s)} + CO_{2(g)}$$

Si on calcule le potentiel standard (25 °C, 1 atm) de cette pile galvanique à l'aide du changement du potentiel chimique, on trouve :

$$E_o = \frac{\Delta\mu}{n_e F'} = 1500 \text{ mV}$$

(en considérant le SO_2) ou $\simeq$ 1130 mV (en considérant le SO_3). Ces valeurs sont suffisantes pour que, comme dans le cas de la corrosion des métaux [41-46], les ions Ca^{2+} se déplacent à des sites de désordres réversibles et soient forcés de migrer en état solide à la température ambiante.

En accord avec cette hypothèse, les nouvelles couches de gypse sont formées sur la surface extérieure (milieu corrosif) des couches déjà formées, de la même façon que les couches d'oxydes se forment pendant la corrosion uniforme des métaux. Ajoutons que, suivant ce mécanisme, il n'est pas nécessaire que le gypse soit poreux.

Le modèle de la pile galvanique facilite l'interprétation de la valeur d'énergie d'activation (14,3 ± 1,5 kcal/mol) pour le premier stade linéaire de la sulfatation (jusqu'à une épaisseur de gypse d'environ 300 Å). Cette valeur ne peut pas être attribuée à une seule étape élémentaire, elle est une énergie d'activation « mixte », et correspond à un mélange d'étapes élémentaires, par exemple, à la désorption d'un ion et à sa diffusion.

Cet ion ne peut pas être en état solide (dans ce cas l'énergie d'activation serait de 16-19 kcal/mol) pas plus qu'en état gazeux (énergie d'activation 1-4 kcal/mol) [44-46]. La valeur trouvée correspond à la désorption des ions CO_3^{2-} (8-10 kcal/mol) de l'interface $CaCO_3/CaSO_4.2H_2O$ et à leur diffusion sous l'action du potentiel de la pile galvanique (4-6 kcal/mol, si on prend en considération les phénomènes de la relaxation des ions et de l'électrophorèse) [63-64]; en additionnant ces deux valeurs, on obtient la valeur de 14 kcal/mol.

Ainsi, l'étape déterminant la vitesse de la sulfatation des marbres jusqu'à une épaisseur de gypse d'environ 300 Å est la désorption et la diffusion des ions $CO^{2-}_{3(aq)}$ en solution ($CO^{2-}_{3(aq)} \rightarrow CO_{2(g)} + 0{,}5\ O_2 + 2e$) à travers le film de H_2O adhérant sur $CaCO_3$ vers le milieu corrosif; ces ions traversent les pores de gypse. En même temps, des cations $Ca^{2+}{}_{(l)}$ diffusent dans la même direction, mais cette diffusion n'est pas pour ce stade l'étape déterminant la vitesse de la réaction; en même temps, du SO_2 et des vapeurs d'eau diffusent avec une vitesse supérieure à travers les pores du gypse dans une direction opposée vers l'interface $CaCO_3/CaSO_4.2H_2O$. Ainsi, les nouvelles couches de gypse se forment à l'interface $CaCO_3/CaSO_4.2H_2O$.

Comme l'épaisseur du gypse augmente, le nombre et la longueur des pores diminuent, à cause du fait que le volume molaire du gypse est supérieur à celui du $CaCO_3$ et finalement, pour une épaisseur de 300 Å environ, la dernière couche de gypse formée n'est plus poreuse. C'est ainsi que la sulfatation ne peut pas continuer avec le même mécanisme et se poursuit forcément avec le deuxième mécanisme déjà mentionné, c'est-à-dire l'étape déterminant la vitesse devient la diffusion de Ca^{2+} en état solide; dès ce moment, l'évolution de la sulfatation devient parabolique.

Ce changement de l'étape déterminant la vitesse, après que les produits de la réaction soient arrivés à une certaine épaisseur, est similaire au cas de l'oxydation anodique de l'aluminium [52-59] : jusqu'à une épaisseur de 36 μm d'oxyde, l'étape déterminant la vitesse est la diffusion en solution des ions de l'électrolyte utilisé à travers les pores de $\gamma_1 - Al_2O_3$ vers l'interface Al/Al_2O_3 (énergie d'activation 6 kcal/mol); au-dessus de cette épaisseur, le film d'oxyde devient compact et l'étape déterminant la vitesse pour la formation de $\gamma_2 - Al_2O_3$ est la diffusion de Al^{3+} en état solide (énergie d'activation 18 kcal/mol) [52-59].

Sur la figure 15, le mécanisme proposé est schématiquement présenté.

Selon le procédé de Wagner, pour formuler l'équation de l'évolution de la corrosion uniforme des métaux, nous arrivons à l'expression mathématique suivante pour le premier stade linéaire de la sulfatation :

$$\gamma = \frac{(2Eu\mu'_+\mu'_e V_m)\ t}{n_e F'} = Kt$$

ou bien $\gamma = Dt$, D étant le coefficient de l'électrodiffusion des $CO^{2-}_{3(aq)}$
et à l'expression :

$$\gamma^2 = \frac{(2Eu\mu'_+\mu'_e V_m)\ t}{n_e F'} = Kt$$

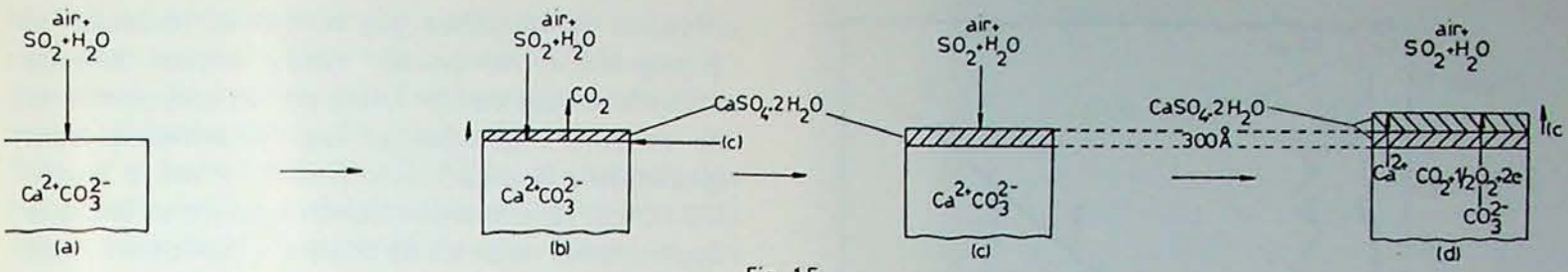


Fig. 15

a) Evolution de la formation de gypse sur la surface d'un marbre par attaque de $SO_2 + H_2O$ + air. (b) Formation de gypse à l'interface marbre-gypse – (c) Vers l'extérieur par diffusion de SO_2 et H_2O à travers les pores de gypse, qui diminuent pendant que l'épaisseur de la couche de gypse augmente (énergie d'activation mixte $\simeq$ 14 kcal/mol, évolution linéaire, étape déterminant la vitesse : la diffusion des ions CO_3^{2-}). (c) Formation d'une couche limite de gypse de $\simeq$ 300 Å par le mécanisme (b), la couche de la surface devient compacte. (d) Suite de la formation de gypse vers l'extérieur ↑. (c') Par diffusion des ions Ca^{2+} en état solide (énergie d'activation pure $\simeq$ 18 kcal/mol, évolution parabolique, étape déterminant la vitesse : la diffusion des ions Ca^{2+} en état solide).

pour le deuxième stade parabolique de la sulfatation.

Dans ces expressions, γ représente l'épaisseur du gypse, E le potentiel de la pile galvanique, u la conductivité spécifique, μ^l_+ le nombre de transport des cations $Ca^{2+}_{(s)}$, μ^l_e le nombre de transport des électrons, V_m le volume moléculaire du gypse, n_e le nombre des électrons échangés par ion de $Ca^{2+}_{(s)}$ (=2), F' la constante de Faraday (96.500 C/mol). Pour les deux cas, le potentiel de la pile galvanique varie comme suit (équation de Nernst) :

$$E = E_o - \frac{2{,}3\ RT}{n_e F'} \log \frac{P_{CO_2}}{P_{SO_2} \cdot P_{O_2}^{0.5} \cdot P_{H_2O}^2}$$

E_o : potentiel standard de la pile galvanique proposée (25 °C, 1 atm, log = O); R : constante des gaz parfaits; T : température; P_{CO_2}, P_{SO_2}, P_{O_2}, P_{H_2O} : pressions partielles de $CO_{2(g)}$, $SO_{2(g)}$, $O_{2(g)}$, $H_2O_{(g)}$ respectivement.

Jusqu'à ce point, les seules évidences de la validité du modèle de la pile galvanique sont les suivantes :

- la valeur de l'énergie d'activation du deuxième stade parabolique;
- l'observation que le gypse se trouve sur et/ou dans les couches « protectrices » du marbre;
- l'observation que sur la surface de gypse sont préservés des détails des statues, qui sont éliminés de la surface du marbre.

La validité du modèle de la pile galvanique et les mécanismes proposés seraient incontestables si leurs conséquences déjà mentionnées sont prouvées expérimentalement.

2.4. *Preuves expérimentales du modèle et des mécanismes proposés*

A. *Formation de la pile galvanique Pt, $CaCO_{3(s)}$ / $CaSO_4 . 2H_2O_{(s)}$ / Pt, $SO_{2(g)}$, $O_{2(g)}$, $H_2O_{(l)}$*

Avec une pâte de $Ca(OH)_2$ contenant 50 % de $CaCO_3$ (pour agir comme germes de cristallisation) et de l'eau, on a entouré un fil de platine. Après un séchage partiel, le $Ca(OH)_2$ était totalement transformé en $CaCO_3$ par action de CO_2. Le $CaCO_3$ était partiellement transformé en $CaSO_4.2H_2O$ (300 μm d'épaisseur environ) par le SO_2 et l'air saturé en vapeur d'eau. Cette électrode a été immergée dans de l'eau distillée, saturée en $Ca^{2+}SO_4^{2-}$, contenue dans un récipient. Un deuxième fil de platine a été immergé dans un autre récipient avec de l'eau distillée, saturée en SO_2 et en air; un mélange de SO_2 et O_2 barbotait sous le fil. Les deux solutions étaient mises en contact électrique à l'aide d'un pont 10 % KCl-agar-agar. Nous avons constaté que, à 25 °C :

a) ce système est en effet une pile galvanique;
b) l'électrode Pt, $CaCO_3$ est le pôle négatif de cette pile;
c) le potentiel de la pile varie avec les pressions partielles de SO_2 ou O_2 selon l'équation :

$$E = E_0 - \frac{2{,}3\ RT}{n_e F'} \log \frac{P_{CO_2}}{P_{SO_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}$$

B. *Variation de la vitesse de la sulfatation en fonction des pressions partielles P_{SO_2} ou P_{O_2}*

Sous les conditions déjà décrites, on a mesuré la vitesse de la réaction à 475 °C avec des pourcentages différents de SO_2 en gardant constante la teneur en O_2 (31 %) et en contrôlant par N_2. La relation entre la constante de vitesse (K) et le logarithme de la pression partielle P_{SO_2} est représentée sur la figure 16.

On a aussi mesuré la vitesse de la réaction avec un pourcentage variable d'O_2, en gardant constante la teneur en SO_2 (30 %) (fig. 17).

Il résulte de ces deux diagrammes que la constante de vitesse varie linéairement avec log P_{SO_2} et log P_{O_2}. On constate également que, pour une même augmentation de P_{SO_2} et P_{O_2}, la valeur de K est deux fois plus grande dans le cas de la figure 16. Cette con-

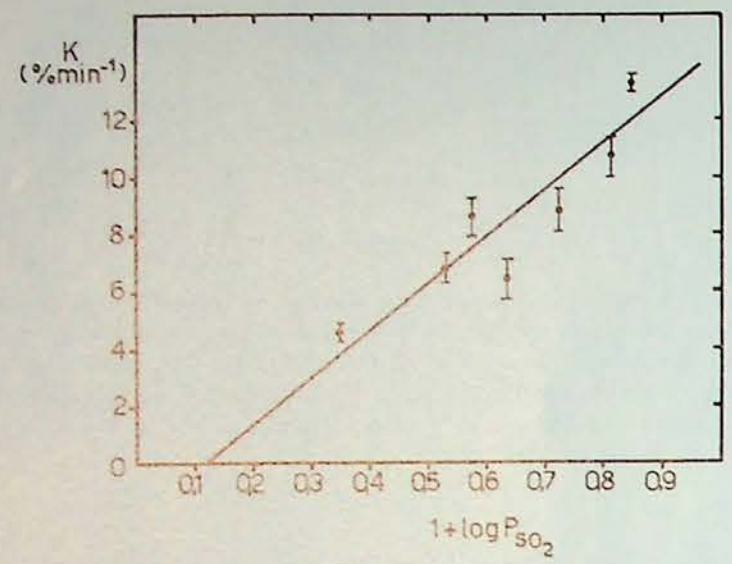


Fig. 16
Constante de la vitesse de la sulfatation en fonction du logarithme de la pression partielle de SO_2.

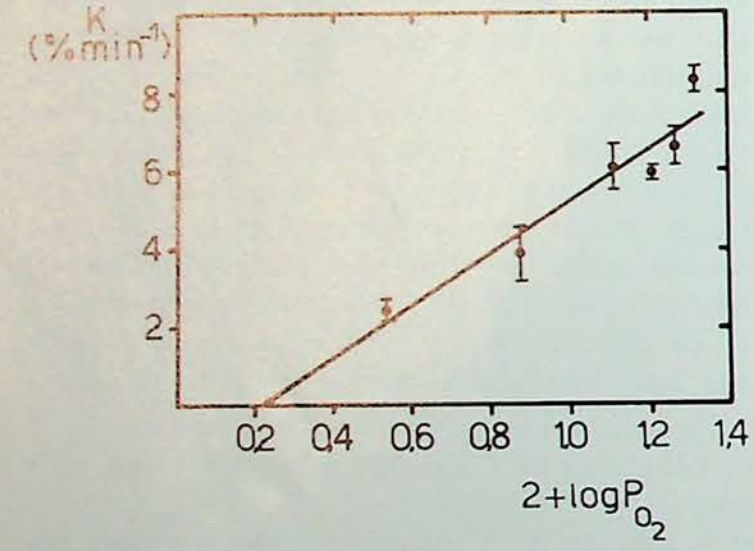


Fig. 17
Constante de la vitesse de la sulfatation en fonction du logarithme de la pression partielle de l'O_2.

conclusion est conforme à l'équation de Nernst rappelée ci-dessus, à cause des exposants différents de P_{SO_2} et $P_{O_2}^{0.5}$

C. *Formation de nouvelles couches de gypse à l'interface marbre-gypse jusqu'à environ 300 Å*

Nous avons indiqué (et illustré par la fig. 15) que, pendant le premier stade linéaire de la formation du gypse (jusqu'à 300 Å d'épaisseur),les nouvelles couches de gypse ne peuvent se former qu'à l'interface $CaCO_3$ - $CaSO_4 . 2H_2O$; il s'agit d'une des conséquences du mécanisme proposé.

Nous avons fait les expériences suivantes : on place à 25 °C des échantillons de marbre dans une atmosphère constituée de SO_2, d'air et d'humidité pendant un temps tel que l'épaisseur du gypse soit inférieure à 300 Å, c'est-à-dire que le taux de la sulfatation ne dépassait pas le 6-8 % (mesure de l'augmentation de poids). Nous avons ensuite marqué la surface du film formé par un crayon noir et une peinture organique et les échantillons sont replacés dans le milieu corrosif (SO_2 + air + humidité) à 25°C. La sulfatation continue comme l'indique l'augmentation de poids de chaque échantillon, mais les marques sont conservées à la surface, parce que les nouvelles couches de gypse se forment à l'interface $CaCO_3$ - $CaSO_4 . 2H_2O$ (fig. 18 a, c).

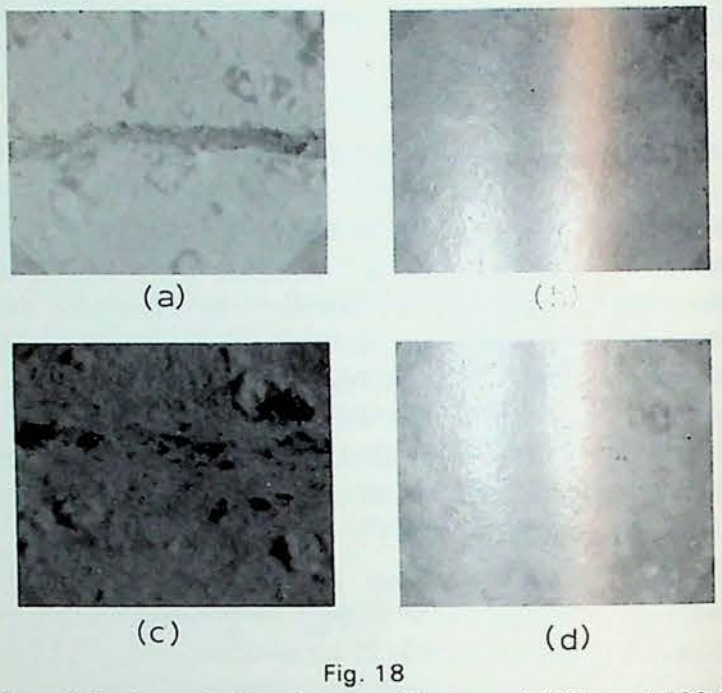


Fig. 18
(a) et (c) Surfaces de films de gypse (épaisseur inférieure à 300 Å) marquées respectivement par un crayon noir et une peinture organique et exposées en conditions de sulfatation à 25 °C jusqu'à une épaisseur de gypse restant inférieure à ~ 300 Å. (b) et (d) Les mêmes éprouvettes après une sulfatation additionnelle jusqu'à une épaisseur de gypse supérieure à 500 Å.

D. *Formation de nouvelles couches de gypse sur les couches précédentes (pour une épaisseur supérieure à 300 Å)*

Si l'attaque que nous venons de décrire continue, les marques disparaissent progressivement lorsque l'épaisseur dépasse ~ 300 Å (11 % de sulfatation) (Fig. 18b, d). Ceci constitue une preuve que, pendant le second stade parabolique de la sulfatation, les nouvelles couches de gypse se forment sur les précédentes.

E. *Diffusion des Ca^{2+} en état solide*

a) La formation des couches de gypse à partir de la surface de $CaCO_3$ vers le milieu corrosif a été prouvée en utilisant des lames minces de marbre et en observant son attaque par les SO_2, air et humidité sous le microscope.

b) Des échantillons en marbre ont été couverts avec différents types de films organiques, utilisés pour la protection du marbre, que l'on trouve dans le commerce. Ensuite, ils ont été placés dans un milieu de SO_2, air et humidité (à 25 °C). Après un intervalle de temps différent pour chaque échantillon, ceux-ci ont été enrobés dans un matériau du type « polyester ». Leurs sections ont été polies, graphitées et analysées par la microsonde électronique (EPMA) pour Ca et S. Quelques résultats sont indiqués sur les figures 19 et 20. Nous avons observé qu'il y a deux catégories de films protecteurs :

1) La première permet la diffusion du SO_2, de l'air et de l'humidité à travers le film, et la formation du gypse sur la surface du marbre, et aussi dans le film (fig. 19a-f); après un laps de temps, le gypse arrive à la surface du film (fig. 19f) et continue à se former vers le milieu corrosif, nourri par la diffusion de Ca^{2+}.

2) La deuxième ne permet pas la diffusion du SO_2, de l'air et de l'humidité. Après une période d'amorçage, durant laquelle les cations Ca^{2+} diffusent à travers le film, il se forme du gypse sur la surface de celui-ci et non plus à l'intérieur (fig. 20).

Des films protecteurs appartenant aux deux catégories ont été analysés à la microsonde EPMA en utilisant notre nouvelle technique [65] : on fait des analyses à la section du même échantillon de marbre couvert par un film protecteur, après des expositions successives dans un milieu de SO_2, air et humidité en utilisant les mêmes voies de faisceau d'électrons. A la figure 21, on voit les résultats pour la catégorie 1 des films et à la figure 22 pour la catégorie 2.

Fig. 20
Formation de gypse sur la surface d'un film protecteur de marbre de 200 μm d'épaisseur, indiqué à la microsonde par la concentration des profils de Ca et S.

Naturellement, la diffusion des Ca^{2+} vers le milieu a également lieu en l'absence du film; le film révèle simplement la diffusion, il ne la crée pas.

Tous ces résultats donnent une confirmation complète du modèle de la pile galvanique et du mécanisme de la sulfatation de la calcite et du marbre.

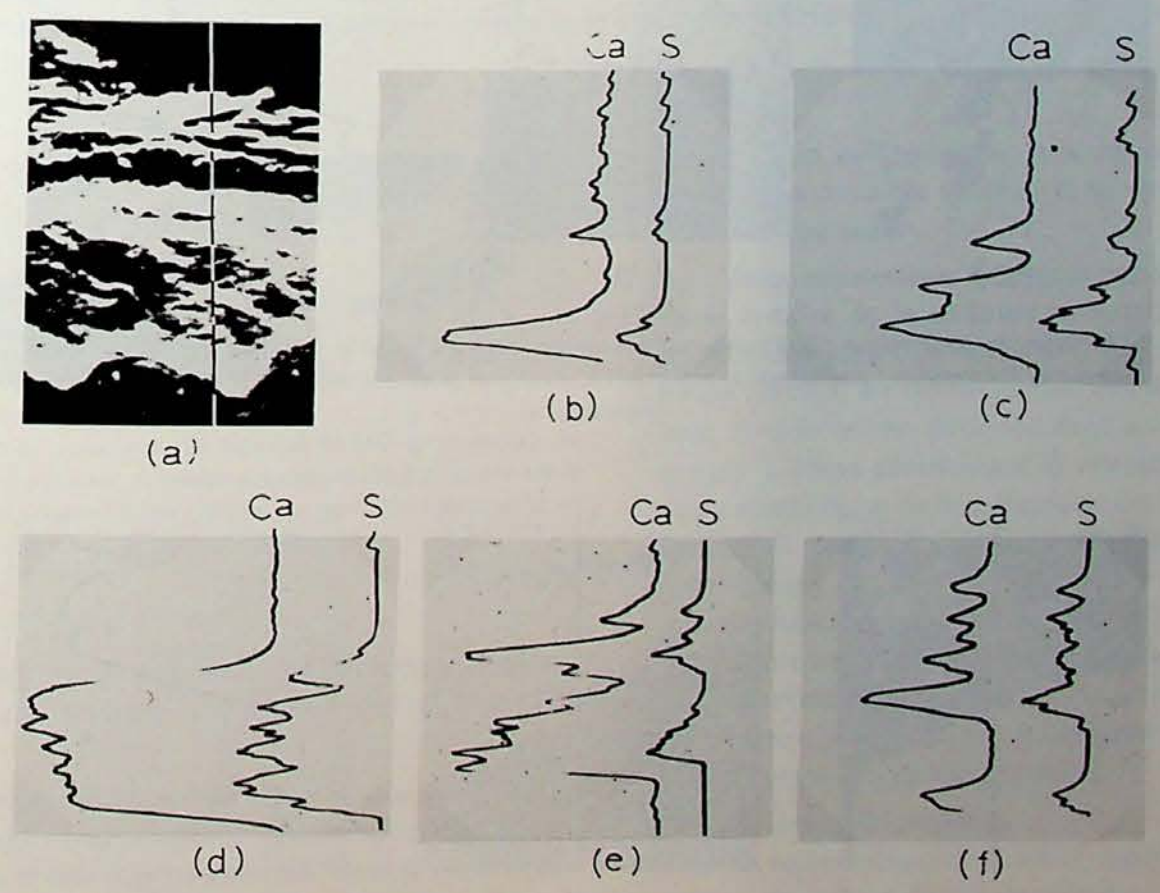


Fig. 19
(a) Photographie × 150 de la section d'un film protecteur de 200 μm. On voit à la microsonde l'évolution du gypse dans le film protecteur et son arrivée à la surface. (b) : 2 jours, (c) : 6 jours, (d) : 7 jours, (e) : 13 jours, (f) : 20 jours.

En présence des films protecteurs, le mécanisme est illustré sur la figure 23.

La conséquence finale de ce mécanisme est la destruction des films protecteurs, à cause de la diffusion préférentielle de Ca^{2+}, plus rapide à partir des centres actifs structuraux ou géométriques (y compris les hauts-reliefs). Il conduit à la formation des cavités à l'interface marbre-gypse et à la fissuration des films, puisque la pression des vapeurs dans les cavités est inférieure à la pression atmosphérique extérieure [fig.23e (1et 2)].

La figure 24 est aussi particulièrement intéressante, illustrant la similarité entre la formation de ZnO sur Zn (où le mécanisme de Wagner est valable) (fig. 24a) et de la formation du $CaSO_4 . 2H_2O$ sur le marbre couvert par un film protecteur (fig. 24 b).

A la suite de ces résultats, nous n'avons permis l'application d'aucun film protecteur commercial sur les monuments et statues de l'Acropole. A la place, nous avons suggéré, et c'est déjà chose faite, le transport des statues dans le musée, dans des caisses transparentes, conditionnées par une circulation d'azote. Ce transport est provisoire. Les monuments retrouveront leur place lorsque la pollution atmosphérique aura diminué (on a pris déjà quelques mesures), ou lorsque l'on aura trouvé une méthode de protection convenable. Ce dernier effort est maintenant facilité après l'élucidation du mécanisme et la précision de l'étape déterminant la vitesse de la sulfatation. En effet, nous connaissons maintenant les qualités exigées d'un film protecteur : il doit retarder ou supprimer la diffusion des ions Ca^{2+}.

3. *CONCLUSIONS*

De ce qui précède, on conclut que :

1. L'attaque atmosphérique accélérée du marbre a commencé à Athènes en 1955, date qui coïncide avec celle du début d'une industrialisation intense de la région athénienne.

2. Il faut préserver les films de gypse sur les surfaces des statues, parce qu'ils ont conservé des détails déjà disparus de la surface des marbres. Nous avons réussi cette préservation par inversion de la sulfatation, c'est-à-dire par transformation du $CaSO_4 . 2H_2O$ en $CaCO_3$.

3. La sulfatation se fait en deux stades successifs, dont le premier est une fonction linéaire du temps et a une énergie d'activation de 14,3 ± 1,5 kcal/mol et le deuxième, qui commence après que l'épaisseur de

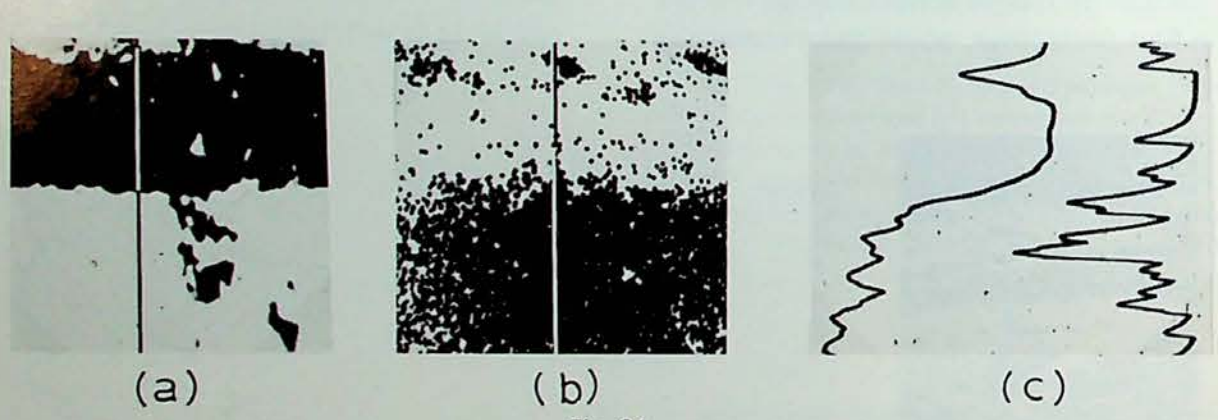


Fig. 21

(a) Micrographie électronique d'une couche protectrice sur le marbre (section). (b) et (c) Micrographie par la microsonde électronique : on constate la présence de calcium et de soufre dans et sur la surface du « film protecteur ».

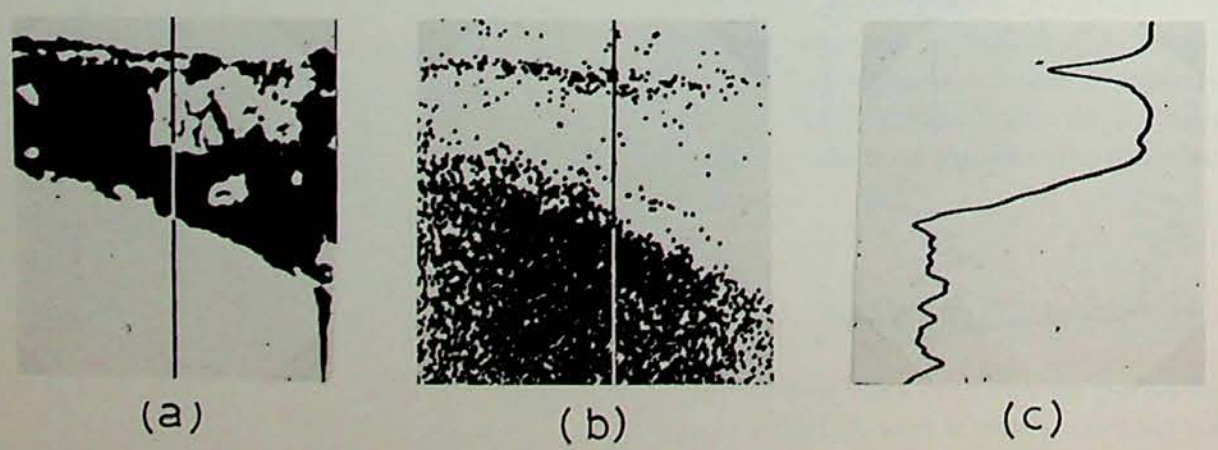


Fig. 22

Micrographies similaires à celles de la figure 21. La « couche protectrice » n'est pas transparente au SO_2, à l'air et à l'humidité. Le gypse se forme à la surface de la couche seulement.

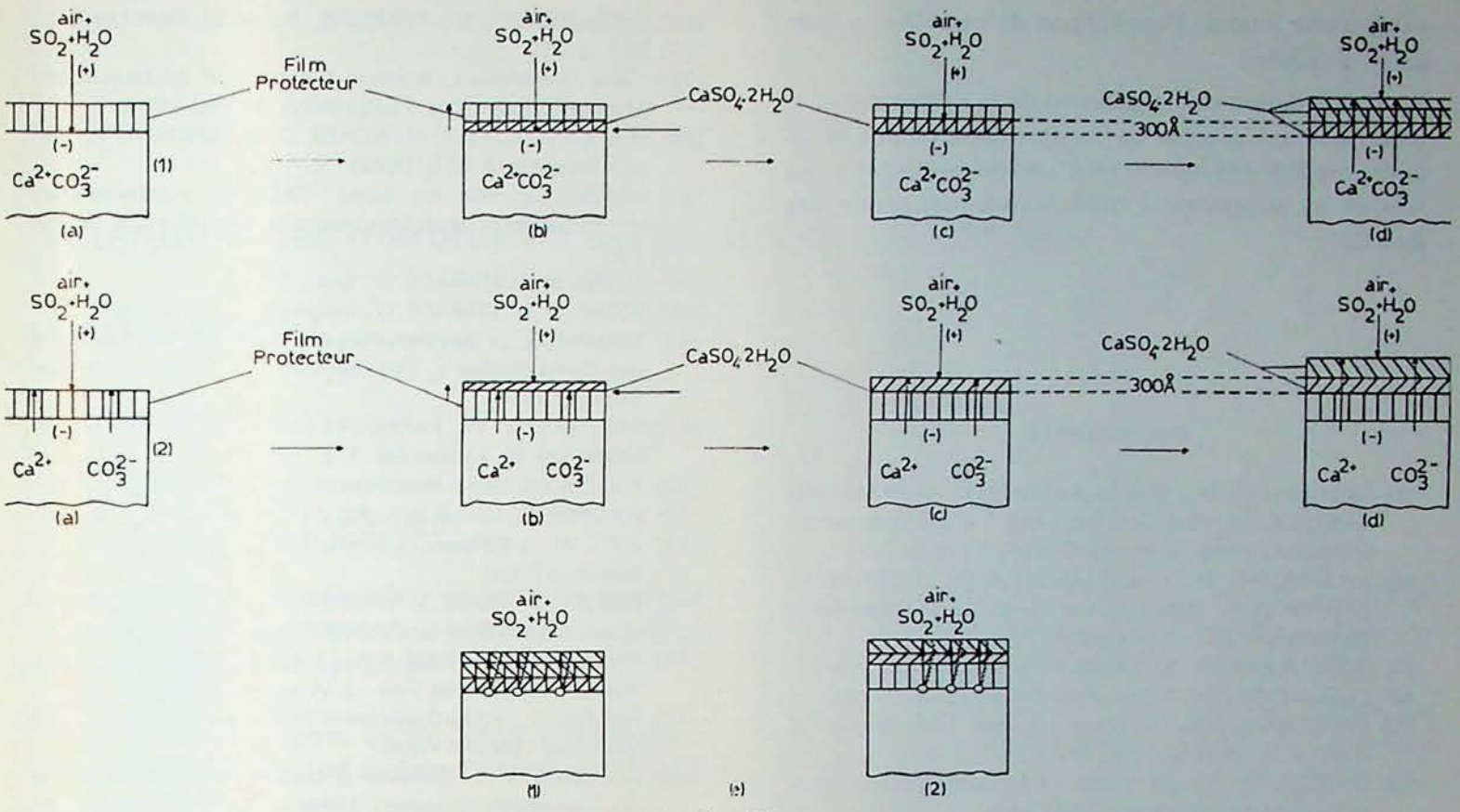


Fig. 23

Formation de gypse malgré le film protecteur :

1. (a) SO_2 et H_2O peuvent diffuser à travers le film. (b) Formation de gypse à l'interface marbre + film — gypse dans le film protecteur selon le mécanisme de la fig. 15 b. (c) Formation de la couche limite de gypse de ~ 300 Å dans le film protecteur (fig. 15). (d) Formation de gypse dans le film protecteur selon le mécanisme de la fig. 15 d, arrivée du gypse à la surface du film et suite de sa formation à la surface de ce film.

2. (a) SO_2 et H_2O ne peuvent pas diffuser à travers le film protecteur. (b) Diffusion des cations de Ca^{2+} à travers le film protecteur et formation de gypse sur sa surface selon le mécanisme des fig. 15 d et 23 1, d. (c) Formation de la couche limite de gypse de ~ 300 Å (fig. 15 c et 23 1, c. (d) Suite de la formation de gypse selon le mécanisme des fig. 15 d et 23 i, d.

1, 2. (e) A cause de la diffusion des ions Ca^{2+} sélectivement à partir des centres actifs de la surface du marbre, il se forme des cavités; la pression atmosphérique étant plus grande que la tension des vapeurs dans les cavités, le film protecteur et la couche de gypse se fissurent.

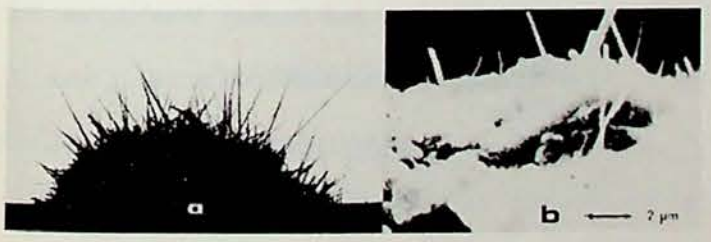


Fig. 24

(a) Formation et croissance des aiguilles de ZnO sur la surface de zinc [66]. (b) Formation et croissance des aiguilles de gypse sur la surface d'une éprouvette en marbre, couverte par une couche en plastique [67].

gypse atteint ~ 300 Å, suit une évolution parabolique et a une énergie d'activation de 17,7 ± 1,5 kcal/mol.

4. Nous avons formulé l'hypothèse, que nous avons prouvée expérimentalement, que la sulfatation a lieu sous forme d'une pile galvanique, dont le marbre est le pôle négatif, le gypse l'électrolyte et le mélange SO_2, air, vapeur d'eau le pôle positif. Le potentiel de cette pile galvanique, calculé à l'aide des formules de la thermodynamique chimique et mesuré expérimentalement, est suffisant pour que des cations Ca^{2+} se déplacent à des sites de désordres réversibles et diffusent en état solide.

5. L'étape déterminant la vitesse pendant le premier stade linéaire de la sulfatation, est la diffusion en solution des ions $CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + 0{,}5\ O_2 + 2e$ vers le milieu corrosif; en même temps, des ions Ca^{2+} diffusent dans la même direction avec une vitesse plus grande. L'étape déterminant la vitesse du deuxième stade parabolique de la sulfatation est la diffusion en état solide des ions Ca^{2+} vers le milieu corrosif; en même temps, des ions $CO_{3(aq)}^{2-}$ diffusent avec une plus grande vitesse vers la même direction. Ce modèle, et particulièrement celui du deuxième stade, est similaire au modèle de Wagner de la corrosion uniforme des métaux; les équations de Wagner sont aussi valables dans le cas de la sulfatation.

6. Ce mécanisme explique :

a) La reproduction des détails superficiels des statues sur la surface du film de gypse.

b) La présence du gypse sur et/ou dans les films organiques ou inorganiques, utilisés pour la protection de marbre et la fissuration de ces derniers. Ce

mécanisme interdit l'application de ces films utilisés jusqu'à présent.

7. L'élucidation du mécanisme de la sulfatation et la détermination précise de l'étape déterminant la vitesse, facilitent la recherche d'un film protecteur, qui retarde ou supprime la diffusion en état solide des ions Ca^{2+}.

BIBLIOGRAPHIE

[1] SKOULIKIDIS, Th., CHARALAMBOUS, D., et PAPAKONSTANTINOU, P., Proc. 2nd Int. Symp. : « The Deterioration of Building Stones », Athens (Greece), 1976, p. 327.
[2] SKOULIKIDIS, Th., CHARALAMBOUS, D., et PAPAKONSTANTINOU, P., Proc. 3rd Int. Congr. : « Deterioration of Building Stones », Venice (Italy), 1979.
[3] SKOULIKIDIS, Th., Br. Corros. J., *14*, 61 (1979).
[4] SKOULIKIDIS, Th., Corros. Prev. Contr., *26*, 5 (1979).
[5] SKOULIKIDIS, Th., Int. Congr. : « Inter. Laws against Pollution », Salonika (Greece), 1979.
[6] SKOULIKIDIS, Th., Int. Congr. : « Atmospheric Corrosion », Hollywood, Miami, Florida (USA), 1980.
[7] SKOULIKIDIS, Th. et PAPAKONSTANTINOU-ZIOTIS, P., Br. Corros. J., *16*, 63 (1981).
[8] SKOULIKIDIS, Th., et CHARALAMBOUS, D., ibid, *16*, 70 (1981).
[9] PELIZER, P. et SABATINI, G., Proc. Int. Symp. : « Conservation of Stones », Bologna (Italy), 1975, p. 443.
[10] ROSSI-MANARESI, R., comme Ref. 1, p. 233.
[11] SKOULIKIDIS, Th. et TASSIOS, Th., Proc. 1st Int. Congr. : « Marine Corrosion and Fouling », Cannes (France), 1964, p. 225.
[12] SKOULIKIDIS, Th., Proc. 1st Inter, Coll. : « Deterioration of Building Stones », La Rochelle (France), 1972, p. 41.
[13] SKOULIKIDIS, Th., comme Ref. 1, p. 347.
[14] HATZIANDREOU, L., ibid., p. 309.
[15] Proc. Int. Meeting on Restoration of Erechtheion, Athens (Greece), p. 42.
[16] SKOULIKIDIS, Th., BATIS, G. et MARINAKIS, D., Proc., 5th Intern. Congr. : « Marine Corrosion and Fouling », Barcelona (Spain), 1980, p. 57.
[17] LEPIDI, M. et SCHIPPA M., comme Ref. 11, p. 139.
[18] PALENI, A, et CURRI, S., ibid., p. 157.
[19] GALIZZI, A., FERARRI, E., et GINETTI, L., comme Ref. 9, p. 221.
[20] BARCELLONA-VERO, L., et MONTE SILLA, M., ibid., p. 223.
[21] PALENI, A. et CURRI, S., ibid., p. 281.
[22] Ministère des Services Sociaux, IV, 1975.
[23] Technical Chamber of Greece : « The Atmospheric Pollution in Athens and the Smog Problem », Athens, 1980.
[24] SCHWAB, G.M., communication personnelle.
[25] ASMUS, J., comme Ref. 1, p. 135.
[26] PALENI, A. et CURRI, S., ibid., p. 153.
[27] LUCKAT, J., Reinhaltung der Luft, *7*, 33 (1973).
[28] VINOT, A., comme Ref. 1, p. 57.
[29] FONDELLI, M., FREDIANI, P., MALESANI, P., MAGANELLI DELL FA, C., PIACENTI, E., TIANO, P. et VANNUCCI, S., ibid., p. 225.
[30] LAZZARINI, L. et BENGOLLI, R., ibid., p. 249.
[31] RAGOT, J., Ann. Mines, Nov.-Dec., 1973.
[32] GERARD, R., comme Ref., 11, p. 33.
[33] WINKLER, E., comme Ref. 9, p. 19.
[34] ALESSANDRINI, G., PERRUZZI, R., et DI CAPITANI, L., ibid., p. 137.
[35] « Carta di Venezia », National Congress of Architects and Monument Specialists, Venice (Italy), 31 mai 1964.
[36] URONE, P., LUTSEP, H., NOYES, C. et PARCHER, F., Current Research, *2*, 611 (1968).
[37] SRAMEK, J., Proc. Int. Symp. UNESCO : « Deterioration and Protection of Stone Monuments », Paris (France), 1978, 2.8.
[38] SERRA, M. et STARACE, G., ibid., 3.7.
[39] SERRA, M. et STARACE, G., comme Ref. 11, p. 185.
[40] SPRUNG, S. : « Das Verhalten des Schwefels beim Brennen von Zementklinker », Schriftenreihe der Zementindustrie, 1964, p. 31.
[41] SKOULIKIDIS, Th., PAPAKONSTANTINOU, P. et CHARALAMBOUS, D., comme Ref. 1, p. 171.
[42] Proc. 6th Int. Symp. Reactivity of Solids, New York, 1968.
[43] WAGNER, C., Corros. Sci., *13*, 23 (1973).
[44] JOST, W. : « Diffusion in Solids, Gases », 1952 (New York : Academic Press).
[45] EGGERT, J., HOCK, L. et SCHWAB, G. : « Lehrbuch der physikalischen Chemie », 1968 (Stuttgart : S. Hirzel).
[46] PRIGOGINE, J., et RICE, S.A. : « Advances in Physical Chemistry », 1973, (New York : J. Wiley and Sons).
[47] HAUFFE, K. : « The Oxidation of Metals and Alloys », 1965 (New York : Plenum Press).
[48] ROMANOV, V. : « Corrosion of Metals », Israel Program for Sci. Translation, Jerusalem, 1969.
[49] KAESCHE, H. : « Die Korrosion der Metalle », 1966 (Berlin : Springer).
[50] FONTANA, M. et GREENE, N.D. : « Corrosion Engineering », 1978 (London : McGraw Hill).
[51] SHEIR, L. : « Corrosion », vols I, II, 1976 (London : Newnes-Butterworth).
[52] SKOULIKIDIS, Th., KARALIS, S. et MENTOJIANNIS, P., Kolloidzeitschrift, 149 6 (1956).
[53] SKOULIKIDIS, Th., PAPATHANASIOU, Ch. et MARANGOZIS, J., ibid., *150*, 54 (1957).
[54] SKOULIKIDIS, Th. et BATZIAS, E., Proc. 4th Int. Congr. ICSOBA, Athens (Greece), 1978, p. 338.
[55] SKOULIKIDIS, Th. et KARAGEORGOS A., Proc. 3rd Int. Congr. Marine Corrosion and Fouling, Washington D.C. (USA), 1972, p. 499.
[56] SKOULIKIDIS, Th. et KARAGEORGOS, A., Br. Corros. J., *10*, 17 (1975).
[57] SKOULIKIDIS, Th. et KARAGEORGOS, A., ibid., *13*, 28 (1978).
[58] SKOULIKIDIS, Th., KARAGEORGOS, A. et SPATHIS, P., comme Ref. 16, p. 28.
[59] SKOULIKIDIS, Th., PARASKEVOPOULOS P. et ARGYRIOU, D., Kolloidzeitschrift, *168*, 154 (1960).
[60] WAESTED, R.C. : « Handbook of Chemistry and Physics », 55th Ed., 1974 (Cleveland : CRC Press).
[61] PARKHOMENKO, E. : « Electrical Properties of Rocks », 1967 (New York : Plenum Press).
[62] BOCKRIS, J.O. et DRAZIC, M. : « Electrochemical Science », 1970 (London : McGraw Hill).
[63] LÖWENHEIM : « Modern Electrochemistry », 1974 (New York : J. Wiley and Sons).
[64] DELANEY, P. et TOBIAS, C.W. : « Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering », vol. IX, 1973 (London : Wiley Interscience).
[65] SKOULIKIDIS, Th. et VASSILIOU, P., comme Ref. 16, p. 500.
[66] HAUFFE, K. : « Reaktionen in und an festen Stoffen », 1966 (Berlin : Springer).
[67] LEWIN, S. et CHAROLA, A., Scan. Electr. Microsc., *7*, 695 (1978).

Altération des marbres en Belgique et leur traitement

Pierrik de HENAU *

RESUME

Le marbre est défini comme un matériau généralement calcaire dont la valeur décorative est mise pleinement en valeur par le poli.

Du type d'altération, qu'on définit comme toute modification de l'état de surface, dépendra le choix du traitement à appliquer.

Si l'encrassement, non pénétrant, peut être enlevé par un simple nettoyage, la souillure, pénétrante, demande, pour être enlevée, un traitement adapté à sa nature et à la profondeur de la pénétration.

De tout temps, des produits de protection ont été proposés pour garder la fonction décorative du marbre, mais seul l'entretien régulier se montre vraiment efficace.

ZUSAMMENFASSUNG

Marmor ist ein im allgemeinen kalksteinartiges Material, dessen dekorativer Wert durch Polieren voll zur Geltung gebracht wird.

Von der Art der Verwitterung, wir jede Veränderung des Oberflächenzustandes genannt wird, hängt die Wahl der anzuwendenden Behandlung ab.

Wenn auch eine nicht eingedrungene Verschmutzung durch einfache Reinigung entfernt werden kann, so erfordert eingedrungener Schmutz zur Entfernung jedoch eine Behandlung, die an die Art des Schmutzes und die Eindringtiefe angepaßt ist.

Schon immer wurden Schutzprodukte angeboten, um die dekorative Funktion des Marmors zu erhalten, aber nur eine regelmäßige Pflege erweist sich als wirklich wirksam.

* Chef de Section, Institut Royal du Patrimoine Artistique, Parc du Cinquantenaire 1, B-1040 Bruxelles.

SAMENVATTING

Marmer wordt bepaald als een materiaal dat over het algemeen kalkachtig is, waarvan de decoratieve waarde ten volle geëxploiteerd wordt door de glans.

De keuze van de toe te passen behandeling zal afhankelijk zijn van het type verwering dat bepaald wordt zoals elke wijziging van de oppervlaktetoestand.

Zo de (niet indringende) vervuiling kan verwijderd worden door gewone reiniging, dan vereist de (indringende) bezoedeling een behandeling die aangepast is aan de aard en de diepte van de indringing om verwijderd te worden.

Te allen tijde werden beschermingsprodukten voorgesteld om de decoratieve functie van het marmer te behouden, maar enkel een regelmatig onderhoud blijkt werkelijk doeltreffend te zijn.

SUMMARY

Marble is defined as a substance consisting primarily of limestone, having a decorative value which can be developed fully by surface polishing.

The choice of the treatment to apply will depend on the modifications which the surface may have underground.

Whereas surface dirt which has not penetrated the marble can be removed by simple cleaning, penetrating stain must be removed by a surface treatment appropriate to the type of dirt and to the depth of penetration.

At no time has there been a lack of proposals for protective coatings intended to preserve the decorative effect of marble, but it would seem that the only effective treatment is regular cleaning.

1. *DEFINITION DES MARBRES*

En dehors des marbres vrais, au sens géologique du terme, c'est-à-dire des calcaires métamorphiques cristallins, nous définirons, à l'instar de C. Camerman, les marbres comme étant des roches généralement calcaires, prenant bien le poli et présentant un aspect décoratif.

Si l'effet décoratif peut être obtenu, en statuaire notamment, par le contraste des tailles et du poli, ce dernier, en construction, donne aux marbres leur pleine valeur décorative.

Les roches ainsi définies, lorsqu'elles sont employées non polies en construction, seront appelées pierres marbrières.

Les marbres belges sont tous des calcaires très compacts, dont la porosité à l'eau est très faible. Ils présentent parfois des parties plus tendres ou des vides qu'il est nécessaire de mastiquer pour être utilisés.

Leurs origines sont variées :

- marbre provenant de récifs isolés ou subcontinus,
- marbres d'origine biochimique,
- marbres d'origine organogène,
- marbres d'origine bréchique.

Outre les marbres belges dont les variétés se cantonnent dans les tonalités noires, grises et rouges, on trouve sur le marché bien d'autres marbres, de nature et de provenance variées.

En dehors des marbres blancs cristallins et autres calcaires compacts, on trouve quantité de roches éruptives ou métamorphiques, granits, syénites, porphyres, etc. Ces dernières roches, par leur dureté, leur composition et leurs caractéristiques mécaniques, se distinguent assez bien des autres marbres pour en faire une catégorie à part.

2. *ALTERATION DES MARBRES*

2.1. *Définition des états de surface*

Avec le temps, l'aspect de surface d'un marbre exposé aux intempéries se modifie par l'apport de matières étrangères, que nous appelons salissures, ou par des modifications d'ordre chimique et physique, plus ou moins importantes. Cet aspect dépend, entre autres, de la nature et de la composition du matériau, de l'agressivité du milieu, des conditions et de la durée de l'exposition.

Parmi *les salissures*, ou apports extérieurs, il y a lieu de distinguer :

Les encrassements, ou dépôts superficiels de matière non pénétrante, distincts du support, ne modifient en rien le marbre lui-même. Les exemples sont nombreux et les origines variées, que ce soit des matières terrigènes, des poussières météoriques ou des suies apportées par le vent, des organismes vivants ou des matières d'origine biologique; elles viennent se déposer à la surface, s'y agglomèrent et se fixent plus ou moins fermement en une fine pellicule ou en croûte relativement épaisse. Tels sont certaines croûtes de gypse, l'enfumage, l'empoussièrement, les vernis résineux dus à la proximité d'arbres, le verdissement par les algues, les déjections d'oiseaux...

Les souillures, également composées de matières étrangères mais, contrairement aux précédentes, elles pénètrent plus ou moins fortement le marbre et s'y fixent en n'en modifiant pratiquement que l'aspect. Les souillures sont presque toujours dues à des causes humaines directes ou non. Elles sont rarement étendues et forment le plus souvent des taches localisées à caractère accidentel.

Si la porosité du marbre est — nous l'avons dit — très faible, elle est loin d'être nulle, et la pénétration et l'absorption de matières, en quantité même minime, peuvent avoir des effets chromatiques importants, soit par la coloration propre à ces matières, soit par la modification de la réfraction de la lumière créée par le « mouillage » de la surface des microvides intergranulaires; c'est le cas des huiles et des graisses. Dans le premier cas, nous pouvons citer la rouille et les sels de cuivre provenant d'objets voisins, le goudron ou autres matières colorantes dus à des graffiti par exemple.

Un cas particulier de souillure doit être signalé ici, car il trouve son origine dans la substance même du marbre. Par réaction colorante, des matières organiques originelles contenues dans certains marbres, blancs en particulier, sous l'effet de solutions faiblement alcalines, apparaissent parfois sous forme de taches brunes. Ce phénomène est observé sur des sols en marbre posés à l'aide de ciment blanc, plus riche que les autres en alcali.

2.2. *Modifications*

Les modifications qui affectent la composition et/ou la texture sont provoquées par l'action combinée des agents météoriques (eau, température, vent, sels,...) et biologiques (bactéries, algues, lichens,...).

L'altération est un phénomène naturel inévitable, irréversible, plus ou moins rapide; c'est l'action d'un milieu physico-chimique en déséquilibre permanent sur un matériau placé, par sa mise en œuvre, dans un état de réaction permanente.

Si les mécanismes de l'altération sont nombreux et complexes, où l'eau joue un rôle prépondérant, l'homme n'a fait qu'ajouter à la nature, par la pollu-

tion, entre autres, que quelques éléments agressifs en plus.

Patine

Avant tout, qu'est-ce que la patine ? Ce mot magique avec lequel on a tout dit et qui est si difficile à définir avec exactitude.

La patine du temps, la teinte que le temps donne aux objets, cette espèce de crasse dont ils se chargent, comme aussi les concrétions terreuses qui se forment à la surface des marbres antiques, confèrent aux choses un charme que ne possède pas le neuf, ayant lui un éclat dur et peu harmonieux à l'œil. Nous sommes, du point de vue scientifique, devant un flou artistique.

Il semble vain de vouloir définir la patine d'une manière précise; c'est l'état superficiel d'une pierre depuis longtemps soumise aux influences diverses des agents atmosphériques. C'est donc une modification de sa surface produisant un changement de teinte et/ou de texture qui n'entraîne pas la destruction profonde du matériau.

Par oxydation lente des matières charbonneuses, nos marbres noirs et bleus prennent, en un temps plus ou moins long, une patine grise.

Les marbres calcaires voient généralement se blanchir leur surface par la redistribution de la calcite et la perte du poli.

Altération

On parlera d'altération lorsque les modifications entraînent progressivement la destruction de l'objet.

On distingue généralement :

- *la désagrégation* ou fragmentation, causée par des effets mécaniques, le gel, la dilatation thermique, l'hydratation, la cristallisation de sels;
- *la décomposition* résultant d'actions chimiques ou biochimiques, oxydation, hydrolyse, dissolution.

Les marbres belges étant très peu poreux, l'altération se limite à l'érosion plus ou moins importante de surface, l'altération des mastics, ou l'éclatement causé par un défaut de mise en œuvre; gonflement de tenons en fer, mal isolés, qui rouillent; dilatation thermique contrecarrée par la rigidité des joints, etc.

Les marbres cristallins, par contre, avec les variations fréquentes de température et d'humidité, avec la sulfatation, peuvent être profondément altérés et même se transformer en sable.

3. *TRAITEMENTS*

La sauvegarde de la fonction décorative d'un marbre exige en premier lieu un entretien régulier de sa surface pour éviter l'accumulation des encrassements et si possible l'effet inesthétique des souillures.

Les encrassements s'enlèvent assez facilement par un simple *nettoyage,* cependant certaines précautions doivent être observées. S'il faut garder le poli, encore en bon état, le nettoyage à l'eau, par ruissellement ou à la vapeur saturée, s'impose. Il peut être facilité par un brossage et, si la saleté est grasse, par l'emploi de savon blanc ou d'un détergent non ionique. Il en va de même en statuaire lorsque la taille a une importance esthétique.

Lorsque la surface a perdu son poli, l'emploi de bouillie à l'acide oxalique donne parfois un bon résultat. Dans bon nombre de cas, un repolissage mécanique est seul opérant pour retrouver le caractère marbrier du matériau, c'est-à-dire un poli décoratif.

Le nettoyage à l'eau peut s'avérer dangereux lorsque sous l'encrassement, une croûte de gypse par exemple, le marbre saccharoïde est profondément altéré et n'a plus qu'une certaine cimentation par le gypse. Par sa dissolution, une partie plus ou moins importante de la surface du marbre va immanquablement disparaître au nettoyage.

En ce qui concerne les souillures, il est nécessaire de recourir à des procédés chimiques appropriés, surtout si elles sont anciennes.

Tout agent en solution possédant une coloration propre ou acquérant une coloration par réaction, par oxydation ou par un effet optique, est capable de se fixer et de diffuser dans le marbre pour former des taches difficiles, voire impossibles à enlever.

Le traitement de ces taches fait appel, soit à la dissolution de la matière colorante à extraire, soit à une réaction chimique de décoloration.

Si les secondes sont souvent appliquées directement à la surface du marbre, il y a tout intérêt à préparer une pâte réactive qui permet à la fois un contact plus long et plus régulier du produit. En séchant, ces pâtes absorbent les matières solubilisées qui migrent en surface par évaporation du solvant.

Le support des substances actives peut être constitué suivant le cas : de blanc d'Espagne, de chaux hydratée, de talc, d'attapulgite ou de carboxymethylcellulose, autrement dit de la colle à tapisser. Dans le cas où la volatilité du solvant est élevée, on contrarie son évaporation en recouvrant la pâte par une feuille de plastique, le temps nécessaire à l'action du produit.

Il est certain que les meilleurs résultats seront obtenus si le détachage est réalisé très tôt, avant que la pénétration et l'adsorption ne soient complètes. Il convient toujours de réaliser un essai préalable à petite échelle pour s'assurer de la méthode et éviter l'irréparable.

Les taches les plus fréquemment rencontrées sont : *la rouille* que l'on traite à l'acide oxalique avec ou sans

addition de bifluorure ammonique, à l'acide citrique ou au citrate de sodium dans l'eau glycérinée ou encore à l'aide d'agent complexant.

Le cuivre s'élimine au moyen d'une pâte au chlorure d'aluminium et à l'ammoniaque.

Les huiles et les graisses demandent des solvants chlorés, une attapulgite sèche, une pâte au phosphate trisodique et perborate de sodium ou un émulsifiant comme le Finasol.

Les taches brunes dans les marbres blancs, pouvant avoir des origines différentes, il y a lieu d'être particulièrement attentif. Si ces taches ont pour origine de minuscules cristaux de *pyrite*, on peut les traiter comme la rouille, bien que celle-ci réapparaisse après un temps plus ou moins long.

S'il s'agit de matières organiques, il est possible, sinon de les enlever, d'en atténuer la teinte par application répétée de cataplasmes à l'hypochlorite de soude (5 à 10 %) ou d'eau oxygénée à 5 ou 10 volumes.

Les algues vertes et les mousses, peu adhérentes, s'enlèvent sans grosse difficulté au jet d'eau et à la brosse, du moins sur une surface lisse.

Les lichens, plus fortement accrochés, devront être préalablement ramollis avec une solution d'ammoniaque avant d'être brossés énergiquement.

Dans le cas de marbre saccharoïde, comme les algues se développent sous la surface dans l'espace intergranulaire, il faudra le traiter avec une solution désinfectante. Les sels de cuivre sont à cet égard très actifs, mais ils sont colorés. On utilisera plutôt un fluosilicate de zinc ou de magnésium en solution à 4 % ou une amine quaternaire déjà active à moins de 0,1 %.

Lorsqu'enfin l'altération est grande et que les parties tendres ou mastiquées s'érodent ou se détachent, il n'y a pas d'autre solution que de procéder à un nouveau masticage avant de repolir les parties endommagées.

4. *PROTECTION DE LA SURFACE DES MARBRES*

S'il perd avec le temps sa fonction décorative, le marbre perd du même coup sa raison d'être; c'est pourquoi on a cherché avec plus ou moins de succès à protéger sa surface contre les méfaits de l'altération.

La cire d'abeille est parmi les premiers produits à avoir été utilisés dans ce but. Son rôle, comme celui des cires minérales et de la paraffine, est essentiellement d'isoler la surface des agents d'altération et de préserver le marbre de tout changement d'aspect. Elle peut avoir été utilisée également pour augmenter ou retrouver le poli, la brillance. Malheureusement, les cires retiennent assez bien les poussières et favorisent l'encrassement. Certaines d'entre elles réagissent, en présence d'humidité, avec le calcium donnant à la longue un aspect dépoli à la surface.

L'huile de lin également est utilisée pour donner ou redonner un beau poli. Ici aussi, avec le temps, elle perd sa fonction, devient peu soluble et jaunit. Sur marbre noir, elle aide ou n'empêche pas la patine de se former.

Il n'est pas impossible que certaines résines synthétiques puissent jouer un rôle protecteur.

Les acétates de polyvinyle, par exemple, ont une bonne stabilité et résistent bien à l'abrasion, ils ne sont pas attaqués par les bactéries ou les lichens.

Certains polymères acryliques donnent en plus à la surface traitée une bonne protection contre les salissures et les barbouillages.

Les silicones, dont le rôle hydrofuge n'est plus à démontrer, sont malheureusement lessivés avec plus ou moins de facilité des surfaces lisses et la durée de protection sur le marbre n'en est que plus limitée.

Comme leur efficacité augmente en fonction de leur pénétration, ils peuvent jouer un rôle dans le cas de marbres saccharoïdes (diminuer le lessivage trop rapide des produits fongicides, diminuer la pénétration d'eau, l'hydratation et l'érosion).

Si on examine les exigences demandées aux produits de traitement : une protection à long terme, sans changer l'aspect, il serait peut-être moins utopique de trouver un bon matériau de remplacement que de vouloir changer la nature des matériaux défectueux.

Si on ne peut arrêter le processus irréversible et naturel de l'altération, on peut essayer tout de même de retarder l'échéance de la destruction par des actions répétées d'entretien qui peuvent aller du simple dépoussiérage au repolissage, lorsqu'il vient à temps. *L'entretien* bien compris est le plus sûr moyen de prolonger l'existence et la valeur décorative des marbres.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

G.G. Amoroso et C. Felix. Les produits de traitement de la pierre de taille et la lutte contre l'irréversibilité des processus d'altération. Matériaux et Techniques, Paris 1978, N^{os} 3, 7, 8, 9, 10 et 11-12.

C. Camerman. Les pierres naturelles de construction. Annales des travaux publics de Belgique, n° 4, 1960/61.

P. de Henau. Les matériaux pierreux et leur nettoyage. Problèmes des monuments historiques. Revue des Ingénieurs et Industriels, 1977, n° 1.

Du Centre Scientifique et Technique de la Construction :

- Marbres, onyx et granits durs utilisés en Belgique, n.i.t. 72-1968;
- Ravalement des façades, choix des méthodes de nettoyage, n.i.t. 121-1978;
- Pathologie du bâtiment, pierre et marbre. Cours-conférences n° 12, de 1969 à 1980.

Conclusions générales

Giorgio MARINELLI *

Mon ami le Professeur Panou, avec le manque délicieux d'esprit démocratique qui le caractérise, m'a attribué la tâche difficile et très délicate de faire le point sur le résultat de ces trois jours de Congrès. Il a probablement pensé à moi parce que l'Italie est notoirement un pays de poètes, de saints et de navigateurs.

Comme les Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale étaient organisées dans deux salles de conférences situées à des étages différents, je pouvais, en tant qu'Italien, choisir de faire comme Saint Antoine qui, semble-t-il, connaissait l'art de se trouver simultanément en deux endroits différents, ou bien naviguer d'un étage à l'autre; c'est ce que j'ai fait.

J'espère donc que les collègues qui ont présenté des communications voudront bien m'excuser. Je comprends bien qu'il n'est pas agréable pour un orateur de voir dans la salle un monsieur, qui semblait écouter avec attention, se lever et sortir en grande vitesse pour réapparaître dix minutes plus tard.

Je commencerai mon résumé-commentaire par les discours de la séance d'inauguration.

Emile Lacroix, Gouverneur de la Province de Namur, a utilisé dans son bref discours un mot qui m'a frappé : Renaissance. En tant que Florentin, ce mot m'est familier et je pense qu'il a été utilisé d'une façon heureuse pour qualifier la reprise en Wallonie de l'industrie marbrière, jadis florissante et pour l'instant endormie. La Renaissance en Italie à la fin du XVe siècle a été surtout la prise de conscience que le temps était venu pour la reprise du développement dans tous les secteurs de l'activité humaine, matérielle et spirituelle. Pendant des siècles, des événements défavorables avaient fait abandonner cette voie. Je dois ajouter que, à Florence en particulier, la Renaissance a été fortement favorisée par la grande richesse de la ville, elle-même conséquence de l'esprit d'initiative, du mordant et de l'agressivité des marchands, des industriels et des banquiers locaux.

J'ai bien apprécié aussi l'introduction de Jean Michot, Recteur de l'Université Libre de Bruxelles. M. Michot a su joindre à ses connaissances scientifiques étendues dans le domaine géologique une sensibilité remarquable aussi bien aux problèmes industriels qu'aux questions culturelles et artistiques.

J'ai écouté vraiment avec plaisir mon collègue et ami Georges Panou. Il est agréable de constater qu'un scientifique et un technicien de sa taille (pardon : de sa valeur !) est pétri d'humanisme et de culture classique bien digérée.

Willy Monfils, Directeur Général de l'Office Belge du Commerce Extérieur, a fait une analyse claire et rigoureuse du problème du marbre en Belgique. Le marché de ce produit, qui selon une expression heureuse formulée au Congrès, est « éternellement d'une brûlante actualité », est en expansion dans un grand nombre de pays, souvent des pays riches du Tiers-Monde. Mais, il est aussi en expansion en Belgique où, hélas, on utilise une grande quantité de marbres d'importation sans rechercher une compensation par l'exportation parallèle de marbres belges. Dans ce contexte, que faut-il faire ? L'analyse de M. Monfils a été claire, documentée et cartésienne. La promotion intelligente des études du marché, la participation aux manifestations à l'étranger, l'organisation de réunions d'études, l'invitation des spécialistes et bien d'autres choses encore sont parmi les premières mesures à prendre. Si je peux me permettre une observation, cette analyse est un peu trop cartésienne. En effet, il ne faut pas oublier qu'à la base d'une crise dans un secteur d'activité indus-

* Professeur aux Universités de Pise et Bruxelles et Docteur h.c. de l'U.L.B., Via Santa Maria 53, I-56100 Pise.

trielle quelconque, il y a très souvent des facteurs humains et des obstacles psychologiques qu'il faut dépasser si l'on veut réduire la crise.

Paul Dumon nous a fait un rapport très détaillé du développement de l'industrie marbrière en Wallonie de l'époque romaine à nos jours. Comme il s'agit de quelque deux mille ans d'histoire, l'exposé a été long, mais fort intéressant. Il faut rappeler qu'il est difficile de préparer la reprise d'une activité sans en connaître à fond les précédents historiques, techniques et économiques.

Paul Philippot nous a parlé du marbre dans l'histoire de l'art. Tous ceux qui l'ont écouté ont manifesté leur ravissement. Paul Philippot a rappelé surtout aux économistes et industriels, mais aussi aux chercheurs, aux techniciens, que dans le domaine du marbre il ne faut pas seulement envisager la technologie et les chiffres d'affaires, mais aussi quelque chose de différent qui sort des limites étroites de la physique pour s'étendre dans le vaste espace de la métaphysique. C'est le domaine de la sensibilité créative, de la beauté.

Je voudrais bien associer ici l'exposé de Ph. Roberts-Jones sur le Marbre dans l'Art Contemporain qui a suivi d'un jour le discours de P. Philippot. Comme le précédent, cet exposé a été clair, plein de chaleur humaine et enrichissant pour tout le monde.

Je profite de l'occasion pour dire un mot sur la *Salle des Marbres* qui a été inaugurée au Musée d'Art et d'Histoire du Cinquantenaire. Il faut se féliciter de cette heureuse initiative avec la Direction du Musée, mais surtout avec Jean-Charles Balty, qui nous a présenté une introduction très intéressante. Il n'est pas sans intérêt de constater que la plus complète des collections de marbres antiques existant au monde et à présent la mieux présentée est la collection Ravestein. Elle ne se trouve pas à Rome mais en Belgique.

J'en viens maintenant à la journée du mardi 17 novembre durant laquelle les réunions ont été tenues dans deux salles différentes. On ne peut que féliciter les organisateurs qui ont voulu joindre aux problèmes techniques et économiques du marbre, une partie historique et artistique. Et c'est avec beaucoup de satisfaction que j'ai vu de nombreux techniciens et surtout de jeunes étudiants, futurs ingénieurs de Polytechnique, aller écouter les archéologues et historiens de l'art.

La séance au deuxième étage a été ouverte avec l'exposé magistral du Professeur Martin sur les rapports entre le développement de la civilisation et l'utilisation des marbres dans la Grèce ancienne, ainsi que la relation entre les marbres et l'environnement.

Le Professeur Pensabene nous a exposé les problèmes tant psychologiques que pratiques posés par l'utilisation du marbre dans le monde romain. Une chose m'a particulièrement frappé : le fait que le stockage de blocs et d'objets (1) de marbre le long du Tibre dans le port de Rome, représentait aussi un bon investissement. C'est quelque chose qui fait encore réfléchir, même aujourd'hui.

M. Medaets, Directeur Général des Mines de Belgique, a présidé la séance technique et a défini clairement la situation actuelle en Belgique. La différence entre les importations et exportations des marbres représente ces dernières années un mali de 4,5 milliards de FB. Il est évident qu'il faut faire quelque chose.

Les exposés des industriels étaient attendus avec intérêt.

M. Van den Wildenberg, Président de l'Union des Carrières et Scieries de Marbre de Belgique, et mon ami M. R. Focant ont parlé très clairement et très franchement de leurs problèmes et de la condition actuelle de l'industrie marbrière en Wallonie. Si ces 4,5 milliards de francs étaient consacrés à l'achat de marbres belges, on aurait pu créer quelques milliers d'emplois nouveaux. On a évoqué comme arguments les paroles de Socrate, la façon de faire oublier le béton de nos villes, et aussi les problèmes énergétiques. Le marbre, en effet, est extrait à froid, tandis que pour obtenir les briques et le ciment, il faut chauffer à 1.200 ou 1.600 °C. Ces mêmes industriels ont parlé de l'intervention de l'Etat pour promouvoir, aider, etc... J'ai cru aussi comprendre que, enfin, un peu de protectionnisme, malgré vingt ans de Marché Commun, ne serait pas un acte regrettable.

C'est bien. Permettez-moi quand même de donner franchement, et avec un peu de méchanceté, mon avis. Dans ces exposés, j'ai remarqué un fil conducteur commun qui me laisse perplexe. Devant une crise comme celle du marbre en Wallonie, au lieu de se poser la question : « Qu'est-ce qu'il faut faire ? » j'ai cru entendre une autre question : « A qui la faute ? ». Curieuse dialectique, où l'on cherche où se trouve le mal, étant sous-entendu, bien sûr, que le bien est du côté de l'orateur.

Il y a eu, après ces exposés, des interventions très intéressantes. Mon collègue Bourguignon de l'Université de Liège a parlé de son amertume en constatant l'emploi presque général du marbre étranger dans les bâtiments belges. J'ai eu l'impression que ce géologue distingué ne connaissait pas le prix du marbre belge comparé à ceux de la France et surtout de l'Italie. M. Defoin, industriel marbrier français, a parlé de l'agressivité et du mordant nécessaires pour percer dans le marché d'un produit comme le marbre. M. Lavaggi enfin, qui représente les deux plus grandes sociétés marbrières de l'Italie (et donc du monde),

(1) « Objets » : il s'agit de blocs demi-travaillés qu'on préparait dans les carrières pour diminuer le poids (et donc le prix) du transport. Je ne connais pas le terme français.

Imeg et Henraux, a parlé brièvement de la façon dont on avait abordé et résolu, au cours des dernières années, le problème le plus grave de l'industrie marbrière de la région de Carrare : celui de la vente du marbre le plus classique du monde, le marbre blanc.

Comme le marché de ce marbre ne « tirait » plus, les industriels italiens ont recherché dans le monde entier des marbres colorés et des granites. Ils ont acheté des terrains, ont ouvert des carrières. Ils ont transporté des blocs en Italie et ils ont envahi le marché mondial avec des dalles de marbre coloré, combinées et mêlées bien entendu aux dalles de marbre blanc. On a ainsi sauvé la production locale en augmentant en même temps le chiffre d'affaires et la main-d'œuvre dans les usines de sciage et de polissage. Le marché en expansion a permis d'améliorer la technologie et la mécanisation des carrières et des usines. A titre d'exemple, je vous donne quelques chiffres significatifs à ce sujet. En Toscane, en se limitant à la région Lucca-Massa-Carrara-La Spezia, où il y a la plus grande concentration de carrières et d'industries marbrières de l'Italie, la production de 1981 se montera à 1.500.000 tonnes de marbre (avec 9.200 ouvriers et employés). Vingt ans plus tôt, en 1961, pour une production de loin plus faible, de 600.000 tonnes, 14.500 travailleurs étaient nécessaires. C'est dans ce contexte que l'on jugera l'importance des exposés de MM. Costa, Thoreau et Bazzani. Ces spécialistes en exploitation ou en technologie marbrières nous ont montré clairement que la technique d'exploitation et la mécanisation des carrières et des usines étaient bien loin d'être achevées.

M. Waelkens nous a parlé des exploitations de marbre en Phrygie. Il a découvert beaucoup de carrières inconnues dans cette région et son exposé repose le problème de l'attribution des marbres antiques à une carrière déterminée, problème qui, je pense, est loin d'être résolu. Je veux ajouter à ce sujet que j'ai moi-même travaillé pendant longtemps dans ces régions et non seulement en Phrygie, mais aussi en Lydie et en Ionie (en utilisant les noms anciens de cette partie de l'Asie Mineure). Je m'occupais bien entendu de problèmes géologiques et non d'archéologie, mais j'ai vu, sans les rechercher, d'innombrables carrières anciennes de marbre, surtout des deux côtés de la vallée du Méandre. Je pense qu'il faudrait les explorer et les cataloguer toutes, ou au moins une bonne partie, avant de pouvoir s'occuper sérieusement du problème de la provenance des marbres antiques d'Asie Mineure en utilisant uniquement des critères lithologiques.

Avec MM. Martiny et Vandendaele, on a sauté du monde classique à la civilisation contemporaine. Ces deux spécialistes ont attribué une part très importante à la psychologie dans l'emploi du marbre dans les constructions modernes. Les banques au luxe et décor souvent pharaoniques doivent imposer une impression de solidité financière. Il en est de même pour les palais de Justice où la femme à la balance ne suffit pas, semble-t-il, à donner l'assurance de crédibilité. L'exposé de M. Vandendaele a aussi retracé l'évolution de l'utilisation du marbre du monde ancien au monde contemporain. On a commencé par des monuments durables en marbre pour arriver plus tard seulement à l'emploi des marbres locaux exploités dans les très nombreuses carrières. En Belgique et rien que dans la région de Philippeville, on en dénombre 140.

M. Pensabene, dans un deuxième exposé, nous a entretenu du commerce des marbres dans le monde romain et des rapports entre coût et prix du produit, surtout en ce qui concerne l'emploi des marbres colorés.

M. Tsoflias enfin nous a parlé avec compétence du travail des carriers antiques dans des carrières anciennes de la Grèce, et notamment en Eubée.

Le dernier jour, nous avons écouté avec intérêt, mais aussi avec beaucoup de préoccupations, l'exposé magistral du Professeur Skoulikidis sur les effets désastreux de la pollution sur le marbre du Parthénon et les tentatives pour le soigner et le protéger. En complément, M. de Henau, dans une communication de haut niveau également, nous a présenté la dégradation des marbres dans les édifices belges. Il y a là un sujet qui doit aussi faire réfléchir les industriels qui s'occupent de la production. Il semble certain que la société marbrière qui arrivera à offrir un produit protégé contre la pollution verra augmenter d'une façon vertigineuse son chiffre d'affaires.

Enfin, last but not least, permettez-moi en tant que géologue de me féliciter avec MM. Netels et Vanbelle. C'est la première fois que je vois en Belgique une recherche de géologie appliquée moderne, conduite avec soin et compétence ayant pour but le développement futur de la production de marbre. C'est avec ces travaux de base que l'on pourra programmer la reprise que tout le monde souhaite de l'exploitation du marbre en Wallonie.

Et maintenant, permettez-moi de dire quelques mots de conclusion.

Ces Troisièmes Journées de l'Industrie Minérale ont été un succès indéniable. Elles ont provoqué une prise de conscience des problèmes qui sont à la base d'une renaissance de l'industrie marbrière en Wallonie. Je me permets tout de même de mettre en garde les responsables d'un optimisme trop facile.

A mon avis, l'optimisme serait tout à fait justifié si le développement et l'expansion de l'industrie du marbre en Belgique dépendaient seulement des facteurs techniques ou même technico-financiers. Mais cette reprise dépend aussi de facteurs psychologi-

ques. En d'autres mots, il faut *croire* dans le futur du marbre. Etant moi-même un géologue qui s'occupe de roches solides, je n'ai pas beaucoup de familiarité avec la métaphysique. Il y a là un domaine qui m'échappe et dont il est difficile d'évaluer l'importance.

La crise mondiale a mis l'Europe dans une condition qui est un peu semblable à celle qui existait aux temps des lumières. De même que pour d'autres secteurs, dans le domaine du marbre, il faut redonner de la confiance et un soutien matériel et spirituel aux chercheurs et aux techniciens de la recherche fondamentale, appliquée et industrielle. Parmi les slogans de mai 1968, il y en a un qui après 13 ans a gardé un intérêt certain : « L'imagination au pouvoir ! ». Si les autorités responsables, les industriels, les chercheurs et les techniciens belges avaient l'imagination que leurs arrière-grands-pères ont eue quand, après une guerre d'indépendance terrible, meurtrière et dévastatrice, ils ont créé leurs industries et surtout leur réseau de transports, il n'y a pas de doute que, dans des temps très brefs, les marbres de Wallonie et l'industrie marbrière belge connaîtront une renaissance, c'est-à-dire une nouvelle jeunesse qui leur permettra de reprendre en Europe la place importante qu'ils avaient jadis.

Activité de l'Institut d'Hygiène des Mines en 1981

André MINETTE (*)

1. *TRAVAUX DE LA SECTION MEDICALE*

1. *Examens de routine*

Cette année, le Fonds des Maladies Professionnelles nous a sollicités pour l'examen complet de 1.361 ouvriers mineurs. Il s'agissait, soit d'un examen de révision ou d'ajustement du pourcentage d'indemnisation, soit d'une demande prématurée d'aggravation, introduite par les médecins traitants, soit d'un premier examen de nouveaux candidats à la reconnaissance de maladie professionnelle.

Les services médicaux des différents sièges de la N.V. Kempense Steenkolenmijnen, les médecins traitants et les Caisses de Pension ont envoyé à l'Institut d'Hygiène des Mines 23 cas litigieux, soit pour embauchage, soit pour mise au point en ce qui concerne l'aptitude au travail, soit pour octroi définitif de pension prématurée.

Les tribunaux ont eu recours au service médical de l'Institut pour 15 expertises.

Par ailleurs, des sociétés africaines nous ont envoyé 10 agents pour embauchage dans leurs chantiers d'outre-mer. La surveillance trimestrielle des risques silicotiques du personnel d'Afrique a également été effectuée; 122 radiographies ont été protocolées à la demande des sociétés intéressées.

Vingt-huit membres du personnel du « Voorzorgskas der Kempen » ont subi un examen complet de dépistage.

(*) Chargé de cours extraordinaire à l'U.C.L. - Directeur de l'Institut d'Hygiène des Mines à Hasselt - Médecin-Directeur de l'Institut Médical Ste-Barbe à Lanaken. IHM, Havermarkt 22, B-3500 Hasselt.

2. *Travaux de recherche*

2.1. *Résultats préliminaires concernant un bronchodilatateur nouveau actif par la bouche, le Z1170*

L'arsenal thérapeutique dont le corps médical dispose pour traiter les sujets bronchoobstructifs est important. Les médications actives dans ce domaine ressortent de 3 groupes pharmacodynamiques, la théophylline et ses dérivés, les catécholamines et leurs dérivés résorcinaminiques, les dérivés de l'atropine et produits de synthèse apparentés. Ces divers produits ont tous leurs avantages et inconvénients respectifs. Un des avantages majeurs des $ß_2$-agonistes et des dérivés de synthèse apparentés à l'atropine provient de leur activité rapide, intense et prolongée pour des doses extrêmement faibles sous forme d'aérosols doseurs. On sait par contre les risques d'abus toujours possibles auxquels expose l'utilisation de ces aérosols, surtout $ß_2$-agonistes. Aux yeux de nombreux spécialistes bien au fait de ces problèmes, il ne fait pas de doute que ces inconvénients sont fortement exagérés par certains. Néanmoins, on ne peut nier la possibilité de tels surdosages. Il est par ailleurs connu que, lorsqu'ils se produisent, c'est en général chez des patients très décompensés du point de vue respiratoire, particulièrement exposés à des accidents graves. Les aérosols d'atropiniques de synthèse, bromures d'ipratropium et d'oxitropium n'exposent pas à de tels inconvénients. Mais, s'ils paraissent très actifs chez les sujets qui leur sont sensibles, nombre de sujets réagissent peu ou pas du tout à ces produits. La littérature suggère par ailleurs que, d'une façon générale, les $ß_2$-agonistes seraient plus actifs dans l'asthme vrai et les atropiniques plus indiqués dans les bronchoobstructions de la bronchite chronique non asthmatique. Certains travaux plus récents suggèrent

en outre que les anticholinergiques seraient particulièrement actifs dans les atteintes des petites bronches périphériques.

Si par ailleurs, il est indéniable que les traitements en inhalation présentent des avantages certains, notamment une forte activité pour des dosages faibles, l'existence de bonnes préparations actives par la bouche accroît l'éventail des possibilités thérapeutiques. Dans ce domaine, on doit souligner l'immense intérêt des études poursuivies ces dernières années sur la théophylline, et ayant abouti à mettre au point de bonnes préparations de théophylline cristallisée, utilisables par la bouche et capables d'entraîner des taux sériques compatibles avec une activité bronchodilatatrice importante et longtemps maintenue. D'autres préparations sont également actives par la bouche. C'est le cas des $ß_2$-agonistes les plus puissants, le fénotérol, le salbutamol et la terbutaline. Aux dosages requis, ces produits sont cependant souvent générateurs de trémor.

La chimie de synthèse a permis récemment de réaliser un produit entièrement nouveau, n'appartenant à aucune des familles classiques décrites ci-dessus, dérivé aminobutané d'un hydrochlorure d'éthanol du 3-bromo-isoxazole, dépourvu de toxicité chez l'animal d'expérience, et démontrant chez celui-ci d'intenses propriétés bronchodilatatrices.

Un essai a été effectué avec ce produit chez 20 patients volontaires et coopérants à l'Institut Médical Ste-Barbe de Lanaken. Tous étaient des bronchoobstructifs réversibles. La réversibilité avait été préalablement établie sur la base d'une augmentation du VEMS 30 à 45 minutes après inhalation d'une dose standard d'orciprénaline. Ces 20 sujets ont été étudiés en carré latin. Cinq produits leur ont été administrés, le Z1170 à 2 doses, respectivement 0,5 mg et 0,25 mg, du sulbutamol à 2 doses, respectivement 2 mg et 4 mg, et enfin un placébo.

Les produits ont été systématiquement ingérés à 9 heures du matin après contrôle préalable du VEMS, de Raw mesurée au bodypléthysmographe, du calcul de Sgaw et exécution d'un électrocardiogramme comprenant 12 dérivations complétées par une mesure de la pression artérielle maximale et minimale en position assise. Par la suite, des contrôles du VEMS, du pouls et des tensions artérielles systolique et diastolique ont été effectués après 10 minutes, 30 minutes, 1 heure, 2 heures, 3 heures, 4 heures, 5 heures et 7 heures. Après 1 heure, 3 heures et 5 heures ont été effectués des contrôles bodypléthysmographiques. Après 3 heures et 5 heures, l'E.C.G. a été répété.

Les résultats de cette étude peuvent être résumés en disant que les effets du Z1170 à la dose de 0,5 mg per os ont été absolument équivalents à ceux de 4 mg de salbutamol et significativement supérieurs entre la première et la quatrième heure à ceux du Z1170 à la dose de 0,25 mg dont les effets ne se différenciaient d'ailleurs pratiquement pas dans cet essai de ceux du placébo et, du point de vue spirométrique du moins, de ceux du salbutamol à la dose de 2 mg (fig. 1 et 2).

Par contre, le produit a entraîné de façon constante une accélération légère du pouls par rapport à ce que l'on a constaté avec le placébo et les compétiteurs comparés. Cette accélération atteignait en moyenne 6,6 pulsations par minute. Par rapport au placébo et au salbutamol à 2 mg, elle a été significative à de nombreux intervalles de temps. Le produit s'est également montré de façon pratiquement constante responsable d'une hypertension moyenne légère, inférieure toutefois à 1 cm de mercure, tant en ce qui concerne la pression diastolique que la pression systolique. A divers intervalles de temps, cette tendance était significative vis-à-vis du placébo et, en ce qui concerne la tension diastolique, vis-à-vis du salbutamol à la dose de 4 mg.

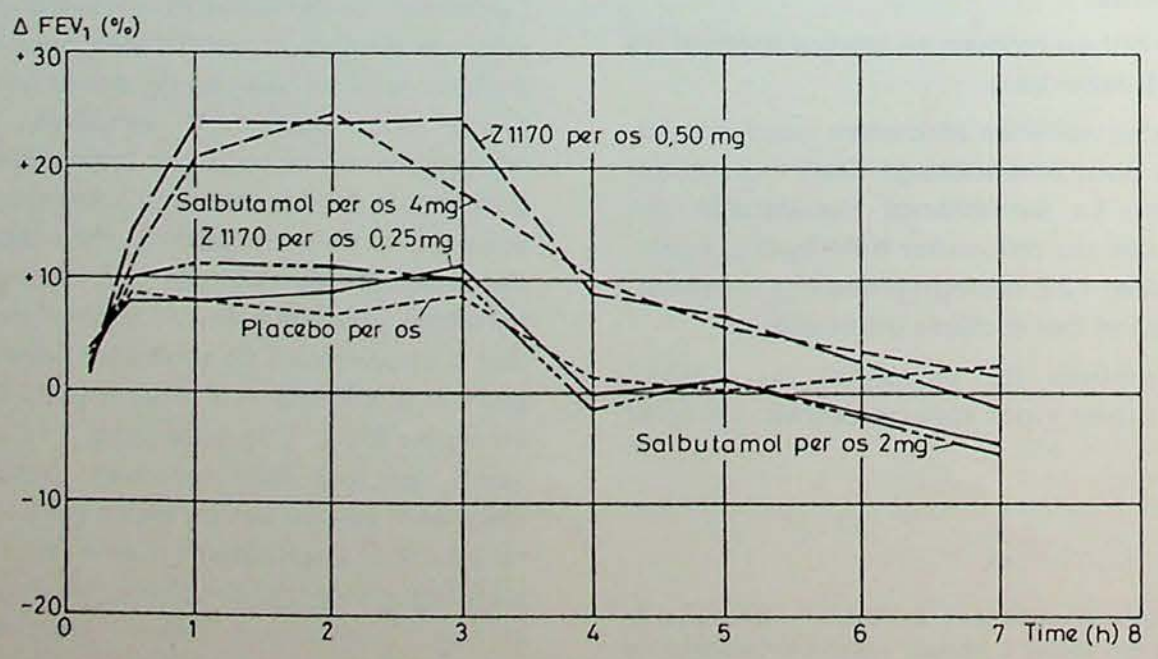


Fig. 1. — Effets moyens sur le VEMS de 2 doses de salbutamol et de 2 doses de Z1170 comparés aux effets moyens d'un placébo chez 20 patients de sexe masculin ayant une broncho-obstruction réversible.

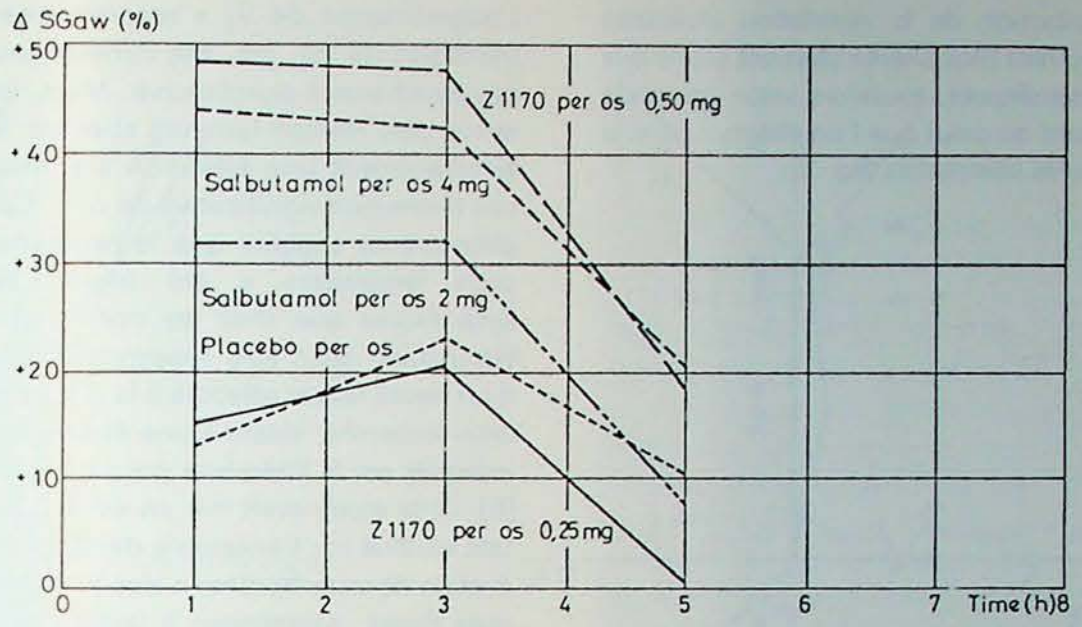


Fig. 2. — Effets moyens sur la Sgaw de 2 doses de salbutamol et de 2 doses de Z1170 comparés aux effets moyens d'un placébo chez 19 patients de sexe masculin ayant une broncho-obstruction réversible.

En conclusion, le produit paraît être un agent antiobstructif puissant, aux effets similaires par la bouche à ceux du salbutamol à 4 mg. On peut évidemment en conclure indirectement qu'il n'aura pas les effets immédiats ni les effets maximums intenses que l'on observe avec les ß-agonistes en aérosol. Il faut aussi tenir compte de ses effets vasculaires associés légers, mais difficilement contestables. Une étude est actuellement en cours à l'Institut Médical Ste-Barbe pour vérifier dans des groupes plus étendus, incluant notamment des sujets à haut risque vasculaire, la réalité et la portée éventuelle de ces effets vasculaires associés.

2.2. *Contribution à l'étude physiopathologique des plaintes de dyspnée (recherche effectuée avec l'aide financière de la CCE sous le n° 7246-16-2-006)*

Cette recherche, effectuée par le Dr. Serra, a pour origine la constatation de façon répétée, lors de diverses enquêtes épidémiologiques effectuées chez des mineurs de fond en Campine, d'un excès de plaintes de dyspnée en l'absence de signes cliniques de bronchite chronique des gros troncs, de pneumoconiose massive et d'emphysème. Il s'agissait en l'occurrence d'une dyspnée du niveau 2 du questionnaire de la CECA sur la bronchite et l'emphysème.

Cent-vingt paires de sujets réparties en quatre groupes de tabagisme ont été sélectionnées lors d'une enquête épidémiologique effectuée chez des sujets normalement au travail d'une exploitation souterraine en Campine. Chaque paire comprenait un sujet dyspnéique et un témoin non-dyspnéique apparié pour l'ancienneté au fond, les habitudes tabagiques, la taille à 5 cm près, l'image radiologique, la nationalité et le poids.

Tous ces sujets ont été soumis à une importante gamme d'épreuves fonctionnelles au repos et à l'effort. Au repos, on a mesuré les paramètres spirométriques, les courbes débit-volume en respiration normale et en expiration forcée, la distribution de la ventilation alvéolaire et des échanges gazeux, la résistance des voies aériennes, la conductance spécifique et la diffusion ($D_{L,CO}$). Les techniques utilisées pour ces mesures ont fait l'objet d'une normalisation préalable. Pendant l'effort, une ergospirométrie a été exécutée selon le protocole établi par le Comité des experts de la CECA. Pendant les épreuves d'effort, on a enregistré automatiquement, à la fin de chaque minute, la ventilation ($\dot{V}_E$), la fréquence respiratoire (resp. fr.), l'équivalent ventilatoire (V_E), les différences entre les concentrations inspiratoires et expiratoires d'O_2 (ΔO_2) et de CO_2, la fréquence cardiaque et le pouls d'oxygène (PO_2). La mesure de ces paramètres a été poursuivie pendant les 6 premières minutes de la phase de récupération. Des mesures des gaz du sang artériel ont été effectuées au repos, pendant les épreuves d'effort, toutes les 3 minutes à chaque palier de 30 watts et pendant la récupération, 3 et 6 minutes après l'arrêt de l'épreuve.

Au repos, les observations suivantes ont été faites :

Groupes I, II et III de non-fumeurs et petits fumeurs

La capacité de diffusion en apnée des dyspéiques a été trouvée significativement un peu inférieure à celle des non-dyspnéiques chez les non-fumeurs.

Il paraissait exister une tendance identique, quoique non franchement significative, pour $\dot{V}_{max}$ à 25 % de la CVF.

Enfin, la distribution de la ventilation alvéolaire s'est montrée souvent plus altérée chez ces sujets que chez les non-dyspnéiques, toutefois selon un mode inhabituel différent de celui que l'on observe dans la règle chez les sujets obstructifs (fig. 3).

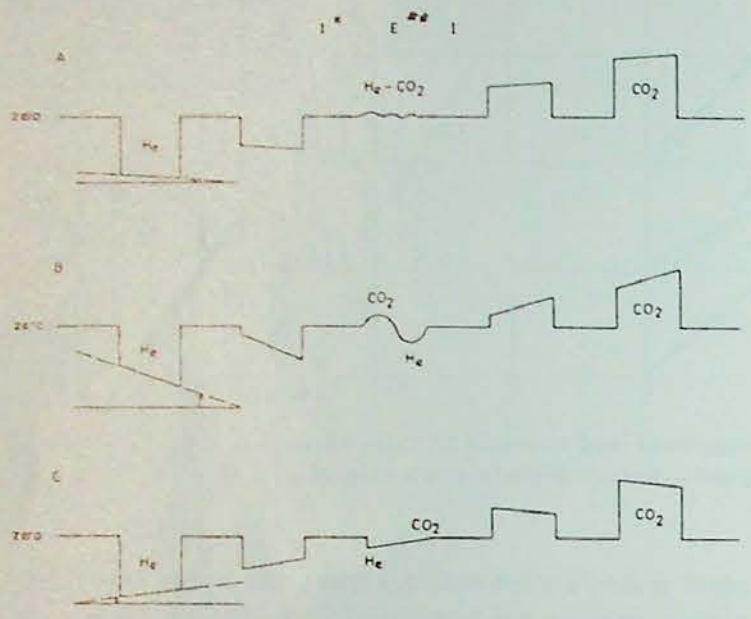


Fig. 3. — Représentation schématique de la partie terminale d'une courbe de rinçage à l'hélium.
Courbe a : courbe typique des sujets normaux.
Courbe b : courbe caractéristique des sujets obstructifs avec phénomène de rétention alvéolaire (trapping) d'hélium.
Courbe c : courbe observée fréquemment chez les mineurs dyspnéiques des groupes I, II et III de non-fumeurs et petits fumeurs.

* Inspiration; ** Expiration.

Groupe IV de grands fumeurs

La capacité de diffusion en apnée a été diminuée de façon pratiquement similaire chez les dyspnéiques et les non-dyspnéiques.

Le volume résiduel était significativement augmenté chez les dyspnéiques.

La distribution de la ventilation alvéolaire était troublée beaucoup plus souvent selon le mode trouvé habituellement chez les sujets obstructifs [5].

Lors des épreuves d'effort, des informations méritant mûre réflexion ont été également obtenues, tant pendant l'effort lui-même que pendant la récupération consécutive.

Pour l'ensemble des groupes I, II et III de non-fumeurs et petits fumeurs, les dyspnéiques se caractérisaient par une augmentation de $\dot{V}_E$, significative dans le groupe I et venant juste à la limite de la signification dans les groupes II et III. Cette élévation de $\dot{V}_E$ s'accompagnait simultanément d'une augmentation de fréquence respiratoire venant aussi à la limite de la signification dans le groupe I, un peu plus éloignée du palier de confiance de 95 % dans le groupe II, mais significative dans le groupe III. L'augmentation de $\dot{V}_E$ s'accompagnait d'une augmentation de $\dot{V}O_2$ qui, fait curieux toutefois, n'était pas franchement significative. Mais, par ailleurs, du moins chez les non-fumeurs absolus, il s'est produit simultanément une élévation significative de V_E et une diminution significative de ΔO_2. Cet ensemble de phénomènes suggère que le rendement de chaque cycle respiratoire a été moins bon chez les dyspnéiques que chez les non-dyspnéiques. Cette observation peut être rapprochée des conclusions d'un travail récent effectué à la phase préliminaire de cette recherche, visant à une étude des phénomènes invoqués par la littérature pour expliquer la dyspnée [6]. Cette étude avait mis en évidence le rôle important attribué par l'ensemble des auteurs dans la production de ce symptôme à des phénomènes mécaniques divers, notamment à la fatigue diaphragmatique, indépendamment des valeurs gaz du sang réalisées par les efforts compensatoires mis en jeu lors de l'effort. Il serait raisonnable d'admettre qu'une telle fatigue anormale surgit lorsque le rendement des cycles respiratoires s'altère.

Chez les grands fumeurs du groupe IV, les dyspnéiques et non-dyspnéiques se sont comportés pratiquement de la même manière au moment de l'effort, des différences ne paraissant se dessiner entre eux que pendant la deuxième phase de la récupération. Ces différences n'ayant pas été significatives, on ne peut faire à leur sujet que des hypothèses. Celles-ci se posent dans les termes suivants : à la sixième minute suivant la fin de l'effort, $\dot{V}_E$ des dyspnéiques tendait à devenir supérieur à celui des non-dyspnéiques, la prise d'O_2 ($\dot{V}O_2$) évoluant dans l'autre sens. Un tel phénomène pouvait être discuté tant en valeurs absolues (fig. 4) qu'en rapportant les résultats aux valeurs de repos (fig. 5). La ΔO_2 évoluait de même vers des valeurs inférieures chez les dyspnéiques, ceci s'associant à une fréquence respiratoire plus élevée. Un tel ensemble de phénomènes pourrait s'expliquer par l'intervention chez ces sujets de difficultés obstructives dont témoignent les troubles de distribution alvéolaire trouvés chez beaucoup d'entre eux au repos, ainsi que l'augmentation du volume résiduel existant en moyenne dans ce groupe. De telles difficultés obstructives s'ajoutant aux phénomènes fondamentaux décrits dans les 3 groupes précédents pourraient expliquer ce retard d'adaptation.

Ces résultats et hypothèses sont à l'heure actuelle soumis à une analyse statistique plus approfondie, visant à rechercher un index de la dyspnée débutante au moyen de corrélations multiples entre les divers résultats et tendances observés dans ce travail.

Il serait par ailleurs intéressant d'étudier la répartition des troubles fonctionnels décrits ci-dessus en fonction de l'importance des images radiologiques de pneumoconiose simple. Un parallélisme entre ces

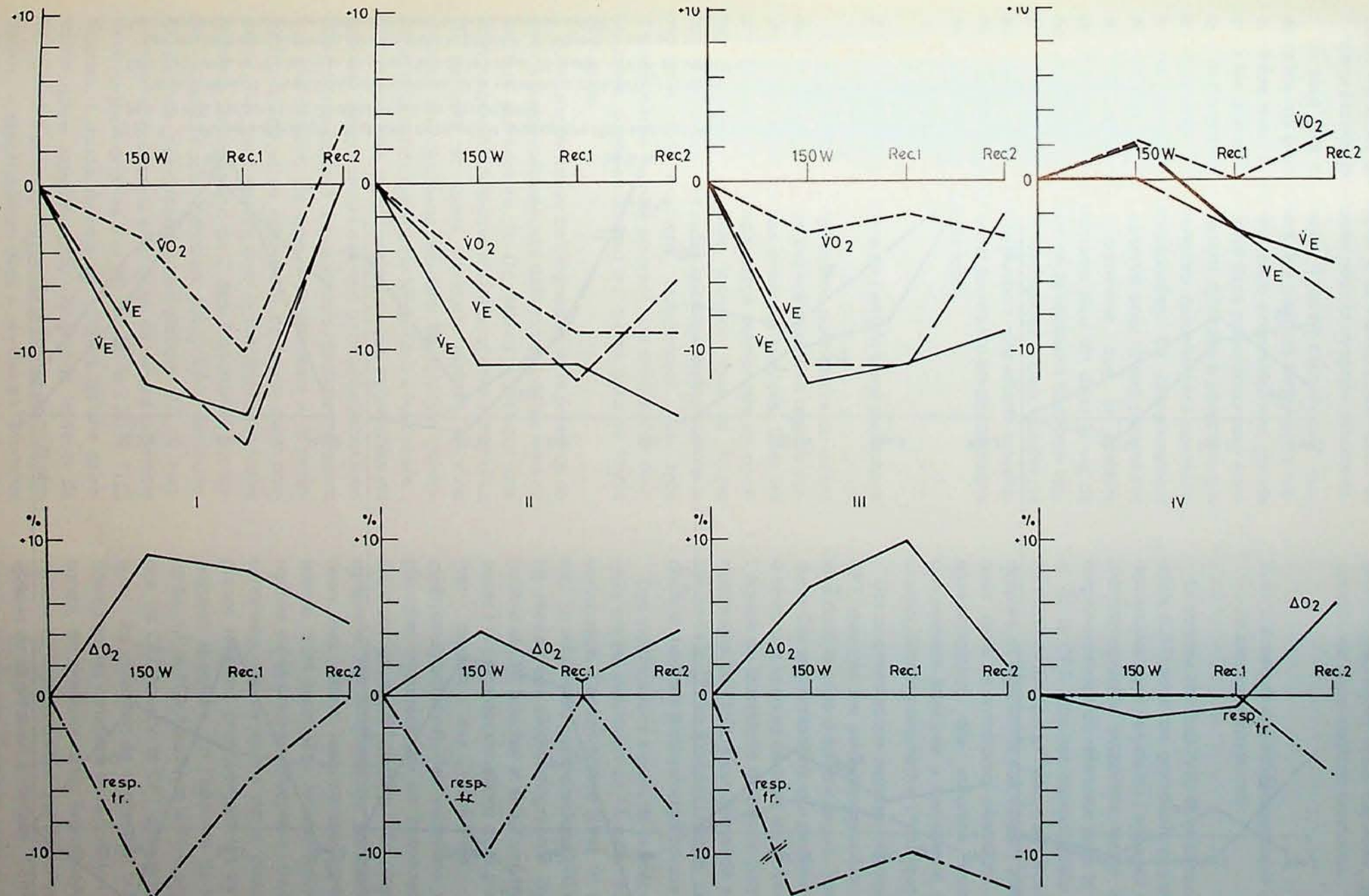


Fig. 4. — Partie supérieure : comportement moyen de la ventilation minute ($\dot{V}_E$), de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) et de l'équivalent ventilatoire (V_E) lors d'un effort de 150 watts sur bicyclette ergométrique, puis pendant la récupération, respectivement après 3 minutes (rec. 1) et 6 minutes (rec. 2).

Partie inférieure : évolution de la différence entre l'oxygène inspiratoire et expiratoire (ΔO_2) et de la fréquence respiratoire (resp. fr.) aux mêmes intervalles de temps.

Tous les résultats sont exprimés en pour-cent des différences des valeurs observées chez les sujets dyspnéiques par rapport à celles constatées chez les non-dyspnéiques, les premiers se trouvant au dénominateur de la fraction utilisée pour le calcul.

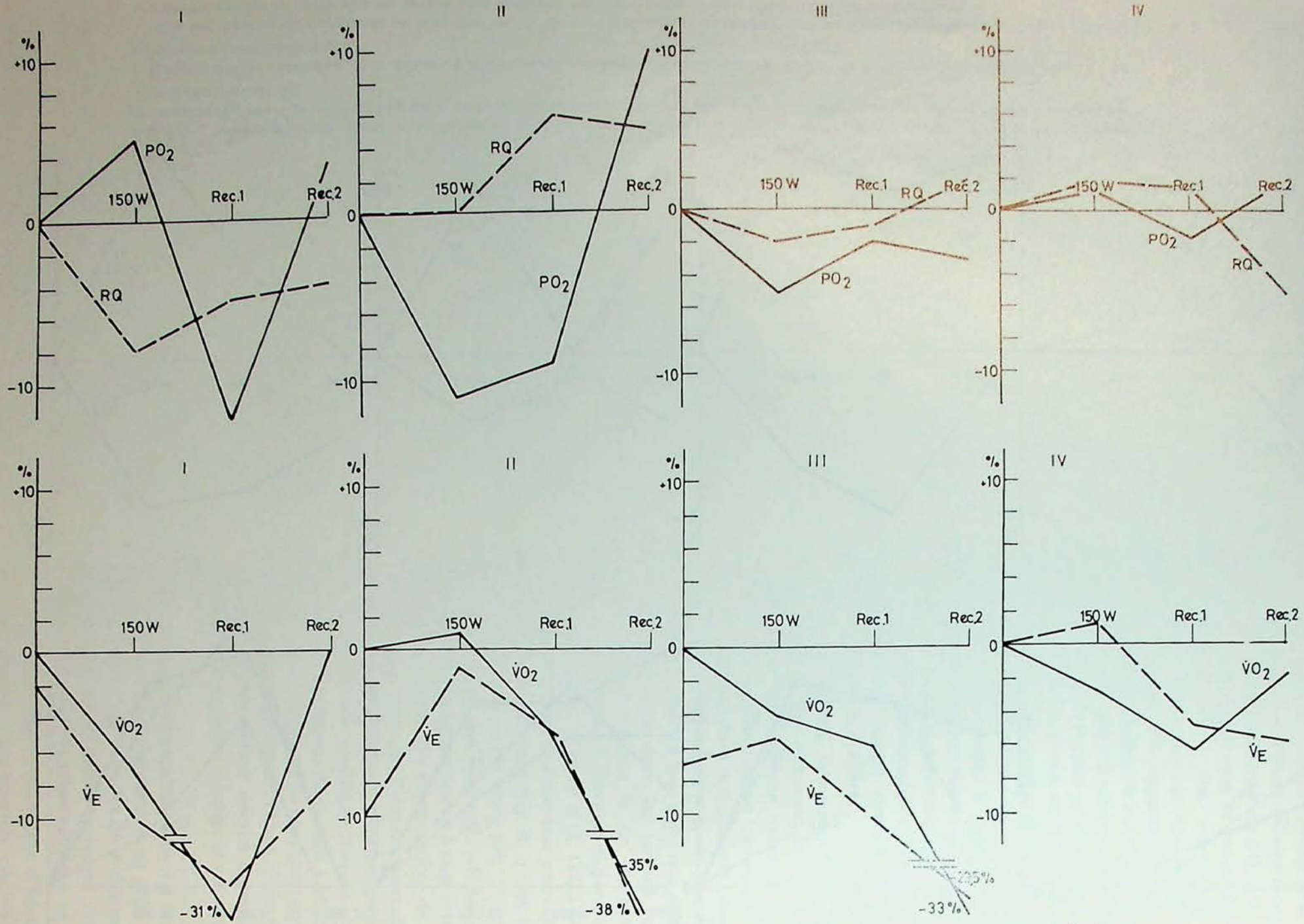


Fig. 5. — Partie supérieure : évolution du quotient respiratoire (RQ) et du pouls d'oxygène (PO_2), à l'effort et respectivement après 3 minutes (rec. 1) et 6 minutes (rec. 2) de la phase de récupération.

Partie inférieure : évolution concomitante de la ventilation minute ($\dot{V}_E$) et de la consommation d'O_2 ($\dot{V}O_2$) aux mêmes intervalles de temps. Ces 2 volumes sont exprimés en pour-cent de la valeur de repos, et non en valeur absolue comme dans la figure 4.

Les résultats sont exprimés comme dans la figure 4, indiquant le comportement relatif des dyspnéiques par rapport aux non-dyspnéiques, les premiers se trouvant au dénominateur de la fraction de calcul.

troubles et le degré d'altération radiologique apporterait en effet un appui à la vision mécaniciste de l'interprétation proposée pour la dyspnée débutante.

En tout état de cause, il paraît bien évident que, dans les cas particuliers, les plaintes de dyspnée rencontrées avec une fréquence anormalement grande chez les mineurs de fond sans pneumoconiose étendue ni bronchite, resteront difficiles à objectiver par les épreuves fonctionnelles actuellement connues, même les plus approfondies. Le comportement moyen des groupes observé pour divers paramètres suggère toutefois l'hypothèse que la maladie pneumoconiotique démarre plus tôt dans la vie de nombreux mineurs que ne le laisserait supposer leur simple surveillance radiologique. Ceci justifie la poursuite, voire l'intensification, des efforts actuellement consentis pour lutter contre les empoussiérages miniers des chantiers du fond.

2.3. *Diagnostic précoce de l'emphysème pulmonaire*

Le diagnostic d'emphysème pulmonaire du vivant du patient ne peut être avancé avec une relative certitude que dans les cas cliniques avancés. Chez les grands fumeurs, l'emphysème pulmonaire est pourtant fréquent, le plus souvent sous sa forme centro-lobulaire, et ce dès la cinquantaine comme le montrent les examens autopsiques. Ce type d'emphysème montre souvent une prédilection pour les lobes supérieurs, tout au moins dans sa forme débutante.

Dans une tentative de diagnostiquer la présence de lésions emphysémateuses débutantes par les tests de fonction pulmonaire, le Dr. Marcq a pratiqué une bronchographie sélective du lobe supérieur droit chez 36 patients et sujets normaux répartis en cinq groupes d'après leurs résultats de fonction pulmonaire. Une sonde orientable Medi-Tech a été utilisée : elle permet une opacification dirigée et contrôlée en quantité, ce qui rend l'examen particulièrement bien toléré par le patient. Les premiers résultats indiquent que des lésions de type « emphysème » (« peripheral pooling ») se retrouvent de façon quasi constante chez les fumeurs dont la fonction pulmonaire présente l'association de 2 des 3 anomalies suivantes : capacité de diffusion (DL_{CO}/VA') diminuée, compliance pulmonaire quasi-statique (C_{st}/l) augmentée, et pressions élastiques de recul à différents volumes pulmonaires (Pel 90 % - 80 % - 70 % TLC) réduites. L'étude montre par ailleurs qu'une spirométrie quasi normale chez de grands fumeurs de moins de 50 ans n'exclut pas la présence de multiples lésions « emphysémateuses » évidentes bronchographiquement. Des trois critères fonctionnels d'emphysème, les pressions de recul élastique semblent être les plus sensibles, puisque celles-ci étaient diminuées chez tous les patients avec « poolings » bronchographiques mais capacité de diffusion ou compliance quasi-statique normales.

2.4. *L'échec de la pléthysmographie corporelle dans le syndrome obstructif*

Le volume résiduel (VR) et la capacité pulmonaire totale (CPT) sont des grandeurs physiologiques fondamentales pour l'étude de l'appareil respiratoire. La pléthysmographie corporelle totale est considérée comme méthode de référence pour la mesure du VR et de la CPT. Elle est reproductible et rapide. La méthode de dilution à l'hélium en circuit fermé fournit des valeurs inférieures aux valeurs pléthysmographiques dans le syndrome obstructif sévère. Cette sous-estimation des volumes pulmonaires est couramment attribuée à l'existence d'espaces mal ventilés dans la pneumathie chronique obstructive.

Des augmentations rapides et importantes de la CPT, mesurée par pléthysmographie, furent rapportées dans la crise d'asthme aiguë, spontanée ou induite. Ces augmentations, qui peuvent atteindre 3 ou 4 litres, ont toujours dérouté les physiopathologues. L'équipe du laboratoire de physio-pathologie cardio-respiratoire de l'UCL s'est demandé si ces augmentations de la CPT ne sont pas fausses, mettant ainsi en doute la méthode pléthysmographique.

Des modifications aiguës de la mécanique pulmonaire ont été induites chez 15 asthmatiques, par administration d'acétylcholine (chez 9) et de sulbutamol. Le volume du gaz thoracique (TGV) et de la CPT fut mesuré par pléthysmographie corporelle (TGV bouche et CPT bouche) et simultanément, en enregistrant à la place des variations de la pression buccale (par rapport aux variations du volume pléthysmographique), les variations des pressions pleurales, mesurées par un ballonnet oesophagien (TGV oesoph. et CPT oesoph.). En pléthysmographie corporelle, les variations des pressions buccales au cours des efforts respiratoires contre une valve fermée, sont supposées refléter fidèlement les variations de la pression alvéolaire. Dans ces mêmes conditions, les variations de la pression oesophagienne reflètent pratiquement les variations de la pression alvéolaire. En l'absence de tout syndrome obstructif, le TGV bouche et le TGV oesophage, ainsi que les CPT bouche et CPT oesophage sont identiques : les variations de la pression buccale reflètent fidèlement les variations de la pression alvéolaire. Par contre, en présence d'un bronchospasme, les variations de la pression buccale deviennent inférieures à celles de la pression alvéolaire. Cette sous-estimation de la pression alvéolaire produit une erreur par excès de la CPT allant jusqu'à 2 litres ou plus de 50 % pour le volume résiduel. La surestimation des volu-

mes pulmonaires est d'autant plus grande que le bronchospasme est plus sévère. L'erreur de mesure des volumes pulmonaires s'accompagne d'une sous-estimation de la résistance des voies aériennes de l'ordre de 20 à 30 %. En effet, cette dernière est calculée à partir des variations de la pression buccale. Une simulation sur modèle (M. Cauberghs et K.P. Van de Woestijne, KUL) confirme ces résultats et tend à incriminer les voies aériennes extrathoraciques comme responsables de cette erreur. En effet, les variations du volume des voies aériennes extrathoraciques, pendant les efforts respiratoires contre une valve fermée, permettent l'installation d'un débit d'air à travers l'obstruction bronchique, entraînant ainsi une perte de pression. D'où la sous-estimation de la pression alvéolaire et la surestimation du VR et de la CPT.

En conclusion, la méthode pléthysmographique n'est pas appropriée pour la mesure de volumes pulmonaires dans le syndrome obstructif, surtout dans le syndrome obstructif sévère. Les données sur les relations pression-volume du poumon et de la cage thoracique dans la pneumopathie chronique obstructuve, ainsi que les indices des voies aériennes, doivent être réévalués.

II. *TRAVAUX DE LA SECTION TECHNIQUE*

1. *Conimétrie. Lutte contre les poussières*

1.1. *Prélèvement, examen, analyse des poussières*

1.1.1. *Mesures gravimétriques de routine*

Le contrôle de l'empoussiérage de l'air dans les chantiers souterrains s'est poursuivi systématiquement durant l'année. Le nombre total de prélèvements de poussières s'est élevé à 826, en légère régression par rapport à l'année précédente (826 au lieu de 839). La répartition de ces prises d'échantillons est la suivante : 676 en Campine et 150 dans le Bassin de Charleroi/Basse-Sambre.

En fin d'année, les valeurs médianes des concentrations globales et des teneurs en cendres, ainsi que les dispersions relatives correspondantes pour les 37 chantiers d'abattage en activité, ont été :

$m_g = 15{,}7$ mg/m³ $\quad s_g = 1{,}54$
$m'_g = 36{,}0$ % cendres $\quad s'_g = 1{,}36$

Les diagrammes de la figure 6 donnent la répartition de ces valeurs, la production moyenne s'élevant à 322 tonnes nettes par poste contrôlé et le débit d'air moyen étant égal à 13,6 m³/s.

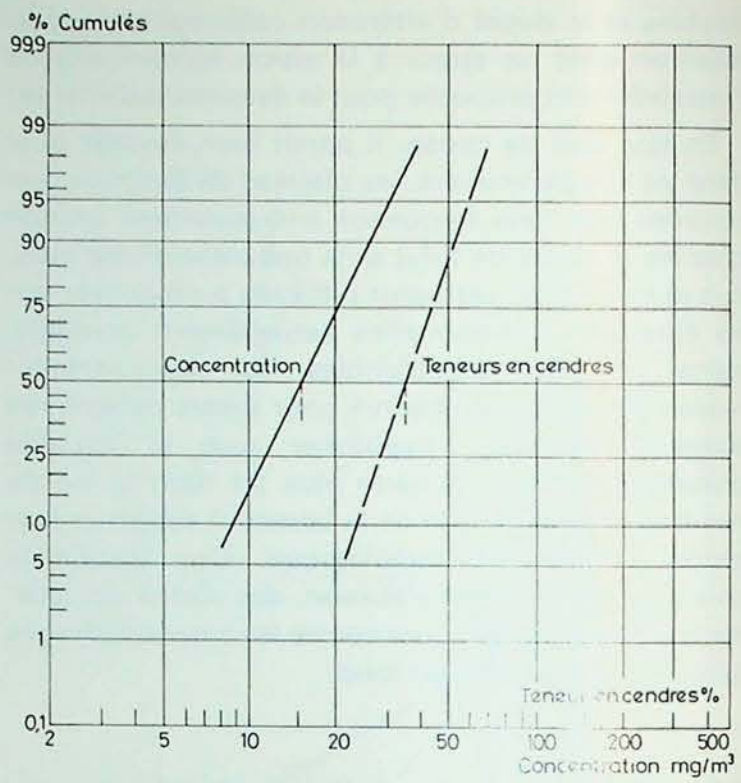


Fig. 6. — Répartition des concentrations gravimétriques et des teneurs en cendres. Situation d'ensemble à la fin de 1981.

Le classement des chantiers s'établit comme suit :

89 % en classe I (33 tailles);
11 % en classe II (4 tailles),

aucune des tailles en activité n'étant classée en catégorie plus grande que II. Le diagramme officiel de classement est reproduit en figure 7; le rectangle encadrant le point représentatif des valeurs médianes délimite une portion du diagramme dans laquelle on trouve deux résultats sur trois.

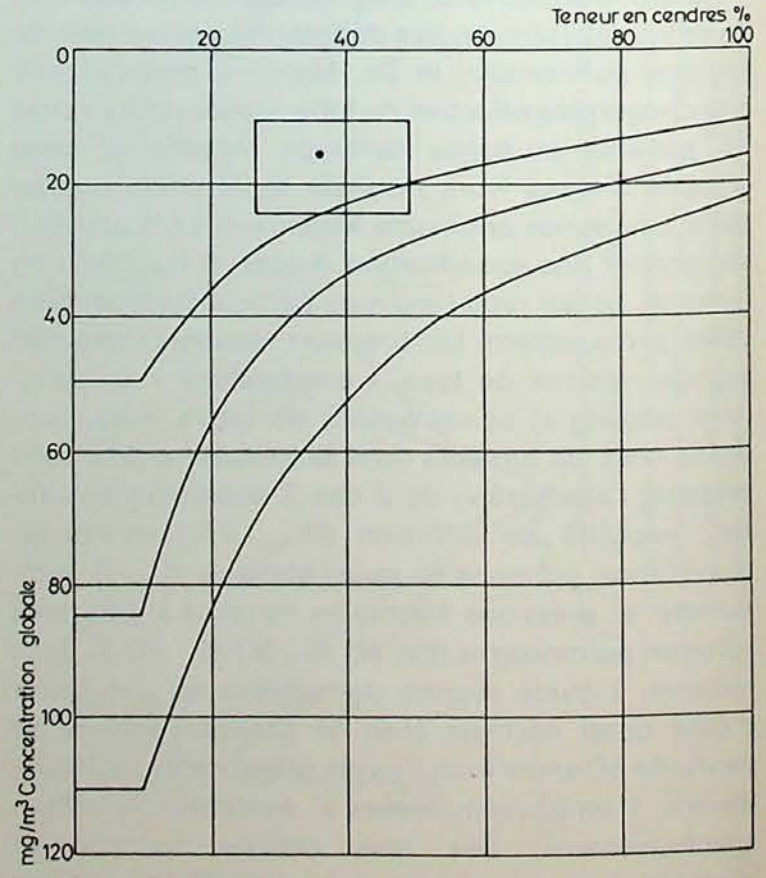


Fig. 7. — Résultats de mesures gravimétriques de routine pour l'ensemble des bassins à la fin de 1981.

La comparaison des années 1980 et 1981 est présentée au tableau I, pour la Campine et pour l'ensemble du pays; les 3 chantiers subsistant dans le Bassin du Sud constituent une population trop faible pour en déterminer les valeurs médianes et les dispersions relatives. Les productions indiquées dans ce tableau sont les moyennes obtenues à partir du relevé des tonnages réalisés les jours de mesure de l'empoussiérage.

TABLEAU I

Situation comparée des chantiers contrôlés en Campine et dans l'ensemble du pays en 1980 et 1981

	Campine		Pays	
	1980	1981	1980	1981
Nombre de chantiers contrôlés en fin d'année	32	34	36	37
Concentration médiane (mg/m³)	16	15,2	15,5	15,7
Dispersion relative (s_g)	1,58	1,57	1,67	1,54
% cendres médian	35	36	32,5	36
Dispersion relative (s'_g)	1,47	1,32	1,55	1,36
Production moyenne (tn/p)	336,7	337,6	314	322,0
Débit moyen (m³/s)	15	14,2	14,0	13,6
Pourcentage des chantiers				
en classe I	76	88	81	89
en classe II	22	12	19	11
en classe III	0	0	0	0

L'évolution au cours des 5 dernières années pour l'ensemble des Bassins est résumée ci-après :

fin 1977 : 13,0 mg/m³ - 30,5 % cendres pour 257 tn/p et 11,0 m³/s;

fin 1978 : 15,0 mg/m³ - 31 % cendres pour 286 tn/p et 13,0 m³/s;

fin 1979 : 14,4 mg/m³ - 28 % cendres pour 269 tn/p et 12,65 m³/s;

fin 1980 : 15,5 mg/m³ - 32,5 % cendres pour 314 tn/p et 14,0 m³/s;

fin 1981 : 15,7 mg/m³ - 36,0 % cendres pour 322 tn/p et 13,6 m³/s.

Les différences entre les situations en Campine et dans l'ensemble du pays s'estompent d'année en année. Le nombre de chantiers contrôlés dans le Sud, qui représentait encore 20 % de l'ensemble en 1979, n'en constituait plus que 11 % en 1980 et est inférieur à 10 % cette année (3 chantiers sur 37).

La croissance des concentrations médianes dans le pays, due au poids de plus en plus important de la Campine dans l'ensemble, est forcément appelée à disparaître et à suivre l'évolution campinoise.

En Campine, les empoussiérements médians se maintiennent à un niveau déjà atteint il y a 10 ans. Mais il faut remarquer qu'à cette époque, le pourcentage de chantiers dangereux classés en catégories plus grandes que II s'élevait à 7,5 %, alors que cette proportion est nulle aujourd'hui, et cela depuis deux ans.

De 1971 à 1975, 10 % des chantiers présentaient une concentration dépassant 35 mg/m³ (et même 38 mg/m³, fin 1973). Après modification en 1975 de la législation relative aux mesures des poussières, les résultats des prélèvements de plus longue durée (5 à 6 heures au lieu de 2 heures précédemment) furent moins dispersés et le décile supérieur ne dépassa plus que 31 mg/m³ en 1976, 1978 et 1979. Ces deux dernières années, la décroissance semble reprendre puisque 10 % des chantiers dépassaient 29 mg/m³ fin 1980, et 27 mg/m³ seulement fin 1981, soit 25 % de moins qu'en 1974.

On peut donc conclure qu'en Campine, la situation dans les chantiers les plus empoussiérés ne cesse de s'améliorer, comme le confirme par ailleurs l'évolution des courbes épidémiologiques.

En ce qui concerne la teneur en cendres, qui était de l'ordre de 30 % avant 1969, elle dépasse actuellement 36 % dans la moitié des cas; l'incidence de l'introduction du soutènement marchant est évidente.

Ce « clichage en fin d'année » traduit bien l'image de la situation moyenne de l'année. En effet, en Campine, pendant les 10 premiers mois de l'année, 421 mesures de l'empoussiérage ont eu lieu pendant les postes d'abattage dans 59 chantiers.

La concentration moyenne atteint
18,31 mg/m³ (s = 10,71 mg/m³)

et la teneur moyenne en cendres est égale à
37,24 % (s = 13,07 % C).

En 1980, elles atteignaient respectivement
18,52 mg/m³ (s = 9,32 mg/m³) et
38,86 % C (s = 16,59 % C).

En 1979, ces valeurs étaient de
19,2 mg/m³ (s = 11,0 mg/m³) et
36,0 % C (s = 11,31 % C).

Par ailleurs, la concentration moyenne pondérée de ces 421 postes représentant une période cumulée de 324 mois d'exploitation dans 59 chantiers, s'élève à 17,80 mg/m³. En 1980, elle était de 18,24 mg/m³ et en 1979 de 18,74 mg/m³.

Enfin, l'estimation de Sichel de la moyenne des concentrations obtenues à partir de la valeur médiane et de l'écart-type géométrique de la distribution des 34 mesures de chantiers en octobre 1981, fournit une valeur de 17,04 mg/m³. L'an dernier, elle atteignait 17,67 mg/m³ et 17,78 mg/m³ fin 1979.

Depuis le début de l'année, en Campine, 53 % des chantiers sont restés en classe I, contre 55 % l'année passée; 27 % ont été classés au moins une fois en classe II, 18 % en classe III et 1 chantier (2 %) a dépassé cette classe.

Cette année, nous avons également analysé les résultats des prélèvements effectués dans les travaux préparatoires. Soixante-six prélèvements furent effectués dans les creusements de bouveaux en Campine donnant une moyenne de 4,94 mg/m³ de poussières totales (s = 4,65 mg/m³) et 77,74 % de cendres (s = 11,01 %). Tous les ateliers furent classés en classe I, sauf 3 qui furent classés en classe III. Cinquante prélèvements furent réalisés aux fronts de creusement des voies en veine. Les valeurs moyennes s'élevaient à 5,34 mg/m³ pour les poussières totales (s = 3,67 mg/m³) et 52,39 % pour les cendres (s = 13,81 %). Tous ces prélèvements furent classés en classe I. Enfin, sept prélèvements eurent lieu dans les montages avec des valeurs moyennes de 14,14 mg/m³ pour les poussières totales (s = 4,44 mg/m³) et 22,56 % pour les cendres (s = 8,88 %).

La moyenne des 53 mesures de l'empoussiérage qui ont eu lieu depuis le début de l'année dans les 3 tailles actuellement en exploitation dans le Sud s'élève à 23,61 mg/m³ (s = 6,50 mg/m³) et, sur les 3 chantiers, deux furent classés, une fois, en classe II. Vingt prélèvements eurent également lieu dans les ceusements de voies en couche qui fournirent des moyennes de 6,08 mg/m³ pour les poussières totales (s = 6,92 mg/m³) et 32,66 % pour les cendres (s = 17,05 %).

1.1.2. *Etude comparative des différents procédés de mesure et d'évaluation gravimétrique des poussières dans les mines de houille des pays de la Communauté Européenne*

Ce travail a porté, d'une part, sur les mesures de concentration en poussières prélevées au moyen de capteurs différents et, d'autre part, sur l'évaluation des classes d'empoussièrement de chantiers d'abattage déduites de ces mesures et des règlements nationaux.

Les résultats complets de cette recherche (*), qui est résumée ci-après, ont été publiés dans la Revue de l'Institut d'Hygiène des Mines [1].

Les capteurs utilisés, adoptés par l'un ou l'autre pays de la Communauté, sont tous gravimétriques mais de types différents : Staser, MPG II, TBF 50, CPM 3 et Gravimetric Dust Sampler 113 A. Les prélèvements ont eu lieu en Belgique, en République Fédérale d'Allemagne, en France et en Grande-Bretagne à raison de 10 tailles par pays et 5 visites par taille en employant tous les capteurs simultanément.

Les données relatives aux échantillons recueillis ont été centralisées à l'Institut d'Hygiène des Mines qui en a fait l'étude statistique. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Il existe une forte corrélation entre les mesures de concentration en poussière fournies par les appareils pris deux à deux : les liaisons entre le Staser, qui prélève la poussière globale, et les capteurs de poussières respirables sont les moins bonnes, car, à une même quantité de fines, peuvent se joindre des quantités variables de grosses que le Staser mesure aussi. Quoi qu'il en soit, l'existence d'une corrélation autorise à calculer des relations empiriques permettant de prévoir la concentration y qu'un appareil aurait indiquée en moyenne s'il avait été employé à la place de l'un ou l'autre capteur ayant fourni la mesure x. Dans ce but, on a choisi 3 fonctions simples : linéaire, conique et puissance et on a adopté dans chaque cas la plus représentative. Au total, 120 relations ont été retenues; des valeurs exemplatives sont données au tableau II.

Les concentrations prévues pour le Staser n'ont pas été systématiquement calculées en raison de leur grande imprécision en valeur absolue (influence du degré de finesse).

- Les différentes méthodes de classement des atmosphères poussiéreuses s'accordent globalement pour ranger les chantiers visités dans un ordre croissant. Ce fait est vérifié pour chacune des campagnes nationales. Le degré d'accord peut être amélioré si on accepte de déplacer quelque peu les valeurs-seuils L_o des concentrations délimitant les classes officielles au moment de l'étude. On appellera ces valeurs-seuils déplacées « valeurs limites adaptées » L_a. Une méthode objective - basée sur la compensation des pertes et des gains entre deux classes contiguës - a

(*) Recherche effectuée avec l'aide financière de la CCE sous le n° 6253-23-2-072.

TABLEAU II

Prévision des concentrations en fines poussières à partir des mesures globales du Staser (mg / m³)

Appareil(y)	x :	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70
MPG	B	2,03	2,97	3,72	4,36	4,93	5,46	6,40	7,23	(8,00)*	(8,71)
	D	2,25	3,20	3,92	4,54	5,08	5,58	6,47	7,26	7,98	8,66
	F	1,44	2,02	2,46	2,84	3,16	3,46	3,98	4,43	4,84	5,22
	GB	2,44	3,55	4,48	5,31	6,09	6,84	(8,27)	(9,64)	(10,97)	(12,28)
TBF	B	1,15	1,99	2,74	3,44	4,10	4,73	5,94	7,08	(8,17)	(9,23)
	D	2,19	3,03	3,66	4,19	4,65	5,07	5,80	6,44	7,01	7,53
	F	1,56	2,17	2,63	2,99	3,30	3,57	4,00	4,34	4,60	4,79
	GB	1,61	2,41	3,11	3,77	4,41	5,02	(6,23)	(7,42)	(8,60)	(9,76)
CPM	B	2,18	3,07	3,75	4,32	4,82	5,27	6,06	6,75	(7,36)	(7,91)
	D	2,98	3,73	4,26	4,68	5,03	5,34	5,87	6,31	6,70	7,05
	F	2,00	2,80	3,38	3,85	4,25	4,58	5,13	5,56	5,88	6,12
	GB	2,24	4,17	6,10	8,03	9,96	11,88	(15,73)	(19,58)	(23,43)	(27,28)
MRE	B	2,15	3,19	4,02	4,74	5,38	5,97	7,04	7,99	(8,86)	(9,68)
	D	2,61	3,68	4,49	5,18	5,77	6,31	7,25	8,06	8,79	9,44
	F	2,00	2,54	2,92	3,22	3,48	3,70	4,09	4,41	4,70	4,96
	GB	3,31	4,68	5,72	6,59	7,35	8,03	(9,24)	(10,28)	(11,21)	(12,06)

* ( ) Valeurs tombant en dehors du domaine de mesure.

Exemples : pour une concentration x = 30 mg / m³ mesurée à l'appareil Staser, on prévoit :

y (MPG) = 5,58 mg / m³ dans un chantier moyen allemand;

y (CPM) = 4,58 mg / m³ dans un chantier moyen français;

y (MRE) = 8,03 mg / m³ dans un chantier moyen britannique.

permis de calculer les valeurs les plus probables de ces « limites adaptées » L_a.

D'une façon générale, la prise en considération des niveaux L_a permettrait d'harmoniser les réglementations nationales et, d'un point de vue épidémiologique, d'étudier les pneumoconioses à l'échelle de la CEE.

1.1.3. *Etude des constituants de poussières charbonneuses prélevées dans des exploitations à courbes épidémiologiques différentes*

Cette étude est un des prolongements de la première phase de la recherche communautaire, toujours en cours, sur les relations entre les données épidémiologiques et la nocivité des poussières de mines.

Sur base de certains tests de cytotoxicité, il apparaît que ce ne sont pas nécessairement les poussières charbonneuses les plus riches en cendres et même en quartz qui sont les plus nocives. En plus des différences de nocivité du quartz, selon son origine, on considère actuellement que des particules isolées de constituants minéraux, tels les argiles, sont responsables des écarts de nocivité constatés.

L'objectif de la recherche communautaire entreprise est de préciser le rôle du quartz dans la nocivité des poussières de mines et l'influence des minéraux d'accompagnement. Encore faut-il que l'on puisse doser ces minéraux de manière satisfaisante à partir de *poussières fines prélevées dans la mine* (et non plus à partir de mélanges préparés).

La présente recherche se limite à cet aspect technique.

La méthode d'analyse qui a été retenue est basée sur l'utilisation d'une microsonde électronique (collaboration du Laboratoire de Minéralogie de la Faculté Polytechnique de Mons et Institut National Interuniversitaire des Silicates et des Matériaux - INISMA - Mons).

L'analyse quantitative résulte de la comparaison des activités des raies caractéristiques mesurées sur l'échantillon et sur des « cibles » de composition connue. Les grandeurs mesurées doivent être corrigées de « l'effet de matrice » dépendant surtout du relief de l'échantillon par rapport à la taille du spot électronique qui, ici, est de l'ordre de quelques dixièmes de micron : d'où l'importance de la préparation de l'échantillon (polissage des plages, enrobage de résine, métallisation par évaporation sous vide d'une couche de carbone de quelques dizaines de nanomètres,...).

La préparation des minéraux argileux est difficile car ces minéraux présentent *une structure en feuillets.* Il a fallu mettre au point un mode opératoire particulier

pour réaliser un dépôt de particules orientées, par sédimentation, à partir d'une suspension colloïdale. Les essais ont porté sur le choix le plus judicieux de la concentration en matière sèche du colloïde pour que l'on puisse, après évaporation, observer une préparation correctement dispersée en vue de *l'analyse de particules individuelles*.

L'identification en phase est possible si les minéraux examinés peuvent se classer selon la nature et/ou les teneurs d'oxydes qui les composent.

On a, pour ce faire, considéré 4 groupes de minéraux : kaolinites, illites, chlorites, montmorillonites. Pour chaque élément appartenant à un et un seul de ces groupes, on a envisagé 5 variables quantitatives qui sont les rapports des fractions massiques de SiO_2 à Al_2O_3, Fe_2O_3 + FeO, MgO, CaO et K_2O.

Les essais réalisés sur échantillons témoins ont prouvé que la méthode d'analyse est bien au point et qu'elle pouvait être appliquée au dosage des minéraux argileux présents dans des *poussières charbonneuses*.

De nouveaux échantillons de poussières respirables ont été prélevés dans 5 tailles de Campine, notamment dans les couches 72 - 71 A - 68 - 61 et 49. Entretemps, deux prélèvements des couches 72 et 68 ont été analysés; ils présentent des compositions semblables, la fraction phylliteuse titrant 90 % d'illite. Les autres analyses sont en cours.

1.2. *Lutte contre les poussières - Performances des dépoussiéreurs*

Le rapport final de la recherche « Mise au point d'un dispositif de lutte contre les poussières à intégrer à des machines de creusement de niches et montages » a été présenté au début de cette année, à la CCE. Les résultats de cette étude ont d'ailleurs déjà été mentionnés dans ces colonnes [3] [4] au fur et à mesure de son évolution.

Rappelons que le pouvoir de captage de grilles humidifiées a été étudié au banc d'essais dans un atelier du siège de Zolder en fonction de différents paramètres, tels que le diamètre des fils, la consommation d'eau, le nombre de grilles et la vitesse de passage de l'air.

L'exemple suivant illustre succinctement les résultats. Si on imagine une concentration globale à l'aspiration de 100 mg/m³ et si une concentration à la sortie du dépoussiéreur de 3 mg/m³ est jugée suffisante, on peut se contenter d'une efficacité globale de 97 %. Un filtre constitué de 160 grilles avec une vitesse de passage de 8 m/s pourrait présenter une telle efficacité et, pour traiter 1 m³/s, une puissance utile de 1,4 kW suffirait.

En comparaison, des efficacités dix fois supérieures (99,7 %), indispensables dans le cas des creusements par tunneliers, exigent ± 20 kW/m³/s.

La filtration à sec consomme beaucoup moins d'énergie que les dépoussiéreurs humides : à efficacité égale, ils ne consomment qu'un tiers de l'énergie des dépoussiéreurs humides. Aussi voit-on les filtres secs conquérir le marché du dépoussiérage minier, partout où les contraintes de l'encombrement sont respectées par l'espace libre.

2. *Ventilation. Climatisation*

2.1. *Etudes sur ordinateur de problèmes d'aérage*

2.1.1. *Siège de Eisden*

Fin novembre 1980, l'Institut a mené, en collaboration avec les services compétents du siège de Eisden, une campagne de mesures globales de l'aérage.

Sur base des données ainsi récoltées, un modèle mathématique des puits et bouveaux a été établi, les circuits d'aérage des chantiers étant représentés de manière simplifiée.

Différentes variantes furent examinées pour augmenter sensiblement la part du débit d'air du siège envoyée à l'étage 780 où la production se concentrera pendant plusieurs années.

D'une première étude, il est apparu que l'installation d'un puissant ventilateur auxiliaire dans l'entrée d'air à l'étage 780, ne procurerait pas l'avantage escompté, son influence sur l'orifice équivalent de la mine étant négligeable.

Après discussion avec le siège, une solution a été recherchée qui consisterait à ouvrir, à l'étage 780, les circuits d'aérage des chantiers les plus proches des puits (normalement freinés) et d'équiper de ventilateurs auxiliaires les quatre circuits éloignés prévus dans le planning. Les caractéristiques de fonctionnement de ces ventilateurs ont été déterminées et elles seront obtenues en principe par des batteries de puissants ventilateurs secondaires montés en parallèle. Une telle installation fonctionne déjà depuis quelque temps au siège de Beringen.

2.1.2. *Siège de Zolder*

A la demande du siège de Zolder, diverses variantes ont été étudiées pour brancher dans les voies de retour d'air vers le puits de Houthalen, de manière aussi efficace que possible, les ventilateurs auxiliaires disponibles. Il s'agit de solutions transitoires dans l'attente de l'installation d'un ventilateur auxiliaire

puissant dans la liaison de retour d'air Zolder-Houthalen à l'étage 720.

Les débits mesurés après la réalisation des deux premières étapes intermédiaires correspondirent relativement bien aux prévisions, prouvant ainsi la conformité du modèle utilisé. L'étude est toujours en cours.

2.1.3. *Etranger*

A la demande d'une firme belge, on a déterminé, pour un charbonnage des Asturies (Espagne), les caractéristiques d'un nouveau ventilateur principal pour délivrer les débits souhaités lors de la mise en exploitation d'un étage inférieur. On a étudié également la répartition de l'air pour obtenir les plus faibles différences de pression possibles entre les voies d'entrée et de retour d'air (risque d'autoéchauffement), malgré l'augmentation des débits.

2.2. *Mesures de la température des roches in situ*

L'Institut d'Hygiène des Mines dispose depuis mars 1981 de l'appareillage mis au point par le Bergbauforschung de Essen (RFA) permettant de mesurer la température originelle des roches.

Durant le 2e trimestre, cinq mesures furent exécutées au siège de Waterschei dans des travaux préparatoires en veine (tableau III).

TABLEAU III

Mesures de la température des roches au siège de Waterschei

Endroit	Date	Profondeur sous le niveau de la mer (m)	Température (°C)
Voie de tête E8-36	23.04.81	491	25,8
Voie de pied E1-36	05.06.81	555	27,8
Voie de pied H1-55	18.06.81	703	34,3
Voie de tête L6-5B	29.04.81	724	36,9
Voie de tête R0-50	20.05.81	948	46,0

En septembre, l'Administration des Mines a accordé une dérogation valable pour toute la Campine, permettant d'utiliser un certain nombre d'appareils déjà agréés dans l'un des pays de la Communauté.

Cette élimination des entraves administratives permettra d'accélérer l'établissement d'un « cadastre » de la température originelle des roches dans les exploitations de Campine.

2.3. *Thermique minière*

L'Institut d'Hygiène des Mines dispose d'un programme d'ordinateur mis gracieusement à sa disposition par le Bergbauforschung de Essen (RFA) pour calculer l'évolution de la température et de l'humidité de l'air dans les voies et chantiers à deux issues. Ce programme a été introduit avec succès et emmagasiné dans un ordinateur de KS à Zolder.

Le programme calcule par itérations la température sèche de l'air à l'extrémité d'un tronçon relativement court (100 ou 200 m) du circuit d'aérage en partant de cette température à l'entrée. Ce résultat est utilisé comme température d'entrée pour le tronçon suivant et ainsi de suite.

Les calculs font intervenir les formules d'échange calorifique à l'état sec. Il faut cependant y introduire des coefficients pour tenir compte de l'humidité qui règne dans la mine. Les valeurs de ces paramètres sont déterminées par des mesures répétées dans les conditions existantes. C'est ainsi que des valeurs indicatives ont été trouvées dans le Bassin de la Ruhr pour des paramètres tels que la conductibilité thermique équivalente (λ_{aeq}) et l'indice d'humidité des parois (η_f). Comme ces valeurs ne sont pas nécessairement valables pour la Campine, il faudra y réaliser de nombreuses mesures de contrôle.

Comme premier test, l'Institut a mené, en collaboration avec le siège de Eisden, une campagne de mesures dans le circuit d'aérage d'un chantier sous 780 m. Cette taille était équipée d'une machine d'à peu près 1 MW de puissance frigorifique.

Après détermination de la température des roches in situ, les données seront introduites dans le programme pour confronter les mesures et les calculs.

Sur base des mesures effectuées à Eisden, on a pu établir le bilan calorifique suivant (taille en pleine activité) :

Chaleur totale produite :

- réfrigération	1.060 kW
- accroissement d'enthalpie de l'air	300 kW
- accroissement d'enthalpie de l'air comprimé (max)	40 kW
Total	1.400 kW

Provenant de :

- puissance électrique développée	720 kW
- autres facteurs (métabolisme, etc...)	20 kW
- terrains, produits abattus et transportés	660 kW
Total	1.400 kW

On constate qu'en période d'abattage, la chaleur produite provient à plus de 50 % de la puissance électrique. Les terrains et les produits abattus forment la source des 50 % restants. En dehors des périodes d'exploitation intensive, ces pourcentages sont certainement différents. Il est même vraisemblable que, pendant l'abattage, les terrains emmagasinent une certaine quantité de chaleur qu'ils restituent dans les périodes intermédiaires et les week-ends.

2.4. *Développement des techniques de (télé)mesures pour l'établissement de bilans thermiques et le contrôle (automatique) de l'aérage*

La recherche sur le contrôle de la ventilation par ordinateur a été arrêtée au 31 décembre 1980. Le rapport final de cette recherche a été approuvé par le Comité ad hoc de la CCE le 3 juin 1981. Il comporte un bilan de l'ensemble des travaux exécutés dans ce domaine durant les 10 dernières années. Après analyse des points forts et des points faibles, un nouveau projet de recherche a été introduit auprès de la CCE. Ce projet vise à améliorer la technique de mesure des facteurs de l'aérage qui ont posé un problème au cours de la recherche précédente.

2.4.1. *Bilan de la recherche précédente*

Il n'a pas été possible de mettre en œuvre le processus de régulation centralisée par ordinateur dans sa conception originelle et ce, pour les raisons suivantes :

- le nombre de régulateurs soumis simultanément au contrôle centralisé a été fortement limité : dans les derniers mois une seule action de réglage était possible;
- les régulateurs étaient assez dispersés, de telle sorte que les réactions mutuelles étaient relativement faibles;
- les remaniements de l'aérage ont entraîné une détérioration du modèle mathématique du réseau stocké dans l'ordinateur et une grande difficulté de le tenir à jour.

A défaut d'une expérimentation suffisante, il est donc impossible de porter actuellement un jugement définitif sur le mode de régulation à préconiser, mais des conclusions fermes peuvent être tirées concernant certains points particuliers recensés ci-après.

L'acquisition des données relatives à l'aérage, au grisou et au climat a fait d'importants progrès au cours de la recherche écoulée. On peut citer particulièrement :

- le développement d'équipements originaux de sécurité intrinsèque, tels que le télépsychromètre PSY 03 et des alimentations doubles 500 volts AC/28 volts DC, destinées aux psychromètres et aux capteurs de pression Hartmann et Braun;
- l'adaptation d'équipements mis sur le marché aux conditions particulières de notre recherche. L'exemple le plus typique est l'intégration de 4 « data logger » de la firme Analogic dans un ensemble de scrutation et de conversion A/D de données fugitives et permanentes, ayant une capacité maximum de 256 canaux, avec possibilité d'appel de certaines mesures plus fréquemment que d'autres;
- la mise au point d'une carte multiplexeur spéciale, permettant de traiter les mesures permanentes de teneurs en oxyde de carbone comme s'il s'agissait de mesures fugitives.

Le traitement des données par ordinateur a permis de répondre à certaines exigences qui, à l'époque, ne pouvaient être satisfaites autrement. On peut citer dans le cadre du monitoring :

- le programme-filtre, qui élimine des mesures le bruit s'étendant dans une large plage de fréquences, notamment des fréquences basses (...1... Hz) impossibles à éliminer autrement;
- l'utilisation de tables de conversion traduisant les fonctions les plus diverses avec une excellente précision, comme par exemple la conversion des mesures de pression au pavillon d'un ventilateur en débit par une formule du type $Q_v = K \Delta p^{0,47}$, ou la conversion en température de la chute de tension U dans une thermistance, par une formule du type

$$t = \frac{A}{\log (B + CU)} + D$$

Les programmes de calcul constituent également un acquis important. Ils peuvent en effet être utilisés en dehors du cadre de la recherche pour résoudre divers problèmes se présentant fréquemment dans les études d'aérage. On peut penser en particulier au cas où l'on désire imposer une ou plusieurs contraintes d'aérage dans des branches d'un réseau, alors qu'il est impossible d'agir directement sur ces mêmes

branches; ou bien au cas où le nombre de contraintes que l'on doit satisfaire est supérieur au nombre de moyens d'action disponibles et où l'on doit se contenter du meilleur compromis.

Enfin, *la logique de validation* qui a pour objet de déceler une mesure erronée parmi un ensemble redondant de mesures, constitue une méthode transposable à un grand nombre d'applications : elle est particulièrement utile lorsque la sécurité dépend de la fiabilité et de l'exactitude des données mesurées.

2.4.2. *Difficultés rencontrées et perspectives de solution*

La commande automatique des portes régulatrices a présenté une difficulté plus grande que celle des ventilateurs à pales orientables en marche. Cette difficulté provient d'une qualité insuffisante des télémesures du *débit d'air*. En particulier, l'utilisation de téléanémomètres ATM contrôlant la vitesse en un seul point de la section d'une galerie s'est avérée la plupart du temps *insatisfaisante* pour assurer le réglage automatique du débit de cette galerie. De plus, le système de transmission possède une dérive de zéro et de gain, ainsi qu'un niveau de bruit à basse fréquence qui sont très gênants en régulation.

Toute tentative nouvelle d'asservir la répartition de l'air à des consignes relatives à la grisoumétrie et au climat devrait être précédée par la mise au point de systèmes d'acquisition et de transmission de données de l'aérage plus performants.

Le nouveau projet de recherche, qui a été accepté par les instances compétentes de la CCE, et qui devrait démarrer le 1er juillet 1982, vise à atteindre cet objectif.

3. *Recherches médico-techniques. Travaux divers*

3.1. *Epidémiologie des pneumoconioses en Campine*

Les résultats des examens radiographiques de tous les mineurs de Campine ont été examinés statistiquement, en distinguant (comme les années précédentes) les prévalences et les incidences en fonction du nombre d'années de service.

En valeur globale (tous âges, toutes catégories), le pourcentage des cas m_2 et m_{2+}, en 1980, est descendu à 1,23 % (au lieu de 11,65 % en 1959/1960).

On constate qu'en 1980, il y a, parmi les ouvriers ayant de 20 à 24 ans de fond :

- plus de 80 % des membres du personnel qui présente une image radiographique normale, subnormale (0/Z);
- moins de 15 % des membres du personnel (ayant la même ancienneté) qui présentent des images de types p/m_1.

Le pourcentage d'ouvriers ayant de 20 à 24 ans de fond et présentant des images m_2 et m_{2+} est actuellement de 5,4 %, alors qu'en 1959-1960, le pourcentage d'ouvriers de même ancienneté atteignait la valeur de 36,6 %, ce qui confirme l'amélioration de l'état sanitaire du personnel constatée depuis quelques années.

3.2. *Recherches ergonomiques*

La première recherche confiée à l'Institut d'Hygiène des Mines par la CCE dans le cadre du 4e programme ergonomique a pour titre : « Etude de la charge de travail au front à charbon des voies de tête avec coupage en arrière de la taille ». La recherche est effectuée en collaboration avec le CCR, la KUL et le siège de Beringen. Elle comporte un aspect technique, physiologique et psychologique. L'étude de ce dernier aspect a débuté le 1er avril sous la conduite du Professeur Verhaeghe. Trente-deux interviews ont eu lieu. L'équipement du laboratoire de physiopathologie cardio-respiratoire de l'Institut d'Hygiène des Mines a été renouvelé pour les besoins du volet physiopathologique de cette recherche.

3.3. *Travaux divers*

En plus des analyses de filtres Soxhlet provenant des examens routiniers des chantiers charbonniers belges, le laboratoire de l'Institut d'Hygiène des Mines a procédé à la mesure des conditions d'empoussièrement d'un atelier de grenaillage et à l'examen de poussières de chaudière. Comme l'année dernière, on peut regretter qu'une seule demande de mesure de pollution par l'asbeste nous soit parvenue. Dans le domaine de la silice, on a été conduit à mettre au point le dosage colorimétrique de l'ion silicique en présence des nombreux composés organiques contenus dans le sérum humain naturel ou modifié; cette étude nous avait été demandée par une firme pharmaceutique belge.

Par ailleurs, on a étudié l'activité des produits IMX 19 et D-Dust de la Dubois Chemicalien (Pays-Bas) dans le but de diminuer le soulèvement de poussières dans les galeries de charbonnages. La méthode consiste à humidifier le matériau poussiéreux avec divers produits et à exposer les mélanges à l'air; on mesure ensuite dans des conditions standardisées les quantités de fines poussières soulevées en fonction de la

dessiccation progressive de mélanges témoins traités à l'eau seule. La figure 8 permet d'apprécier l'efficacité des nouveaux agents par rapport à d'autres traitements. En l'occurrence, les nouveaux produits essayés ne se montrent pas plus efficaces que l'eau seule; par contre, le traitement par une solution de chlorure de calcium confirme l'intérêt que d'anciennes études nous avaient révélé [2].

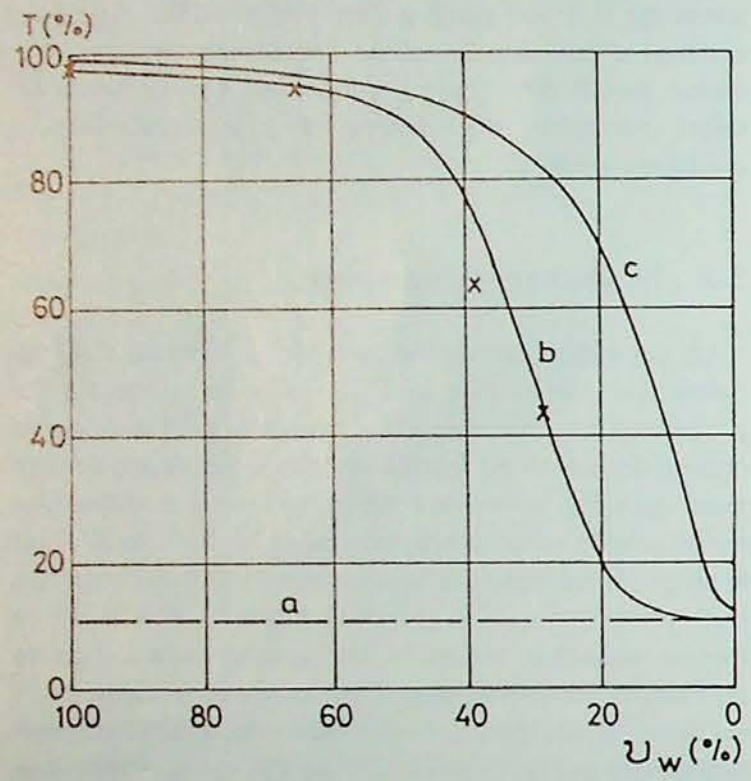


Fig. 8. — Poussières soulevées en fonction de l'assèchement progressif des mélanges; transparence relative T des prélèvements à la hand-pump en fonction de v_w, pourcentage d'eau restant à la fin de l'essai dans un bac témoin.

Support : charbon (granulométrie < 3,36 mm; teneur en cendres : 28,0 %

M.V. (sec, sans cendre) : 39,5 %);

imprégnation : $\lambda_{v,o}$* = 5 %;

Humidité relative de l'air : ± 0,55;

Vitesse de l'air : ± 2 m/s.

(a) : pas de liquide d'imprégnation

(b) : liquide d'imprégnation = eau

(c) : liquide d'imprégnation = $CaCl_2$ + Tensophène H_{10}; τ_o** = 5 % $CaCl_2$ + 0,1 % H_{10}

(x) : résultats communs obtenus avec IMX 19 (τ_o = 12,5 %) et D-Dust (τ_o = 0,05 %)

* $\lambda_{v,o}$: taux volumique initial d'imprégnation du support (cm³ de liquide pour 100 cm³ de support en grains);

** τ_o : taux massique initial des agents essayés (g de produit dans 100 g de solution).

3.4. *Enquête*

Les principaux résultats de l'enquête annuelle effectuée par l'Institut sur les moyens de prévention de poussières utilisés dans les charbonnages sont rassemblés dans les tableaux IV et V. Ces tableaux donnent le développement des tailles dans lesquelles on met régulièrement en œuvre les procédés classiques de lutte contre les poussières : injection d'eau en veine, havage humide et pulvérisation d'eau en taille.

TABLEAU IV

Développement des tailles (m) auxquelles sont appliqués régulièrement des traitements humides. Situation à la fin des années 1980 et 1981

Bassins	Campine		Sud		Ensemble	
Années de référence	1980	1981	1980	1981	1980	1981
Nombre de tailles actives	40	36	4	3	44	39
Longueur des fronts déhouillés (m)	9.269	8.498	680	628	9.949	9.126
I. *Traitements appliqués aux points de formation des poussières*						
1. Développement total des tailles traitées (m)						
- Injection d'eau en veine	1.911	2.072	—	167	1.911	2.239
- Havage humide	1.667	1.909	—	—	1.667	1.909
Longueur totale traitée (m)	3.578	3.981	—	167	3.578	4.148
2. Longueur des fronts traités simultanément par ces procédés (m)	—	—	—	—	—	—
3. Longueur réelle traitée (m)	3.578	3.981	—	167	3.578	4.148
II. *Traitement par pulvérisation d'eau en taille*						
1. Développement total des fronts traités par pulvérisation d'eau (m)	7.853	6.589	680	628	8.533	7.217
2. Longueur des fronts traités par un des procédés indiqués ci-avant, combiné à la pulvérisation en taille (m)	2.162	2.072	—	167	2.162	2.239
3. Longueur traitée uniquement par pulvérisation d'eau	5.691	4.517	680	461	6.371	4.978

TABLEAU V

Moyens de prévention normalement mis à la disposition du personnel dans les travaux préparatoires au cours des opérations de foration

Bassins	Campine		Sud		Ensemble	
Années de référence	1980	1981	1980	1981	1980	1981
Nombre de fronts en creusement	39*	42**	1	1	40	43
Fronts équipés de						
- capteurs pour forage à sec	—	1	—	—	—	1
- perforateurs à injection centrale d'eau	35	39	1	1	36	40
- dépoussiéreur	2	1	—	—	2	1
Fronts avec prévention	37	41	1	1	38	42

* dont 2 burquins
** dont 2 burquins et 1 traçage mécanisé

On y indique la longueur des fronts où plusieurs de ces techniques sont adoptées simultanément et on y fait également la répartition des moyens de prévention mis à la disposition du personnel pendant les opérations de forage au rocher.

BIBLIOGRAPHIE

[1] CARTIGNY S. : Etude comparative des différents procédés de mesure et d'évaluation gravimétrique des poussières dans les mines de houille des pays de la Communauté Européenne. *Revue de l'Institut d'Hygiène des Mines,* 1981, *36,* 2, 83/123, 76 p. hors texte.

[2] HOUBERECHTS A. : L'activité de l'Institut d'Hygiène des Mines au cours de l'année 1966. *Annales des Mines de Belgique,* 1967, 5, 505/530.

[3] MINETTE A. : Activité de l'Institut d'Hygiène des Mines au cours de l'année 1979. *Annales des Mines de Belgique,* 1980, 12, 1111/1132.

[4] MINETTE A. : Activité de l'Institut d'Hygiène des Mines en 1980. *Annales des Mines de Belgique,* 1981, 10, 853/872.

[5] SERRA R. : Courbes expiratoires d'oxygène. Comparaison avec les courbes de CO_2. Contribution à l'étude des facteurs de distribution. Thèse, Utrecht, 1967, 201 p.

[6] SERRA R. et MINETTE A. : Contribution à l'étude des plaintes de dyspnée chez les mineurs de charbon. *Revue de l'Institut d'Hygiène des Mines,* 1979, *34,* 2, 59/69.

L 3770

Publication de l'Institut National
des Industries Extractives et de
l'Administration des Mines

Publikatie van het Nationaal Instituut
voor de Extractiebedrijven en het
Bestuur van het Mijnwezen

Direction-Rédaction
Institut National
des Industries Extractives
B-4000 Liège, rue du Chéra, 200

Directie-Redactie
Nationaal Instituut
voor de Extractiebedrijven
Tél. (041) 52 71 50

Edition - Abonnements
Publicité
Editions Techniques
et Scientifiques

B-1050 Bruxelles
Rue Borrens, 35-43
Tél. (02) 640 10 40

Uitgeverij - Abonnementen
Advertenties
Technische en Wetenschappelijke
Uitgaven

B-1050 Brussel
Borrensstraat, 35-43
Tel. (02) 640 10 40

Les articles publiés dans cette revue
n'engagent que la responsabilité
de leurs auteurs

Reproduction, adaptation et
traduction autorisées en citant
le titre de la Revue, la date et l'auteur.

De artikels gepubliceerd in dit tijdschrift
verschijnen onder de verantwoordelijkheid
van hun auteurs

Reproductie, bewerking en vertaling
toegelaten met aanhaling van het
Tijdschrift, de datum en de auteur.