

**ANNALES** DE L'INSTITUT TECHNIQUE  
DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

SERIE : TECHNIQUE GENERALE  
DE LA CONSTRUCTION

Supplément au N° 353 SEPTEMBRE 1977

N° 66

CENTRE D'ETUDES SUPERIEURES. SEANCE DU 1<sup>er</sup> MARS 1977, SOUS LA PRESIDENCE DE  
M. PIERSON D'AUTREY, DIRECTEUR GENERAL DE QUILLERY S.A.

# LE DÉCOUPAGE THERMIQUE DES BÉTONS ARMÉS ET PRÉCONTRAINTS

par

Yves MALIER

Directeur d'études à l'Ecole Normale Supérieure  
de l'Enseignement Technique  
Conseil Oxybéton

ASSOCIATION FRANÇAISE DU BÉTON  
ASSOCIATION FRANÇAISE DES PONTS ET CHARPENTES  
SYNDICAT NATIONAL DU BETON ARME ET DES TECHNIQUES INDUSTRIALISEES  
INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

## LE DÉCOUPAGE THERMIQUE DES BÉTONS ARMÉS ET PRÉCONTRAINTS

L'amélioration constante des propriétés des matériaux et le respect de plus en plus strict des exigences de la qualité de la vie et de l'environnement contribuent largement à l'augmentation des difficultés rencontrées lors des modifications ou des démantèlements des constructions en béton.

Cela rend désormais nécessaire le développement de nouvelles méthodes et de nouveaux procédés d'exécution de tels travaux.

Dans la présente étude il est montré, à travers diverses applications industrielles récentes, que le découpage thermique Oxybéton (dont on rappelle le principe) peut constituer une solution à ces problèmes en introduisant, pour les travaux de démolition, une méthodologie inspirée de la préfabrication.

Par ailleurs, l'étude d'opérations délicates (ossatures en béton précontraint, démantèlement partiel de structures hyperstatiques, etc...) a nécessité des recherches approfondies concernant notamment les effets du découpage (champ de température, contraintes d'origine thermique, résistance mécanique, adhérence...). La nature de certaines de ces recherches et quelques résultats importants sont présentés.

Enfin, il est observé que la rationalisation de la démolition, au-delà des incidences techniques et économiques qu'elle implique, participe largement au développement de la sécurité.

## BRENNSCHNEIDEN VON STAHL- UND SPANNBETON

Die ständig verbesserten Werkstoffqualitäten und die immer strenger befolgten Anforderungen hinsichtlich Lebensqualität und Umwelt erschweren wesentlich Änderungen bzw. Abreissarbeiten von Betonbauwerken.

Demzufolge ist für solche Arbeiten die Entwicklung von neuen Methoden und Verfahren erforderlich geworden.

In dieser Untersuchung wird anhand verschiedener industrieller Anwendungen neueren Datums aufgezeigt, dass das Brennschneiden « Oxybéton » (dessen Funktionsprinzip noch einmal erläutert wird) für diese Probleme eine Lösung anbieten kann, indem für diese Abreissarbeiten eine sich an die Vorfertigung anlehrende Methodologie eingeführt wird.

Andererseits hat die Untersuchung heiklerer Arbeiten (Gerüste aus Spannbeton, Teilabriss von hyperstatischen Strukturen usw...) eingehende Forschungen erforderlich gemacht, insbesondere hinsichtlich der Auswirkungen dieses Brennschneidens (Temperaturfeld, Wärmespannungen, mechanische Festigkeit, Adhärenz...). Die Art gewisser Forschungen und einige relevante Ergebnisse werden dargelegt.

Schliesslich wird festgestellt, dass die Rationalisierung der Abreiss- und Einschleifarbeiten — ausser den damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Aspekten — weitgehend zur Verbesserung der Sicherheit beiträgt.

*Mots-clés* : Découpage - Béton - Coupage thermique - Démolition - Béton armé - Béton précontraint - Oxycoupage - Champ de température - Contrainte thermique - Propriété mécanique - Adhérence - Sécurité du Travail - Nuisance acoustique.

## THE THERMAL CUTTING OF REINFORCED AND PRESTRESSED CONCRETES

The constant improvement of the properties of materials and the increasingly strict respect for the requirements of the quality of life and of the environment are greatly contributing to the growing difficulties encountered when concrete structures are being modified or dismantled.

New methods and new procedures for the execution of such works therefore need henceforth to be developed.

The present study sets out to show, through a variety of recent industrial applications, that the Oxyconcrete thermal cutting (the principle of which is recalled) may afford a solution to these problems by introducing, for demolition works, a methodology inspired by prefabrication.

In addition, the study of intricate operations (prestressed concrete frames, partial dismantling of hyperstatic structures, etc...) has required thoroughgoing studies concerning in particular the effects of cutting (temperature field, stresses of thermal origin, mechanical strength, bond stress...). The nature of some of these investigations and a few important results are presented.

Finally, it is observed that the rationalization of demolition, beyond the technical and economic effects that it implies, participates broadly in the development of safety.

## CORTE TERMICO DE LOS HORMIGONES ARMADOS Y PRETENSADOS

La constante mejora de las propiedades de los materiales y el respeto cada vez más estricto de los requerimientos de la calidad de la vida y del entorno han contribuido ampliamente al aumento de las dificultades que se tropieza al proceder a las modificaciones o derribos de las construcciones de hormigón.

Ello ha precisado ya el desarrollo de nuevos métodos y nuevos procedimientos de ejecución de semejantes trabajos.

En el presente estudio se demuestra, por medio de diversas aplicaciones industriales recientes, que el corte térmico « Oxybéton » (Oxihormigón) — del cual se recuerda el principio — puede constituir una solución para estos problemas, introduciendo, para los trabajos de derribos, una metodología inspirada de la prefabricación.

Por otra parte, el estudio de operaciones delicadas (estructuras de hormigón pretensado, derribo parcial de estructuras hiperestáticas, etc.) ha precisado investigaciones de gran envergadura, relativas, en particular a los efectos de seccionamiento (campo de temperatura, esfuerzos de origen térmico, resistencia mecánica, adherencia, etc.). Se presentan en el artículo el género de algunas de estas investigaciones y algunos resultados importantes.

Finalmente, se observa que la racionalización del derribo, más allá de las incidencias técnicas y económicas que la misma presupone, participa ampliamente en el desarrollo de la seguridad.

*Les thèses et la méthode d'exposition adoptées par les auteurs peuvent parfois heurter certains points de vue habituellement admis. Mais il doit être compris que ces thèses, à l'égard desquelles l'Institut Technique ne saurait prendre parti, ne visent en rien les personnes ni le principe des Institutions.*

## ALLOCUTION DU PRÉSIDENT

M. YVES MALIER, ancien élève de l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, où il est devenu professeur, va nous faire un exposé sur le découpage thermique des bétons armés et précontraints. C'est un procédé nouveau qui présente un grand intérêt et je crois que le mieux est de lui laisser la parole.

### EXPOSE DE Yves MALIER

#### 1. NATURE DES PROBLEMES DE DEMOLITION

L'observateur de l'évolution des secteurs industriels du bâtiment et des travaux publics ne manque pas de remarquer, depuis de longues années, l'amélioration de la qualité des constructions.

Ce phénomène est dû, pour l'essentiel, à différents facteurs tels que :

- 1) l'accroissement de la connaissance des matériaux, sous tous les aspects qui conditionnent leur comportement immédiat ou leur évolution dans le temps (physico-chimie, mécanique, thermique, etc.) ;
- 2) le développement des méthodes d'analyse numérique des structures permettant (grâce à l'ordinateur), le dimensionnement du « modèle mécanique » ;
- 3) la rationalisation systématique des méthodes d'organisation du travail ;
- 4) l'amélioration des performances et des rendements des matériels de chantier.

La conséquence des recherches conduites dans ces différents domaines est finalement de permettre à l'ingénieur d'assurer, dans le plus strict respect du parti architectural défini par le maître-d'œuvre, toutes les conditions de stabilité et de sécurité que le maître d'ouvrage est en droit d'exiger.

**La contre partie de ce considérable accroissement des qualités des constructions est de les rendre quasi-invulnérables le jour où, pour des raisons fonction-**

**nelles ou esthétiques, on souhaite les modifier ou les supprimer.**

Le problème est rendu plus complexe encore dès qu'interviennent, outre les difficultés intrinsèques de la démolition (dues pour l'essentiel aux résistances mécaniques) d'autres préoccupations de plus en plus déterminantes telles que la prise en compte :

- 1) de la qualité de la vie des personnes habitant ou travaillant au voisinage du site ;
- 2) des conditions de fonctionnement normal des équipements et des matériels dont le service doit être conservé et qui réagissent souvent désavantageusement aux vibrations et aux bruits (il en est ainsi, par exemple, des centres de calcul, des centraux téléphoniques, des hôpitaux, des locaux militaires opérationnels, etc.) ;
- 3) de la nécessité de brefs délais de transformation d'un ouvrage compatibles avec le fonctionnement normal du service auquel il appartient (réseau de communications, centres commerciaux, etc.).

En conséquence, si nous voulons conserver l'indispensable maîtrise de notre environnement, il nous paraît désormais impératif que s'élaborent et se développent de **nouvelles méthodes de démolition**, capables de satisfaire à l'ensemble des problèmes tels qu'ils nous sont et nous seront désormais proposés.

#### 2. UNE METHODE DE DEMOLITION INSPIREE DE LA PREFABRICATION

Pendant longtemps, les opérations de démolition, sous l'influence sans doute des entreprises de terrassement plutôt que celles de construction, ont toujours été envisagées totalement sur le lieu même de l'intervention et c'est par une réduction en gravats plus ou moins gros et leur évacuation qu'elles se terminaient.

Tant que le site le permettait, une telle démarche, fort simple dans son principe, a fait la preuve, par des milliers d'exemples, de sa qualité et de sa réussite.

Parallèlement à cette observation, examinons, durant la même période, l'évolution de la construction ; nous constatons que, de plus en plus, face aux problèmes de délais d'exécution, de coût des investissements, de conditions de travail et d'intempéries, etc., les entreprises ont adopté des solutions nouvelles et, notamment, la préfabrication qui, en quelque sorte se réduit, si l'on schématise l'acte de construire, à trois opérations qui sont (fig. 1) :

- 1) l'exécution des éléments en poste fixe en usine avec utilisation de matériels à fort rendement travaillant en continu afin d'en justifier l'investissement.
- 2) le transport ;
- 3) le montage, qui reste l'opération de chantier et qui, comparée à la méthode traditionnelle de construction, est brève et peu génératrice de nuisances.

Notre conception de la démolition est que **l'application « à l'envers » d'un tel schéma peut constituer, dans un grand nombre de cas, une solution satisfaisante du problème.** Nous retrouvons ainsi (fig. 1) :

- 1) une phase de démontage sur chantiers ;
- 2) une phase de transport identique à celle énoncée précédemment ;
- 3) une phase de destruction conduisant à la mise en décharge ou à la récupération qui serait effectuée

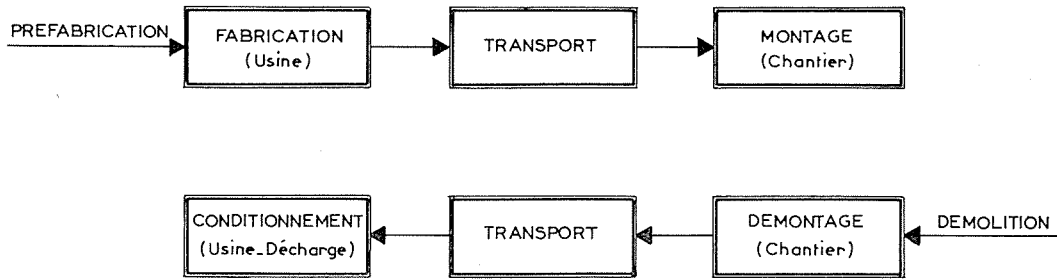


Fig. 1. — Analogie préfabrication-démolition.

en poste fixe sur des lieux isolés, véritables « usines de démolition » où l'utilisation d'engins fixes de grande puissance permettrait un abaissement du prix de revient.

Un tel schéma sous-entend, entre autres choses, l'existence de procédés de découpage des ouvrages, notamment en béton, suffisamment mobiles, simples,

efficaces et non générateurs de nuisances pour être compatibles avec la vie de chantier. certes mais aussi avec le respect de toutes les exigences désormais rencontrées.

Ainsi, pénétré de cette idée directrice que nous croyons prospective, nous nous sommes attachés à adapter puis à développer le découpage thermique.

### 3. LE DECOPAGE THERMIQUE

#### 3.1. Le principe

Les méthodes habituelles d'oxycoupage, utilisées notamment face aux matériaux métalliques, procèdent, pour obtenir l'usinage, essentiellement d'une combustion locale du matériau.

De façon sensiblement différente, la méthode que nous préconisons consiste plutôt à transformer le matériau à découper en un laitier suffisamment fluide pour pouvoir être évacué.

Dans son principe, cet écoulement de la matière résulte de phases bien distinctes (fig. 2).

##### a) une phase thermique

On cherche à obtenir, au voisinage proche du matériau à découper, une réaction fortement exothermique délivrant une quantité de chaleur importante et des produits de combustion susceptibles de réagir, à haute température, sur ce matériau d'épreuve.

Ainsi, par exemple, nous savons depuis longtemps que la combustion du fer dans un jet d'oxygène conduit à l'obtention de l'oxyde magnétique  $Fe_3O_4$  (qui peut ensuite donner d'autres oxydes tels que  $Fe_2O_3$  et  $FeO$ ). Ces réactions d'oxydation s'accompagnent d'un très fort dégagement de chaleur. Il en est de même des autres métaux ; par exemple, la combustion d'un gramme d'aluminium dans un jet d'oxygène dégage 7 200 calories.

##### b) Une phase chimique

La quantité de chaleur et les oxydes sont utilisés pour assurer la transformation locale du matériau en laitier.

Ces réactions, assez complexes, peuvent avoir plus ou moins d'ampleur ; elles dépendent essentiellement de la composition initiale des matériaux en présence et c'est finalement la proximité des températures eutectiques des mélanges qui caractérisera l'aptitude ou la non-aptitude à la découpe.

Ainsi, par exemple, la présence de carbonate de calcium peut être un élément défavorable car il se décompose et se combine avec les oxydes métalliques suivant des réactions endothermiques. Il en

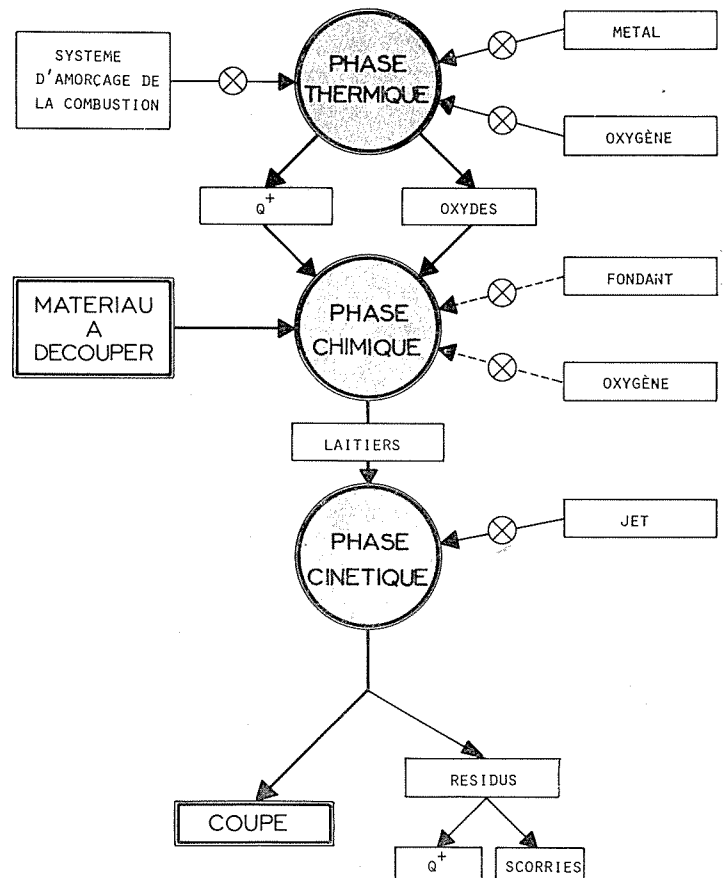


Fig. 2. — Principe du découpage thermique.

résulte un abaissement de la température et un rapprochement de la phase solide peu favorable à la découpe... Il peut s'avérer nécessaire, dans ce cas, d'adjoindre un élément fondant qui réduira la viscosité et ainsi favorisera la suite des réactions (on voit

l'importance que peut prendre cette remarque dans le cas du découpage de béton à agrégats plutôt calcaires).

### c) Une phase cinétique

C'est en fait la phase d'avance de la coupe ; en effet, le laitier doit être évacué d'une part pour permettre la pénétration de la lance thermique et donc le forage, et d'autre part pour réduire la puissance calorifique du foyer en une zone où cela n'est plus nécessaire et où, par contre, cela risquerait de conduire à un échauffement important du béton.

Cette opération peut être réalisée soit naturellement par gravité, soit par action d'un jet de gaz sous pression, soit éventuellement par vaporisation d'un jet d'eau sous pression (dans le cas de coupes de très grandes profondeurs).

La conséquence de la superposition de ces trois phases est donc de conduire à un forage de quelques centimètres de diamètre dans le matériau d'épreuve. L'exécution de forages tangents déterminera ensuite naturellement la coupe.

### 3.2. Le procédé

L'analyse de l'organigramme de la figure 2 nous faisait présager la relative complexité du procédé en raison, notamment, des nombreux conditionnements nécessaires et, sur chacun d'eux, des circuits de transferts et des régulations indispensables à une combustion optimisée.

Par ailleurs, l'application du principe de découpage ne pouvait être envisagée que par un procédé qui soit compatible avec les caractéristiques particulières aux interventions sur chantiers et avec les règles de sécurité.

Entre ces deux familles de sujétions, un compromis devait donc être établi, et, dans notre procédé Oxy-béton, ce sont les conditions de compatibilité qui ont largement pris l'ascendant sur les conditions d'optimisation, tant il nous a paru indispensable que le matériel soit simple, léger, mobile, sans aucun danger de détente de gaz et puisse être utilisé, autant que possible, en tous lieux et toutes circonstances.

Il en résulte que l'appareil est finalement constitué, dans les cas les plus courants :

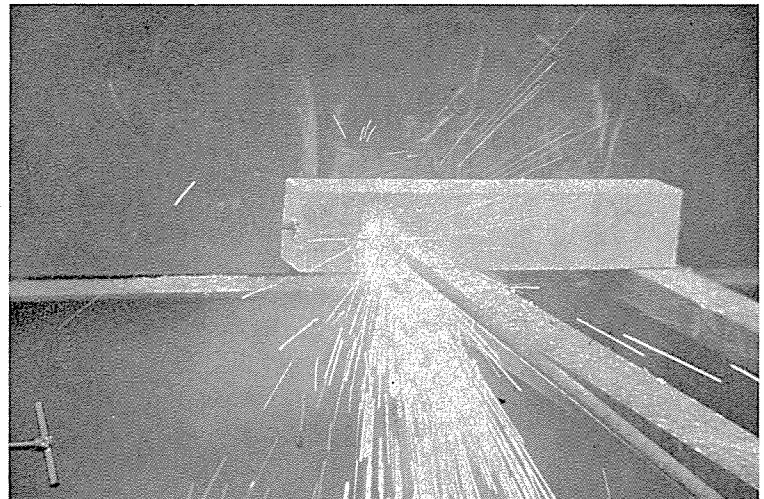
- **d'une lance thermique**, combustible, qui est le tube comportant les matériaux, pré-dosés, nécessaires à la combustion ;
- **d'un circuit d'alimentation d'oxygène**, raccordé à la lance par un porte-lance et comportant une canalisation haute pression, une centrale de conditionnement et une unité de régulation.

Nous ne nous étendons pas, ici, sur les performances du procédé. Nous dirons simplement qu'il permet la découpe de tous les matériaux usuels des industries du bâtiment et de la mécanique et ce jusqu'à plusieurs mètres d'épaisseur (jusqu'à 2 mètres sans difficultés particulières).



Fig. 3. — L'opérateur tenant une lance thermique.

Fig. 4. — Découpe d'une éprouvette de béton armé.



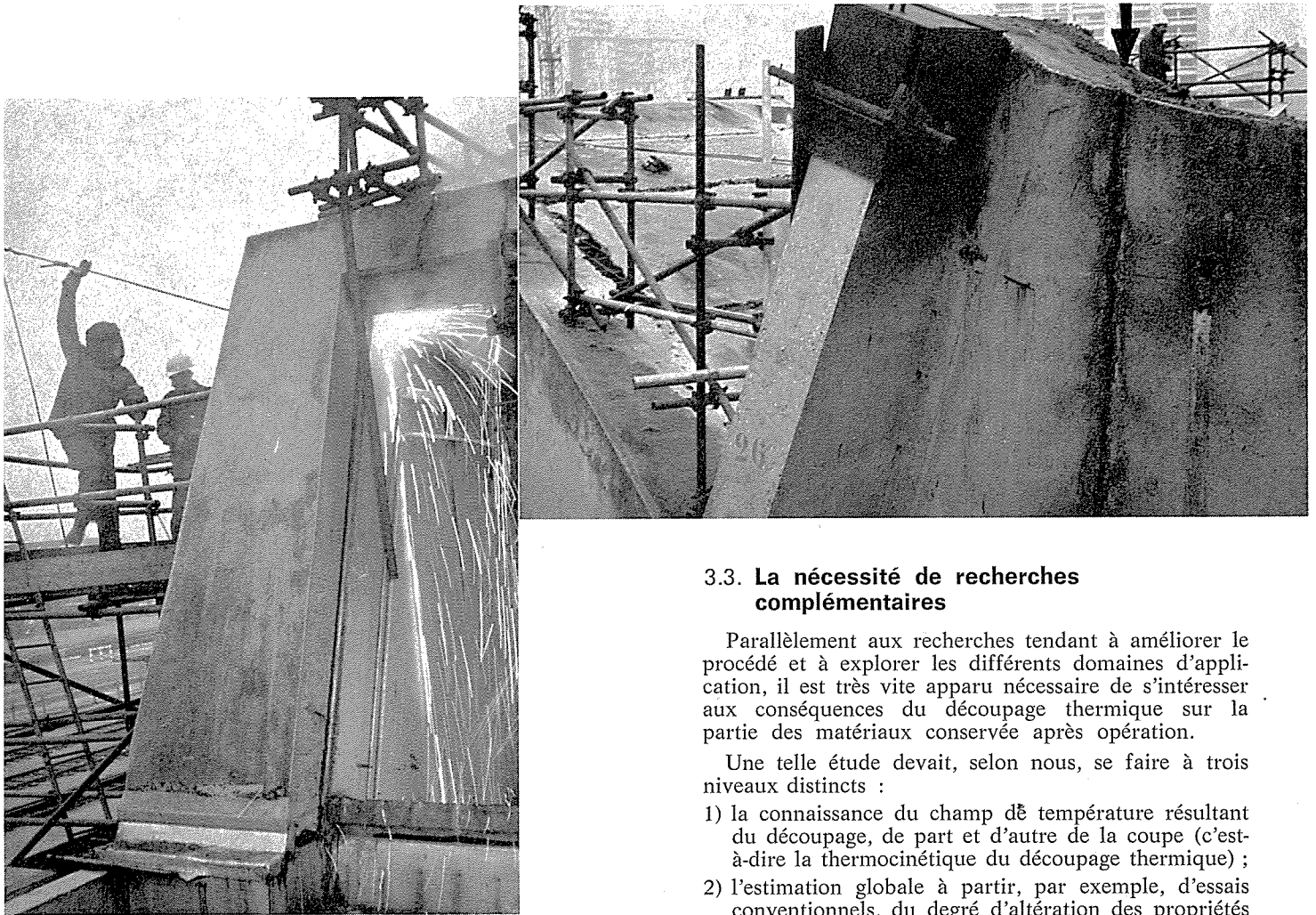


Fig. 5 et 6. — Une coupe industrielle.

Par ailleurs, et c'est à notre avis essentiel au niveau de la rationalisation et de la planification du chantier, il convient de noter que les consommations et les temps de travail sont parfaitement connus et ne dépendent que des matériaux à découper et de l'orientation de la coupe. Il en résulte que la prévision du délai d'exécution et finalement le coût de l'opération peuvent être déterminés avec une grande précision.

### 3.3. La nécessité de recherches complémentaires

Parallèlement aux recherches tendant à améliorer le procédé et à explorer les différents domaines d'application, il est très vite apparu nécessaire de s'intéresser aux conséquences du découpage thermique sur la partie des matériaux conservée après opération.

Une telle étude devait, selon nous, se faire à trois niveaux distincts :

- 1) la connaissance du champ de température résultant du découpage, de part et d'autre de la coupe (c'est-à-dire la thermocinétique du découpage thermique) ;
- 2) l'estimation globale à partir, par exemple, d'essais conventionnels, du degré d'altération des propriétés mécaniques usuelles des matériaux découpés (résistances en traction et en compression, adhérence acier-béton, etc.) ;
- 3) l'analyse plus fine des variations locales des caractéristiques et des comportements du matériau (module d'élasticité, contraintes d'origine thermique, évolution de l'eau incluse dans le béton, etc.).

Une telle étude devrait permettre de fixer, avec plus de rigueur, les conditions et, éventuellement, les limites d'emploi du découpage thermique.

Nous nous bornerons ici à une analyse des deux premiers points.

## 4. LA THERMOCINETIQUE DU DECOUPAGE THERMIQUE

### 4.1. Etude théorique

Cette étude, conduite depuis 1972, a pour objet la prévision du champ de température résultant de l'exécution d'un découpage dans un élément de béton armé.

Les principaux paramètres d'une telle étude sont très nombreux ; on peut citer :

- la distance du point d'étude à la coupe ;
- la composition du béton (et la nature des constituants) ;
- la nature et la quantité d'eau incluse dans ce béton ;

- les caractéristiques thermophysiques des matériaux (et leur évolution en fonction de la température et de la teneur en eau notamment) ;
- les caractéristiques dimensionnelles de l'élément de béton armé ;
- les conditions de découpage.

#### 4.1.1. Choix des modèles

Comme nous le montrerons plus loin et au contraire de ce qui se passe, par exemple, lors d'un incendie, nous constatons que la zone concernée par les effets du découpage thermique reste de petite dimension. De ce fait, le modèle thermocinétique qui nous a paru

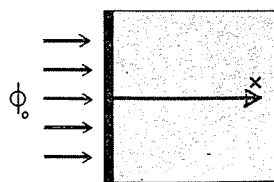
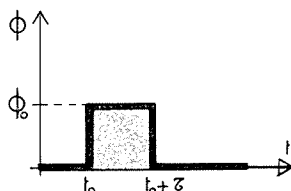


Fig. 7. — Modèles de calculs.



le plus représentatif est, dans la plupart des cas, celui d'un milieu semi-infini soumis, à l'origine des abscisses, à un flux de chaleur imposé durant une période déterminée (fig. 7).

Dans un tel modèle, l'intervalle de temps  $\tau$ , correspondant au temps d'application du flux, est une fonction de la vitesse de progression de la lance thermique ; de l'ordre de quelques secondes, il peut être estimé avec assez de précision.

Par contre, la difficulté principale, au niveau des conditions aux limites du problème, réside dans le choix de la valeur du flux  $\Phi_0$ . En effet, la nature et la quantité des matériaux participant à la combustion permettent de déterminer un flux total dégagé lors de cette combustion.

Au niveau du **bilan énergétique**, on peut dire que ce flux sert à :

- 1) élever la température de la tranche future découpée ;
- 2) assurer le changement d'état physique (phase solide à phase liquide) de cette tranche de matériau ;
- 3) évaporer l'eau incluse dans le béton de la coupe ;
- 4) élever la température du béton de part et d'autre de cette coupe.

En outre, une partie non négligeable de la chaleur produite est dissipée par rayonnement ou est évacuée hors de la coupe, avec le laitier, pendant l'action cinétique.

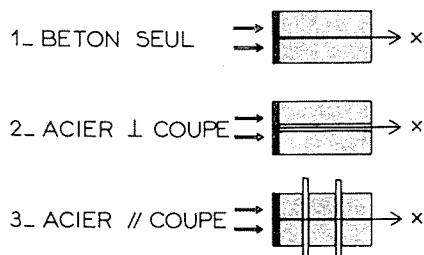
Ainsi, la part réelle  $\Phi_0$  de flux de chaleur conduisant effectivement à l'échauffement du béton n'a-t-elle pu, selon nous, être déterminée qu'expérimentalement pour différents types de coupes.

Par ailleurs, trois cas simples ont été retenus du point de vue de la géométrie et de la constitution de l'élément à découper ; il s'agit de ceux (fig. 7) :

- du béton seul ;
- d'armatures perpendiculaires à la coupe (c'est le cas rencontré lorsqu'on découpe des dalles ou des poutres) ;
- d'armatures parallèles à la coupe (c'est, par exemple, le cas représentatif de découpages verticaux de voiles proches d'un poteau de structures).

#### 4.12. Les résultats

La résolution de l'équation de la conduction de la chaleur en régime transitoire, avec les conditions aux limites que nous venons de voir, nous a donné deux familles de solutions que deux programmes de calcul



sur ordinateur ont permis d'expliciter séparément pour le béton et pour les armatures.

Nous donnons à titre d'exemple, sur le tableau de la figure 8, pour des valeurs données de la conductivité thermique et de la diffusivité du matériau, du flux thermique, et du temps d'application du flux (c'est-à-dire de vitesses de coupe), les températures dans le matériau en fonction du temps et de la distance.

Il est ensuite facile de tirer de tels tableaux des réseaux de courbes température/temps ou température/distances qui vont intéresser l'ingénieur de construction.

## 4.2. Etude expérimentale

Du fait de l'incertitude pesant sur l'évaluation des conditions aux limites de flux, du fait aussi de la difficulté de prendre en compte, outre ceux déjà cités, certains paramètres tels que :

- le changement d'état physique de l'eau dans le milieu poreux qu'est le béton,
- les transferts de masse au sein de ce milieu poreux,
- l'évolution des caractéristiques thermophysiques du matériau en fonction de la température (M. Marchal, par ses études au CEBTP, nous a montré l'importance de ces variations),
- l'évaluation des pertes latérales,

il nous est apparu, dès le début de l'étude, indispensable de conduire une expérimentation systématique des cas les plus courants.

### 4.21. Choix des modèles

Il fallait, là encore, choisir des modèles représentatifs de cas réels, tant du point de vue des propriétés de l'élément de béton armé que du point de vue du processus d'exécution de la coupe (fig. 9).

#### 4.211. Modélisation de la coupe thermique (fig. 9 A)

Trois types de coupes furent retenus : un trou unique (type A1), une « coupe industrielle » caractérisée par le diamètre des trous et l'espacement entre trous (type A2), une coupe délibérément défectueuse à l'extrême, obtenue en augmentant la quantité de chaleur dégagée par forage de trous largement sécants combinés avec une action cinétique très insuffisante, tout ceci conduisant à la conservation du laitier dans la coupe (type A3).



\*\*\* CALCUL DU CHAMP DE TEMPERATURE DANS LE BETON \*\*\*

CONDUCTIVITE =  $.25E-03$  KCAL/MN\*CM\*DEGRE C      DIFFUSIVITE =  $.40$  CM<sup>2</sup>/MN  
 FLUX IMPULSE =  $.10$  KCAL/MN\*CM<sup>2</sup>      DUREE DU FLUX = 80 SECONDES

X (CM)	.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	15.0	20.0	30.0
T = .25 MN	23.7	1.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = .50 MN	61.8	12.3	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = .75 MN	97.0	28.8	1.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 1.00 MN	128.9	47.4	3.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 1.25 MN	158.2	66.7	6.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 1.50 MN	174.0	85.7	11.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 1.75 MN	161.5	97.2	17.7	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 2.00 MN	149.2	100.8	24.0	.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 2.25 MN	139.0	100.9	29.9	.4	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 2.50 MN	130.5	99.5	34.8	.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 2.75 MN	123.5	97.5	38.7	1.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 3.00 MN	117.4	95.3	41.9	1.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 3.25 MN	112.2	93.0	44.4	2.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 3.50 MN	107.6	90.8	46.3	3.4	.1	.0	.0	.0	.0	.0
T = 3.75 MN	103.5	88.6	47.8	4.3	.1	.0	.0	.0	.0	.0
T = 4.00 MN	99.9	86.5	48.9	5.2	.1	.0	.0	.0	.0	.0
T = 4.25 MN	96.6	84.6	49.8	6.2	.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 4.50 MN	93.6	82.7	50.4	7.1	.3	.0	.0	.0	.0	.0
T = 4.75 MN	90.9	80.9	50.9	8.1	.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 5.00 MN	88.4	79.2	51.2	9.1	.5	.0	.0	.0	.0	.0
T = 6.00 MN	80.2	73.4	51.5	12.6	1.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 7.00 MN	73.9	68.6	50.9	15.5	2.2	.1	.0	.0	.0	.0
T = 8.00 MN	68.9	64.6	50.0	17.9	3.3	.3	.0	.0	.0	.0
T = 9.00 MN	64.7	61.2	48.8	19.8	4.4	.5	.0	.0	.0	.0
T = 10.00 MN	61.3	58.3	47.7	21.3	5.6	.9	.1	.0	.0	.0
T = 11.00 MN	58.3	55.7	46.5	22.5	6.7	1.2	.1	.0	.0	.0
T = 12.00 MN	55.8	53.5	45.3	23.4	7.8	1.7	.2	.0	.0	.0
T = 13.00 MN	53.5	51.5	44.3	24.1	8.7	2.1	.3	.0	.0	.0
T = 14.00 MN	51.5	49.7	43.2	24.6	9.6	2.6	.5	.0	.0	.0
T = 15.00 MN	49.7	48.1	42.2	25.0	10.5	3.1	.6	.0	.0	.0
T = 16.00 MN	48.1	46.7	41.3	25.3	11.2	3.6	.8	.0	.0	.0
T = 17.00 MN	46.6	45.3	40.4	25.5	11.9	4.1	1.0	.0	.0	.0
T = 18.00 MN	45.3	44.1	39.6	25.7	12.5	4.5	1.2	.0	.0	.0
T = 19.00 MN	44.1	43.0	38.8	25.8	13.0	5.0	1.5	.0	.0	.0
T = 20.00 MN	42.9	41.9	38.0	25.8	13.5	5.5	1.7	.0	.0	.0
T = 25.00 MN	38.3	37.6	34.8	25.6	15.3	7.5	3.0	.1	.0	.0
T = 30.00 MN	35.0	34.4	32.3	25.0	16.3	9.0	4.2	.3	.0	.0
T = 35.00 MN	32.3	31.9	30.2	24.3	16.9	10.1	5.3	.5	.0	.0
T = 40.00 MN	30.2	29.9	28.5	23.5	17.1	11.0	6.2	.9	.1	.0
T = 45.00 MN	28.5	28.2	27.0	22.8	17.2	11.6	7.0	1.2	.1	.0
T = 50.00 MN	27.0	26.8	25.8	22.1	17.2	12.0	7.6	1.6	.2	.0
T = 55.00 MN	25.7	25.5	24.7	21.5	17.1	12.4	8.2	1.9	.3	.0
T = 60.00 MN	24.6	24.4	23.7	20.9	16.9	12.6	8.6	2.3	.4	.0

Fig. 8. — Exemple de résultats de calcul automatique.

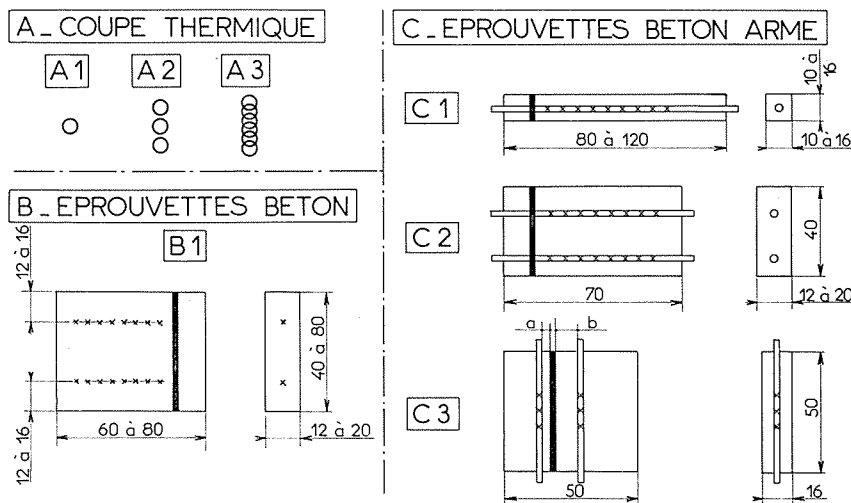


Fig. 9. — Modèles expérimentaux.



4.212. Modélisation de l'élément de structure

De nombreux types d'éprouvettes ont été retenus. En fait, une trentaine de modèles distincts ont été réalisés et découpés. Parmi ceux-ci, on peut citer les cas les plus généraux.

Pour l'étude du béton, il s'agit d'éprouvettes prismatiques aux dimensions variables de type B1 (fig. 9 B).

Pour l'étude du béton armé (fig. 9 C) on distingue :

- a) des éprouvettes longitudinales (de type C1), destinées à reconstituer le modèle de la barre cher au thermicien ; les diamètres des armatures varient de 8 à 25 mm ;
- b) des éprouvettes modélisant le cas de découpage de plaques (type C2) ; elles visent à mettre en évidence l'effet de la dimension transversale ;
- c) des éprouvettes dont les armatures sont orientées parallèlement à la coupe (type C3).

D'autres modèles ont été étudiés mais ils sont, en fait, des combinaisons plus ou moins complexes de ces quatre modèles de base.

4.22. Mesure

La mesure était effectuée par des thermocouples chromel-alumel de 200 à 320  $\mu$  de diamètre.

Dans le béton, les thermocouples étaient maintenus en positions fixes par des peignes ou des plots centrés sur le coffrage et de caractéristiques thermophysiques voisines de celles du béton. Les conducteurs sortaient de l'éprouvette suivant des plans isothermes ; ces précautions étaient indispensables pour ne pas perturber le champ de température et donc la mesure.

Dans les armatures, des trous radiaux de 8/10 mm positionnés longitudinalement avec précision permettaient un logement à cœur du thermocouple ainsi parfaitement localisé.

Compte tenu de l'évolution extrêmement rapide du régime transitoire à observer, les mesures, commandées par une machine programmable, étaient effectuées par une chaîne d'acquisition de données dont les performances (dix mesures par seconde) permettaient de suivre cette évolution. L'ordinateur couplé à la chaîne, restituait directement, à partir des forces électromotrices enregistrées, les élévations de température sur imprimante.

4.23. Résultats

Il ne s'agit pas ici de présenter dans le détail l'ensemble des résultats obtenus dans toutes les configurations adoptées.

Prenons cependant l'exemple d'une éprouvette de béton seul (type B1) soumise à une coupe industrielle de type A2. On obtient le diagramme température/temps pour chaque thermocouple (fig. 10).

On peut en déduire la courbe enveloppe des maxima atteints en fonction de l'éloignement à la coupe.

En procédant ainsi un grand nombre de fois, pour des coupes de types A1, A2 et A3, on a pu définir un domaine enveloppe des températures probables pouvant être atteintes lors de l'opération (fig. 11).

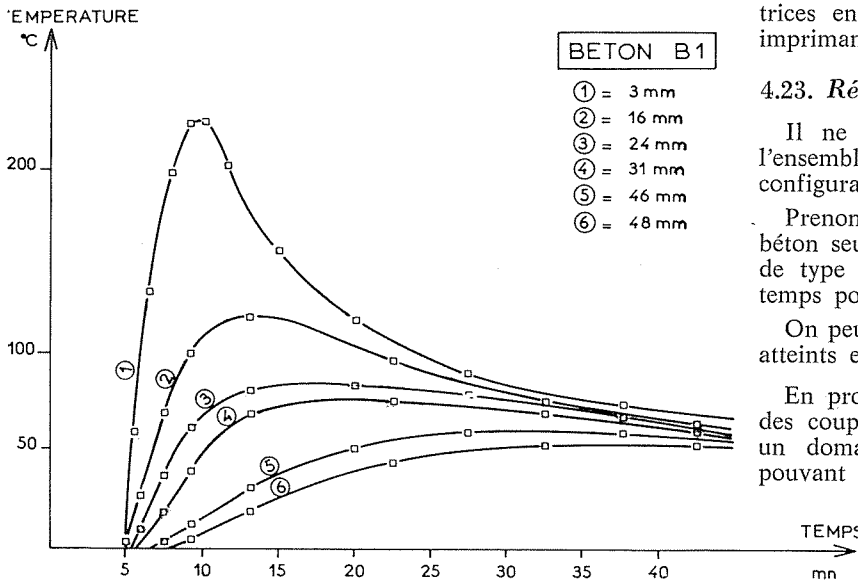


Fig. 10. — Evolution de la température dans le béton (en fonction du temps et de la distance à la coupe).

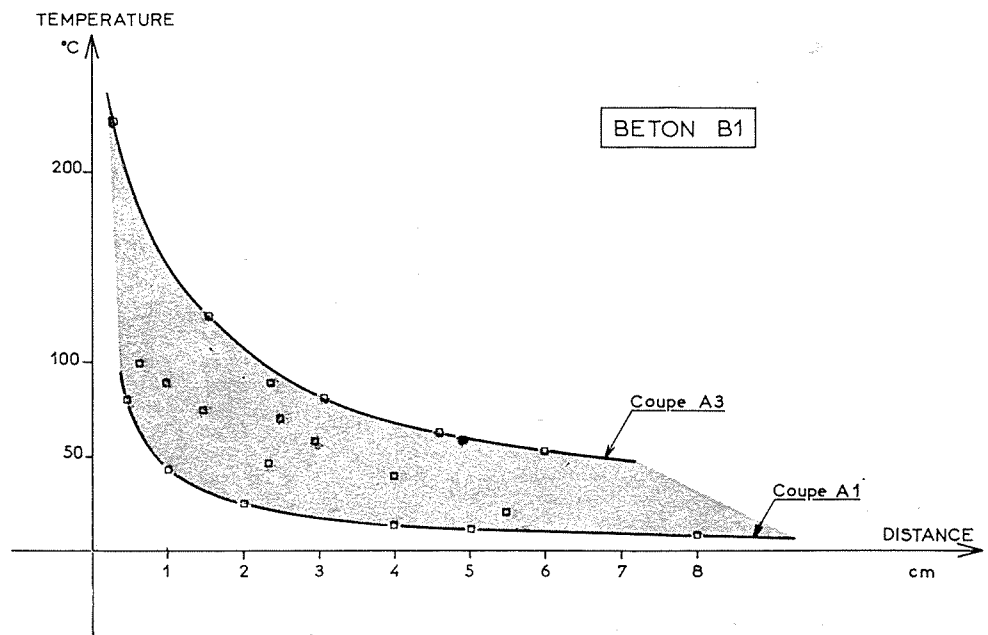


Fig. 11. — Evolution des températures maximales dans le béton en fonction de la nature de la coupe.

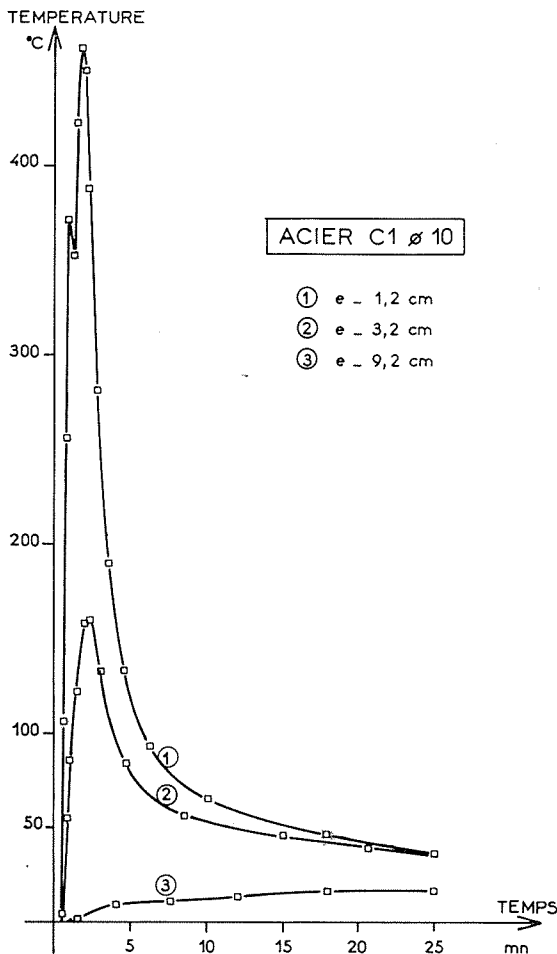


Fig. 12. — Evolution de la température dans une armature de diamètre 10 mm (en fonction du temps et de la distance à la coupe).

De tels réseaux de courbes permettent donc la prévision de l'échauffement du béton. Ainsi, dans le cas d'un découpage s'effectuant dans des conditions normales (c'est-à-dire caractérisé par une ligne moyenne du domaine) on peut annoncer que des élévations de température de 100 °C et de 50 °C seront respectivement constatées à environ 1.5 cm et entre 3.5 et 4 cm de la coupe. Dans des cas particulièrement déli-

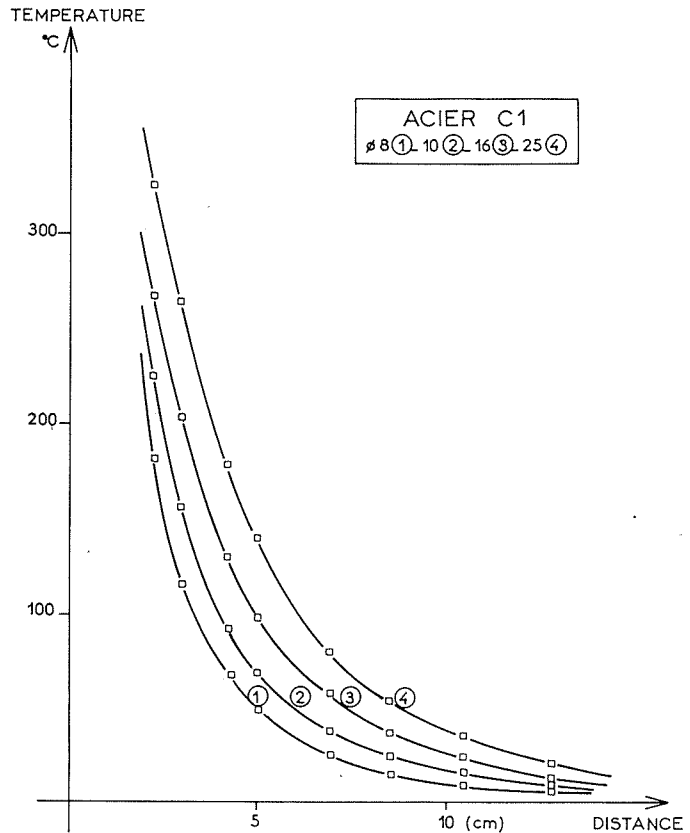


Fig. 13. — Evolution des températures maximales dans les armatures (pour différents diamètres).

cats, il restera donc, à partir de ces valeurs, à l'ingénieur ou au contrôleur de décider de l'opportunité de la coupe envisagée.

Prenons maintenant l'exemple d'une éprouvette armée suivant le modèle C1. On a obtenu, là encore, les réseaux de températures en fonction du temps pour un diamètre d'armature, chaque courbe correspondant à une distance à la coupe (fig. 12).

On en déduit de même les courbes enveloppes des maxima de température atteints dans les armatures de différents diamètres (fig. 13).

Nous reviendrons plus loin, à propos de l'adhérence, sur ces résultats relatifs aux armatures.

### 5. ETUDE EXPERIMENTALE DES PROPRIETES MECANQUES

Le prolongement naturel de l'étude du champ de température dû au découpage thermique devait, selon nous, comporter l'évaluation de la diminution locale des propriétés mécaniques du matériau découpé.

Nous ne rendrons compte ici que d'une partie expérimentale de cette étude.

Notre but était de se donner les moyens d'apprécier l'existence et l'importance des éventuelles modifications de qualité du béton. Parmi les méthodes que nous avons utilisées, nous en présenterons une, dont le principe est de comparer les propriétés mécaniques de deux séries d'éprouvettes de béton, à l'origine identiques en composition et conditions de conservation, dont l'une subissait un découpage thermique et l'autre non.

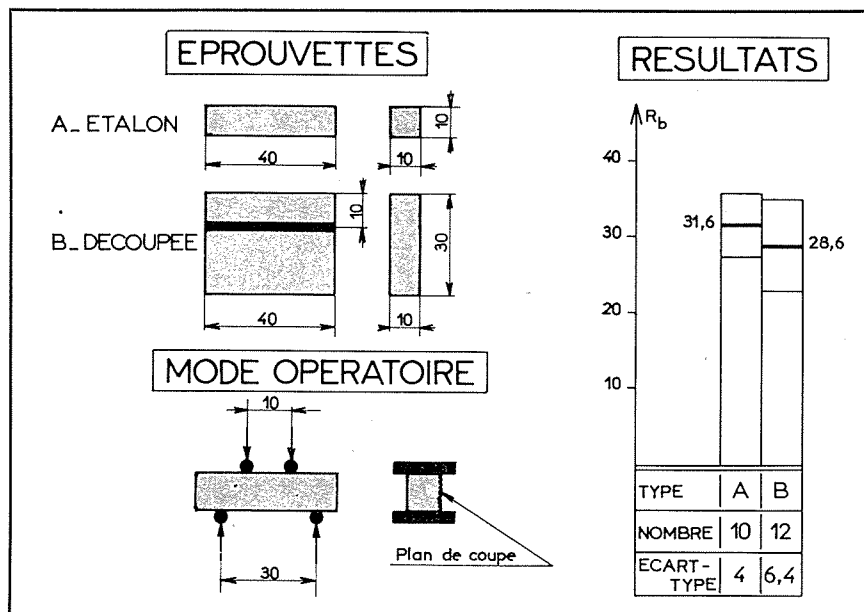
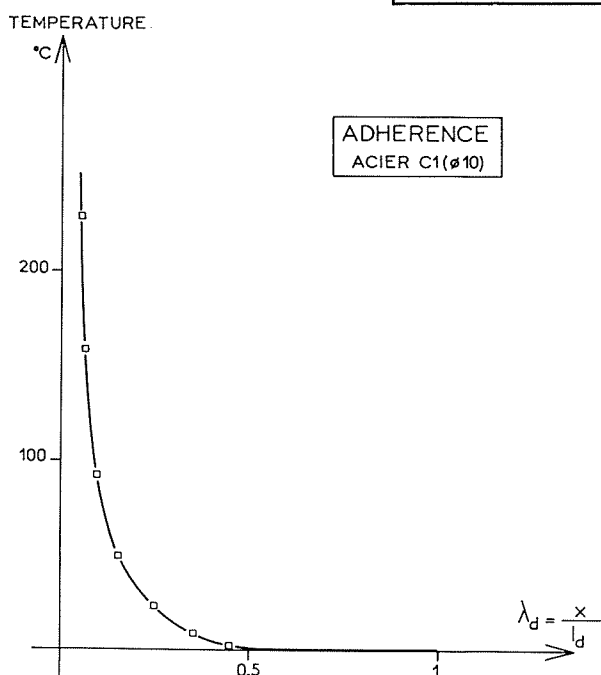
Par ailleurs, nous avons tenu à ce que le critère de comparaison découle d'essais conventionnels dont les processus et les interprétations, à quelques réserves près, sont généralement admis par tous.

#### 5.1. Essais de résistance en traction (par flexion)

On a réalisé ensemble, à partir d'un même béton, deux séries de dix éprouvettes 10 × 10 × 40 cm et douze éprouvettes 10 × 30 × 40 cm.

Ces éprouvettes ont été conservées vingt-huit jours en atmosphère saturée puis quarante-huit heures en atmosphère à 60 % d'humidité ; les éprouvettes de la seconde série ont alors été découpées à la dimension

Fig. 14. — Essai de traction par flexion.


 Fig. 15. — Evolution de la température dans l'acier en fonction du paramètre  $\lambda_d$ .


10 × 10 × 40 et les vingt-deux corps d'épreuve ont été essayés tels qu'on le voit sur la figure 14.

Les résultats font apparaître les valeurs suivantes : les moyennes des résistances en traction du béton des séries A et B sont respectivement de 31,6 daN/cm<sup>2</sup> et 28,6 daN/cm<sup>2</sup> alors que les écarts types sont respectivement de 4 et 6,4 daN/cm<sup>2</sup>.

De tels résultats ne font pas, selon nous, apparaître d'écart important dû aux effets du découpage thermique. Il convient cependant, pensons-nous, de noter la légère différence observée, notamment, dans la dispersion des résultats.

## 5.2. Essais d'adhérence en béton armé

Lorsqu'une armature est découpée, le calculateur en béton armé sait qu'elle ne peut être sollicitée à sa contrainte admissible en satisfaisant les conditions de

non glissement dans le béton, qu'à une distance de la coupe égale à la longueur dite « d'ancrage ou de scellement droit ». Il est donc important de savoir si cette longueur est modifiée et donc si l'adhérence acier-béton est altérée.

Préalablement, examinons l'évolution de la température dans l'acier en fonction d'un paramètre  $\lambda_d$ , rapport entre la distance à la coupe et la longueur de scellement droit :  $\lambda_d = \left(\frac{x}{l_d}\right)$ . On constate (fig. 15) que l'élévation de la température n'est véritablement sensible que pour des valeurs de  $\lambda_d$  inférieures à 1/3 environ.

Pour nous placer dans le cas le plus défavorable, nous nous proposons donc de conduire une étude comparative de l'adhérence pour des barres ancrées dans le béton sur une longueur égale à dix fois le diamètre (en effet  $\frac{10 \text{ } \varnothing}{l_d} \neq \frac{1}{3}$ ).

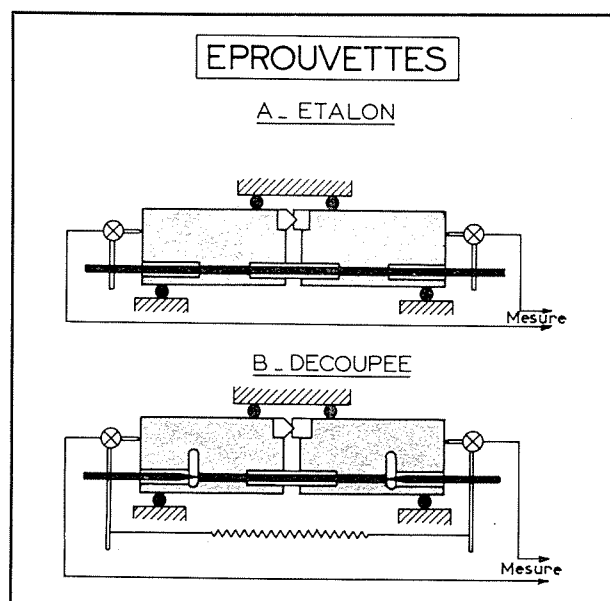


Fig. 16. — Essai d'adhérence acier-béton.

Les modèles et les processus expérimentaux que nous avons adoptés s'inspirent de l'essai « beam-tests » du Comité Européen du Béton. Nous les avons cependant modifiés pour les adapter à notre problème (fig. 16).

Comme dans les essais précédents, nous comparons là aussi une série d'éprouvettes étalon et une série d'éprouvettes subissant un découpage thermique (ce

découpage avait lieu en extrémité de la zone d'ancrage des armatures).

Les résultats obtenus sur une série de dix éprouvettes de type B n'ont fait apparaître aucune différence avec ceux résultant des éprouvettes de type A, aussi bien du point de vue de la **charge de rupture** que de l'**évolution des glissements** pour les charges intermédiaires.

## 6. LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

### 6.1. Préliminaire

Ne voulant pas prétendre à une représentation exhaustive de toutes les applications industrielles du découpage thermique, nous nous sommes simplement efforcés d'analyser les principaux types de problèmes techniques que ce procédé peut aider à résoudre avantagusement.

**Pour chacun d'entre eux, nous examinerons plus particulièrement un exemple qui nous a paru significatif.**

L'origine des applications industrielles les plus fréquentes dans le domaine du bâtiment et des travaux publics réside toujours dans l'importance d'une ou plusieurs conditions liées :

#### 1) à la stabilité de la structure :

Notamment, pour l'essentiel, à des conditions d'équilibre statique pendant les travaux et, pour l'ouvrage futur, à des conditions de résistance de la partie conservée ;

#### 2) à l'environnement et au site :

Ce sont presque toujours, alors, des conditions tendant à limiter les nuisances et, plus particulièrement, le bruit et les vibrations ;

#### 3) aux impératifs chronologiques :

Les conditions de délais sont souvent déterminantes dans le choix des méthodes et des solutions ;

#### 4) à la sécurité du chantier :

En effet, une démolition en gros éléments réduit le nombre de postes de travail et peut donc permet-

tre de les localiser dans des zones parfaitement stables et accessibles, où les fonctions de sécurité seront mieux assumées.

Il en résulte que les grands domaines d'application sont, en fait, les suivants :

- 1) le démantèlement complet d'ouvrages en béton armé ou précontraint, le découpage pouvant d'ailleurs être utilisé seul ou avec d'autres techniques ;
- 2) la destruction d'ouvrages provisoires ;
- 3) la modification des constructions pour des raisons esthétiques, fonctionnelles ou réglementaires (adaptation de locaux à l'évolution des services qu'ils abritent, mise en conformité avec des règles de sécurité incendie, etc.) ;
- 4) la modification des constructions pour des raisons de stabilité (citons le cas de structures soumises à des dénivellations d'appuis accidentelles) ;
- 5) la destruction de parties d'ouvrages sinistrés ;
- 6) quelques cas plus particuliers, tels que l'exécution de travaux sous-marins, le découpage de blocs rocheux, le renforcement d'ouvrages en béton armé.

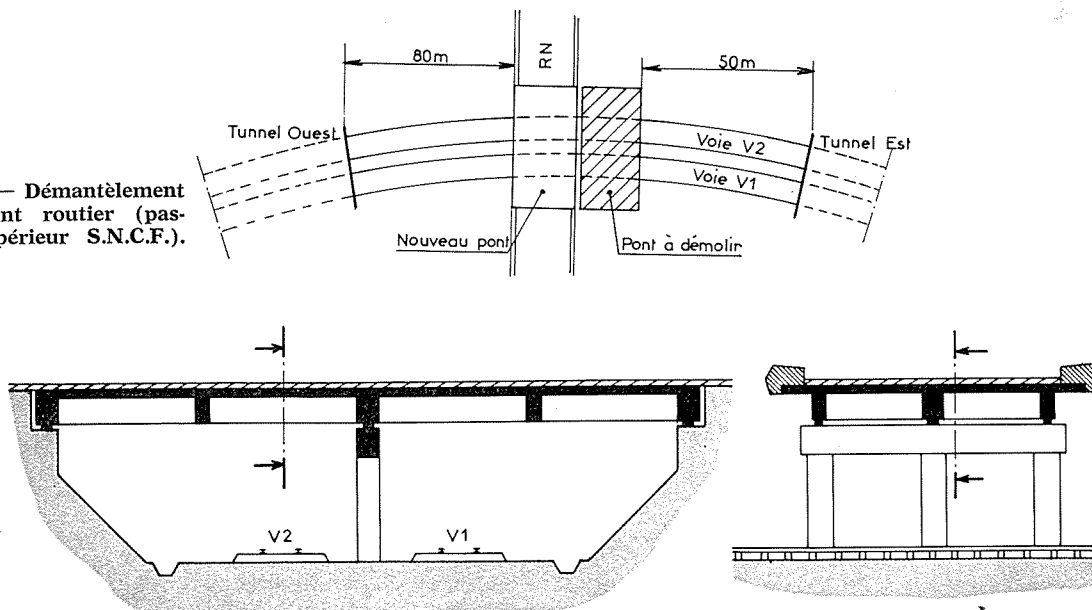
Examinons donc les principaux de ces domaines.

### 6.2. Démantèlements complets d'ouvrages

#### 6.2.1. Travaux publics : démolition d'un pont-route sur voies SNCF

Le pont en béton armé à poutres sous chaussées de deux travées continues représenté sur la figure 17, était insuffisant pour assurer la circulation urbaine ;

Fig. 17. — Démantèlement d'un pont routier (passage supérieur S.N.C.F.).



il a été doublé par un pont dalle en béton précontraint; rendu inutile, il fallait le démolir sans gêner la circulation routière sur le nouvel ouvrage et sans arrêter, ni ralentir la circulation ferroviaire (comportant notamment le passage de trains rapides « type turbotrain ») débouchant, sans visibilité, des deux tunnels adjacents.

Le mode opératoire, strictement contrôlé par les ingénieurs de la SNCF et de la Direction Départementale de l'Équipement, était le suivant :

- 1) boulonnage des dalles et des poutres transversales à des profilés métalliques reposant sur les poutres longitudinales et sur les lignes d'appui du tablier ;
- 2) découpage (au gabarit de transport) des éléments ainsi suspendus ;
- 3) ensuite, découpage des poutres longitudinales et des piliers centraux.

L'ensemble de cette opération a été réalisé en six jours, sans aucun ralentissement du trafic SNCF et dans le plus strict respect des conditions de sécurité. Par ailleurs, à l'appel d'offres, cette solution s'est avérée moins coûteuse que l'exécution par des méthodes plus traditionnelles.

### 6.2.2. Bâtiment : démolition d'un cinéma-théâtre

L'ensemble de la salle (deux balcons et un orchestre) était soutenu par sept portiques en béton armé (hauteur 21 m - portée 16 m) qui subsistaient après démolition par procédé traditionnel du reste du bâtiment. L'ouvrage pris entre deux artères à forte circulation, était mitoyen d'un hôtel et d'un immeuble d'habitation et de bureau (fig. 18).

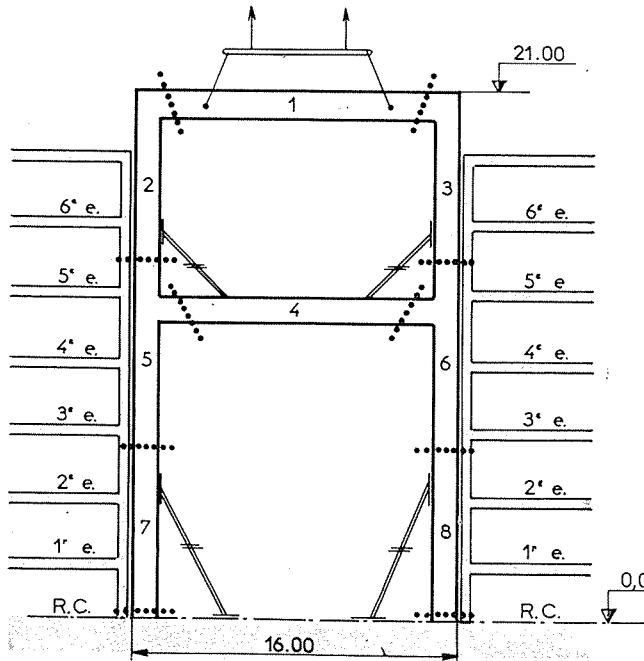


Fig. 18. — Schéma de l'ossature d'un cinéma-théâtre : localisation des coupes.

Après montage de palées de stabilité, le découpage pour la dépose puis la mise au gabarit routier ont été conduits, tel qu'indiqué sur la figure 18, suivant un ordre compatible avec la sécurité du chantier et du voisinage. L'opération a duré sept jours.

### 6.3. Démolition de structures provisoires

L'enlèvement des ouvrages provisoires pose toujours de façon aiguë des problèmes de délais, de coût et quelques fois aussi de nuisances. Il peut en être ainsi, par exemple, de parois moulées rendues partiellement inutilisées et qui se prêtent bien à un découpage thermique silencieux et rapide.

Un autre exemple peut être cité : la suppression du portique de lancement des caissons en béton précontraint (de 2 000 t), destinés à réaliser, pour une ligne de métro, une traversée sous fluviale de la Seine. De 15 m de hauteur et de 20 m de portée, le portique en béton armé était préalablement contreventé afin d'assurer la stabilité durant les phases intermédiaires, puis découpé en trois blocs (fig. 19 à 23).

La poutre supérieure avait une largeur de table de 2,70 m et une hauteur de 2,20 m ; les épaisseurs, au droit des coupes, variaient de 40 à 80 cm. L'ensemble de l'opération fut réalisée, par deux découpeurs, en quatre jours, en toute sécurité.

### 6.4. Modification des constructions pour des raisons fonctionnelles ou esthétiques

**Dans ces cas-là, le maintien en service de l'ouvrage, ainsi que le respect des conditions de vie de l'utilisateur et de la qualité des marchandises ou des matériels stockés, conditionnent toujours largement la méthode d'intervention.**

Ainsi, par exemple, l'agrandissement, par surélévation, d'un central téléphonique en fonctionnement est toujours une opération délicate tant sont sensibles aux vibrations les appareils et les circuits installés. Celle présentée ici l'était plus encore dans la mesure où, préalablement à la construction, il fallait démolir l'étage supérieur du bâtiment comportant déjà cinq niveaux.

La lourde structure à poutres et poteaux en béton armé est représentée sur la figure 24 ; les sections moyennes sont de 80 × 25 cm pour les poutres et 40 × 50 cm pour les poteaux.

Par ailleurs, le central était mitoyen, sur les quatre murs, d'immeubles résidentiels et du Conservatoire national de Musique. Il n'avait pas d'accès direct sur les rues voisines.

L'installation d'une grue étant impossible, tout le béton armé (poutres dalles et poteaux) dut être découpé en huit cents blocs de 300 à 500 kg pour être évacués par palans électriques.

La durée d'intervention, conditionnée surtout par les difficultés d'évacuation, fut de trois mois.

Un autre domaine d'intervention important concerne les locaux commerciaux, les hôtels et plus encore les hôpitaux. Dans tous ces locaux, le bruit constitue, à toute heure, une nuisance inadmissible qui risquerait de faire abandonner, en raison du béton à démolir, bien des projets. Ces opérations sont désormais devenues si courantes qu'il n'apparaît plus nécessaire de les présenter longuement. Nous en citerons une cependant.

Les créations d'ouvertures dans un centre de calcul important ou dans un hall d'accueil d'entreprise commerciale accessible au public sont toujours des

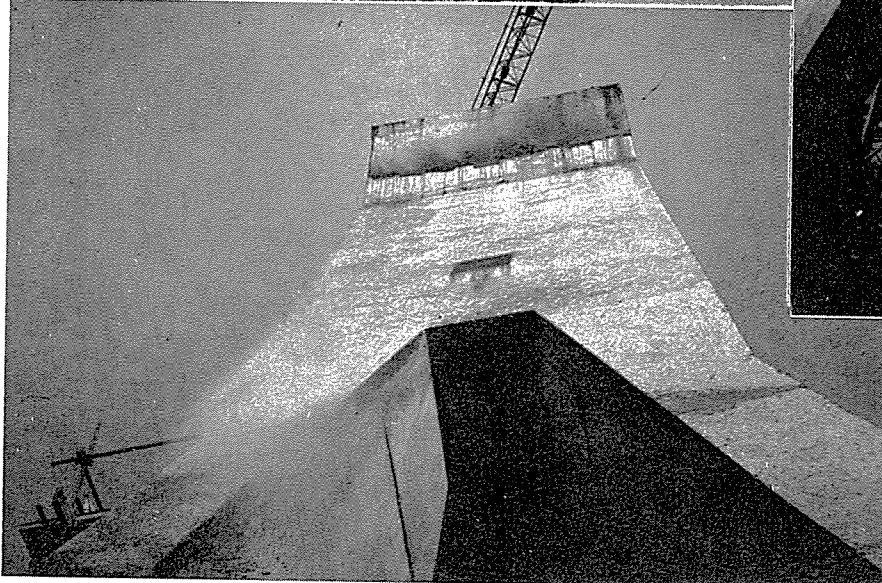
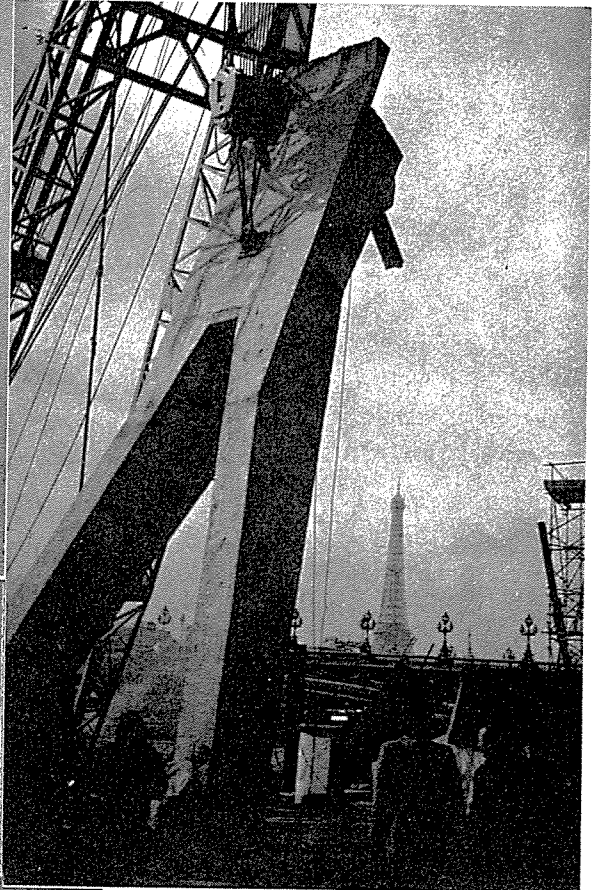
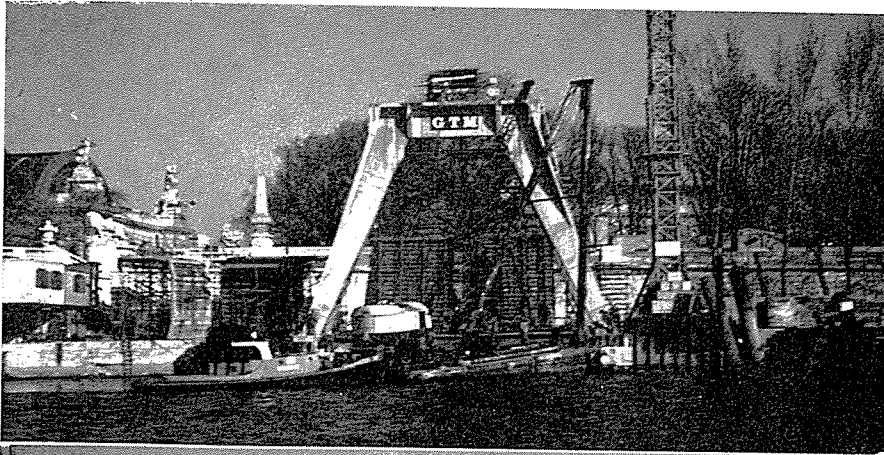


Fig. 19 à 23. — Phases de démolition d'un ouvrage provisoire en béton armé.

*(Clichés Oxybéton)*

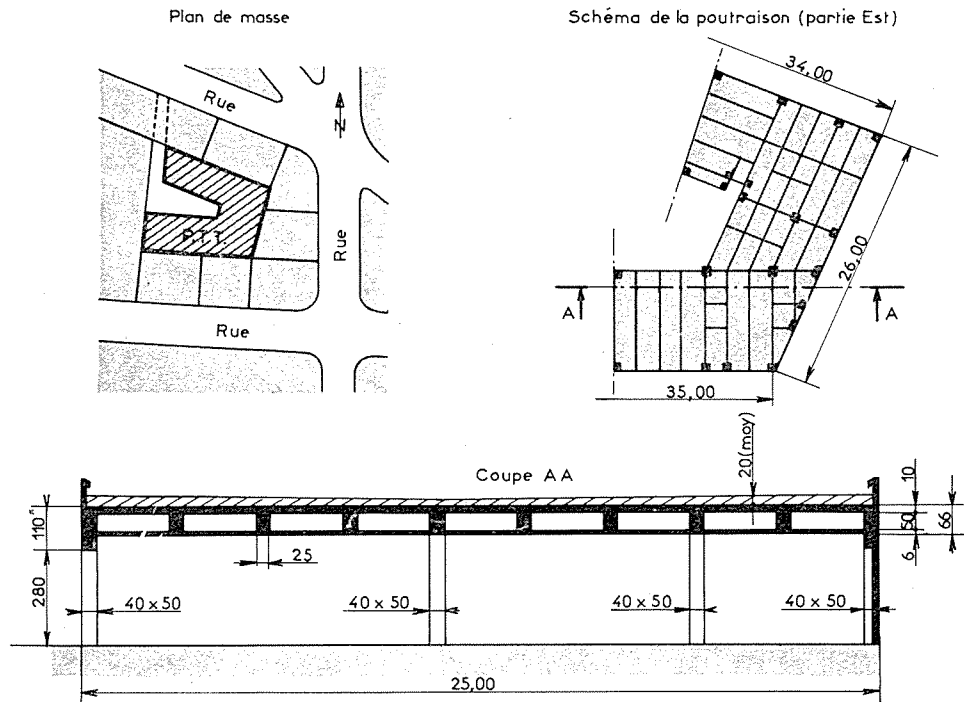


Fig. 24. — Ossature d'un central téléphonique partiellement découpé.

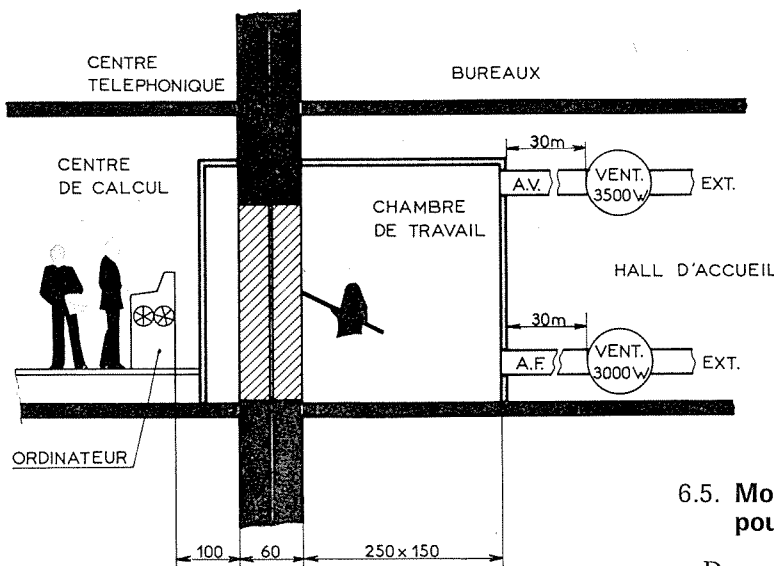


Fig. 25. — Exemple d'intervention délicate !

opérations difficiles. L'intervention sera encore plus délicate si, dans une même opération, il faut faire communiquer ces deux types de locaux et si la paroi de béton armé les séparant fait 60 cm d'épaisseur ! (fig. 25).

Malgré la proximité des ordinateurs (le plus proche était à moins d'un mètre), le découpage a été conduit à partir d'un sas étanche et ignifuge à l'intérieur duquel l'air était fortement renouvelé. Une légère dépression évitait même les fuites éventuelles.

On pourrait conclure sur cette anecdote : les utilisateurs du centre de calcul ont appris la fin de l'opération avec un jour de retard !

### 6.5. Modification des constructions pour des raisons de stabilité

Deux causes, en fait, peuvent être à l'origine de l'application du découpage thermique qui sera alors utilisé pour réaliser des discontinuités dans la structure sous la forme :

- 1) de **joints de dilatation** sur des éléments soumis à des variations de température et difficilement accessibles à un sciage mécanique ;
- 2) de **joints de rupture** dont la mission est, en général, de permettre à la structure de s'adapter (sans accroître ses sollicitations), aux effets d'une dénivellation d'appui due à des tassements différentiels.

Différentes applications ont été conduites par exemple sur des éléments plans reposant sur le sol (gradins de théâtre de plein air) ou sur des ossatures poutres-poteaux dans le but de « réduire » le degré d'hyperstaticité.



Cependant, il convient de remarquer que de telles applications ne peuvent être, selon nous, que très particulières et exceptionnelles. Elles nécessitent bien évidemment la connaissance parfaite du comportement mécanique de la structure avant et après opération et un contrôle très strict de l'exécution.

### 6.6. Destruction des parties d'ouvrages sinistrés

Le dernier domaine d'application que nous examinons ici concerne les ouvrages ayant subi des sinistres.

En effet, le découpage thermique peut se révéler un moyen commode (parce que contrôlable, précis et non générateur de vibrations) pour intervenir sur une structure dont la stabilité a été compromise par un incendie ou une explosion.

Dans ce chapitre, nous aurons tendance à inclure les interventions effectuées lors de la construction d'un ouvrage, soit pour corriger des erreurs d'implantation, soit pour satisfaire un besoin tardivement exprimé par le maître d'ouvrage et entraînant une démolition partielle, soit encore pour détruire rapidement un élément comportant un défaut de fabrication ou ayant subi des dommages au transport.

C'est, en quelque sorte, la « gomme » offerte au chantier et il convient de noter tout de suite que, selon nous, de telles opérations (comme beaucoup d'autres d'ailleurs) ne peuvent être impérativement conduites qu'avec l'accord du bureau de contrôle.

Une énumération des nombreux exemples d'application dans le bâtiment serait fastidieuse et nous nous contenterons de citer ici une brève opération que nous avons encore à l'esprit. Lors de la construction d'un viaduc en béton précontraint, une des cinquante poutres préfabriquées (40 m de portée, 2,20 m de haut ; poids de 100 t), a dû être détruite au moment du lancement. Huit coupes étaient nécessaires. L'opération fut effectuée dans la journée sans que le chantier soit retardé.

Profitons aussi de cet exemple pour dire quelques mots de la **démolition du béton précontraint**.

Dans les systèmes à post-tension, lorsque le câble est tendu, différents cas sont susceptibles de se présenter.

Parmi ceux-ci, citons :

#### 1) Câble non injecté

La coupe des fils étant instantanée, une image grossière du comportement peut être donnée en disant qu'à l'instant de cette coupe, l'énergie poten-

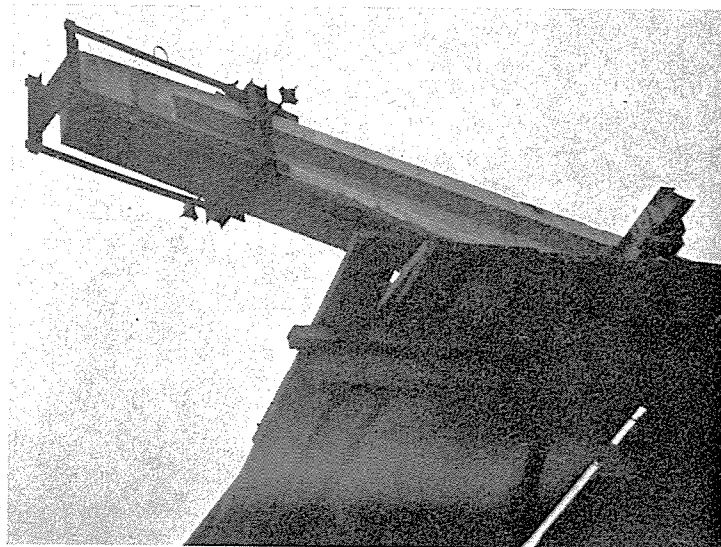


Fig. 26. — Structure en béton précontraint munie d'un blindage destiné à absorber l'énergie cinétique libérée lors du sectionnement des fils de précontrainte.

tielle emmagasinée dans le câble lors de la tension est libérée, aux effets de frottement près, sous forme d'énergie cinétique. Les tronçons externes de câbles constituent alors les flèches d'une puissante arbalète qu'aucun archer de la guerre de Cent Ans n'aurait osé imaginer.

Un blindage très sérieusement dimensionné doit être capable d'absorber cette énergie (fig. 26).

#### 2) Câble injecté

Ce cas est aussi très délicat car, suivant la résistance mécanique de l'injection (elle n'est d'ailleurs pas constante le long du câble), différents types d'effets peuvent se produire allant du phénomène précédent jusqu'à la création d'une nouvelle structure précontrainte si le coulis parvient à réaliser un nouvel ancrage. Ce problème ne devra alors pas être ignoré par les techniciens chargés du levage et du transport vers la décharge.

L'observation de plus de deux mille coupes effectuées, ces dernières années, sur des câbles de précontrainte de différents types, nous conduit d'ailleurs à mettre en garde, avec la plus grande rigueur, ceux qui ont à traiter ce genre d'ouvrages lors d'opérations de démolition.

## 7. CONCLUSION

Pour conclure, nous reviendrons sur notre conception de la démolition pour dire combien il nous paraît nécessaire que se développent encore les méthodes nouvelles.

Pendant longtemps, dans ce domaine, d'ailleurs à juste titre, on a pu se satisfaire d'un certain empirisme... Cela est désormais devenu insuffisant.

**En effet, les évolutions successives de la construction, à travers ces trois domaines que sont la maçonnerie, le béton armé et le béton précontraint, sont autant d'orientations conduisant à des comportements des structures, selon nous, fondamentalement différents lors de leur démolition.**

**Utiliser directement dans un de ces domaines les « règles de l'art » consciencieusement établies et admises pour l'un des deux autres, peut avoir des conséquences graves.**

La construction s'est depuis longtemps rationalisée ; il faut que la démolition suive, à la même vitesse, le même chemin.

Nous croyons que c'est à ce prix que nous achèterons la sécurité du chantier et la sécurité de son voisinage.

Au-delà de ce problème important, si l'on veut que l'homme garde la maîtrise des facteurs qui condition-

ment la qualité de sa propre vie et la richesse de l'héritage qu'il transmettra aux générations futures, il nous paraît nécessaire que, face au développement considé-

rable de l'urbanisme, il se donne les moyens d'intercepter, de modifier, voire de détruire, ce qui, au plus profond de son être, ne le satisfait plus.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre gratitude à M. Erbil Östekin, ingénieur INSA, docteur-assistant à l'Université Technique de la Mer Noire (Trabzon, Turquie) qui a contribué au développement de ces travaux.

A l'issue de l'exposé de M. Y. Malier, un film, réalisé par M. G. Dreux a été projeté, rappelant le principe du procédé de découpage thermique Oxybéton et montrant son application à une opération de démolition-construction de la couverture en béton précontraint d'un entrepôt d'expédition de 11 000 m<sup>2</sup> effectuée sans aucune interruption de service.

## DISCUSSION

**M. le PRESIDENT.** — Je pense qu'après cet intéressant exposé un certain nombre d'auditeurs doivent vouloir poser quelques questions à M. Malier.

**M. VALLANTIN.** — Quel est le diamètre minimal du trou que vous pouvez faire et l'ordre de grandeur de la précision à laquelle vous arrivez, pour fixer des pièces par boulonnages à travers des voiles en béton armé.

**M. MALIER.** — De façon industrielle, le travail est généralement effectué avec des lances qui ont des dimensions telles qu'il n'est pas aisé, au moins sur une profondeur dépassant 30 cm. de descendre en dessous d'un diamètre de 3 cm à 3,5 cm, le diamètre normal étant de 4 cm.

Parlons maintenant de la qualité de ce forage et notamment de la rigueur géométrique du cylindre d'une part et de la précision en position et orientation d'autre part.

En ce qui concerne la précision géométrique, on ne peut prétendre dépasser, dans le meilleur des cas, 3 à 5 mm de tolérance sur le diamètre avec, en plus, un léger épanouissement conique du forage à l'amorçage initial en extrémité de paroi.

La précision en position et orientation dépend essentiellement du soin apporté par l'opérateur appliquant sur l'élément une lance pouvant mesurer jusqu'à 3 m de long. Cependant, pour des travaux particuliers, on peut utiliser des guides lances (en position et orientation)... tout comme on peut utiliser des lances de petits diamètres (jusqu'à 6 mm) pour des forages de faible dimension.

Il convient cependant de noter que pour les applications dans l'industrie du bâtiment, la précision qui nous est généralement demandée n'excède pas le centimètre. Par ailleurs, bien qu'il se révèle moins coûteux et plus rapide, il n'est, selon nous, pas question d'affirmer que le

découpage thermique est capable, sur le plan de la précision, de concurrencer les procédés de carottages par couronnes diamantées. Celui qui le prétendrait aurait tort assurément.

**M. MERLIN-CHALUMEAU.** — D'après les photos, il faut beaucoup de place autour de la structure qu'on veut découper. Dans les cas où on n'a par exemple que 50 cm de passage, est-ce que vous avez un système ?

**M. MALIER.** — On peut travailler avec de petites lances, très courtes. Les diapositives présentées montrent des lances de 3 m environ, parce qu'elles correspondent à un bon compromis économique tout en présentant le minimum de contraintes pour l'opérateur.

N'oublions pas cependant que les lances brûlent à la vitesse de 1 m par minute environ. On voit donc les contraintes qui résultent de l'utilisation de lances très courtes. Cependant, cela se pratique dans des cas bien particuliers.

**M. MERLIN-CHALUMEAU.** — Vous pourriez peut-être avoir un système, comme pour le soudage automatique : un fil qui s'enroule sur un tambour que vous pourriez passer dans 50 cm.

**M. MALIER.** — Nous l'avons envisagé et expérimenté pour d'autres applications n'appartenant pas à l'industrie du bâtiment ; cependant, il faut bien voir que toute automatisation entraîne obligatoirement une grande technicité et une complication du procédé. Il perd alors les avantages primordiaux que nous avons indiqués, à savoir sa légèreté, sa mobilité et sa simplicité. Alors, il n'est plus forcément compatible avec les conditions du chantier : en quelque sorte, l'outil simple se transforme en « machine-outil », certes de meilleur rendement, mais qui doit travailler en poste quasi-fixe. Ces conditions de

travail correspondant bien à la construction mécanique, mais encore peu au secteur du bâtiment. Cependant, soyez assuré que votre question est pleine d'intérêt, et que nous ne renonçons pas à établir de meilleurs compromis.

**M. CANS.** — Jusqu'à présent, l'aspect financier de la technique n'a pas encore été soulevé. Avez-vous une estimation sommaire d'un projet ? Il faut se baser sur la découpe ou sur la profondeur ?

**M. MALIER.** — Le critère économique ne peut évidemment être oublié. On peut affirmer qu'il existe des relations très précises (et que nous cernons bien) entre la section de la coupe et les facteurs dont va découler le prix, à savoir les consommations en lances thermiques et oxygène d'une part, et le temps de travail d'autre part. Il en résulte que le coût et le délai (sur une opération moyenne ou grande) peuvent être établis avec une très grande précision ; sur une opération industrialisée, la précision approche 1 %.

Cependant, le prix unitaire s'affectant à des surfaces de coupes, et non comme en démolition traditionnelle à des volumes de matériaux, le coût global de l'opération de découpage-démontage est tributaire du choix et de l'utilisation des engins de levage, ce qui nécessite évidemment une étude préalable aussi rationnelle que peut l'être celle d'une opération de construction. Ainsi, parmi les exemples que nous avons présentés au cours de notre exposé, on peut en citer un certain nombre pour lesquels les conditions particulières du projet (nuisances, etc.) n'étaient pas primordiales et l'appel d'offres n'imposait d'ailleurs pas cette technique. C'est donc le prix qui fut finalement le facteur déterminant. On ne soulignera jamais assez, à ce propos, la nécessité pour un chantier de démolition d'ouvrages en béton d'un véritable travail de « bureau de méthodes » regroupant les opérations de découpage, levage et évacuation et les englobant éventuellement dans l'ensemble de l'opération de démolition-reconstruction. Il demeure cependant que beaucoup d'idées fausses sont encore lancées concernant le coût réel de telles opérations.

**M. DUFFAUT.** — Le procédé est-il applicable au découpage des roches ?

**M. MALIER.** — C'est une application qui nous est souvenant proposée. Nous devons dire cependant que notre expérience reste encore insuffisante dans ce domaine. On peut toutefois affirmer, bien sûr, que certaines roches sont moins aptes que d'autres au découpage pour des raisons évidentes ; il en est ainsi, par exemple, des roches calcaires.

Par contre, on peut citer de nombreuses expériences de destruction de massifs rocheux où l'utilisation du découpage thermique est associée à celle de l'éclateur hydraulique et de l'explosif. Cette méthode est aussi utilisée pour démolir partiellement ou totalement de gros massifs en béton. On pourrait citer la destruction de structures comportant des voiles de 2 à 3 m d'épaisseur ; mais ce sont là, tout de même, des ouvrages assez particuliers.

**M. DESCARPENTRIES.** — Je voudrais savoir si cette méthode est applicable aux travaux sous-marins ?

**M. MALIER.** — Oui, avec une certaine prudence cependant. La lance thermique brûle très bien dans l'eau, et c'est d'ailleurs assez spectaculaire. Les réalisations sont relativement nombreuses déjà. Il faut tout de même être très prudent, pour des raisons qui apparaîtront évidentes aux chimistes, au-delà de 10 à 12 m de profondeur. On peut ainsi découper blindages, bateaux, blocs de roches ou de béton, etc.

**M. le PRESIDENT.** — Quelles sont les précautions qu'il convient de prendre sur le plan de la sécurité dans l'emploi de la lance thermique ? Je ne parle pas des mauvais usages que l'on peut en faire à l'occasion.

**M. MALIER.** — Comme dans toute activité industrielle, la sécurité doit être une préoccupation essentielle. Dans

notre cas, elle doit impérativement commander de concentrer nos efforts dans deux directions principales :

1) **La protection des opérateurs** : elle doit être absolue contre les projections d'étincelles qui sont sensibles dans le voisinage immédiat de la coupe (1 à 2 m). L'opérateur, comme nous l'avons vu, est totalement protégé par une combinaison intégrale ignifuge qui lui confère, certes, une allure quelque peu lunaire, mais lui assure ainsi toute sécurité.

2) **Le contrôle du découpage** : c'est un aspect, à notre sens, très important. Donnons quelques chiffres : un opérateur coupe, sans bruit, en une heure, un poteau de 60 cm × 50 cm de section ; dans une journée, il coupera, par exemple, trente poutres de 40 cm × 15 cm de section. Ces deux chiffres suffisent à souligner l'efficacité du procédé. Il en résulte la nécessité d'un contrôle très stricte de l'utilisation de la lance thermique qui, de ce fait, selon nous, ne peut être employée qu'avec une parfaite connaissance de la structure et en collaboration très étroite avec le Bureau de calcul et le **Bureau de contrôle**. Nous sommes quelquefois heurtés par la position de certains, qui voient dans ce procédé l'outil idéal qui permettrait enfin aux différents corps d'états du bâtiment d'installer rapidement leurs canalisations sans réservations préalables !

Monsieur le Président, je ne sais pas si j'ai répondu à la question posée... peut-être ai-je débordé un peu, mais j'avoue être très sensibilisé par d'éventuelles utilisations malheureuses qui pourraient être faites de ce procédé, dans les ouvrages.

**M. le PRESIDENT.** — Que pensez-vous du problème des fumées ?

**M. MALIER.** — C'est effectivement un problème important, particulièrement pour des éléments de béton jeune ou exposé aux intempéries.

Ces fumées résultent essentiellement de la présence d'eau dans le béton. La vapeur qui en découle peut alors s'évacuer seule (fumées blanches) ou, sous l'action de la pression, se charger de particules d'oxydes de fer (fumées légèrement brunes) qui vont retomber à quelques mètres. Dans des cas particuliers, on peut rencontrer d'autres composés, plus gênants (exemple d'une terrasse avec produits d'étanchéité). Il convient donc de ne pas nier ou ignorer ces fumées, puisqu'elles existeront toujours du fait de l'eau incluse dans le béton.

Au contraire, chaque fois qu'elles seront préoccupantes, il est clair qu'il faut, comme nous l'avons vu sur l'exemple du centre de calcul tout à l'heure, les maîtriser et les évacuer ; avec un peu de réflexion, c'est un problème facile à résoudre dans la plupart des cas.

**M. MERLIN.** — Quelle est la formation technique de vos ouvriers ?

**M. MALIER.** — Il n'existe évidemment pas d'école qui conduise au métier de découpeur de béton. En règle générale, leur spécialité d'origine est le gros-œuvre ou le soudage.

Cependant, les qualités sont très différentes : ce travail ne nécessite pas d'efforts physiques très importants mais, par contre, et ce serait à lui seul un beau sujet de discussion, il est incontestable que les candidats-opérateurs ont tous une attirance quasi-physique vers le feu ; on retrouve là des comportements analogues, sans doute, à ceux d'autres métiers (peut-être les sapeurs-pompiers, par exemple).

L'apprentissage proprement dit se fait en quelques mois.

Par ailleurs, il est indispensable que les opérateurs aient une parfaite conscience de l'efficacité de leur instrument et ne l'utilisent, sur le chantier, que dans le cadre qui leur a été défini.

**M. J.-P. COURTOT.** — Je sors un peu du domaine du béton, je voudrais savoir ce que donne la lance thermique dans le découpage à travers la brique réfractaire ?

**M. MALIER.** — Nous n'avons pas suffisamment d'expérience dans ce domaine. On peut cependant citer des réalisations particulières effectuées pour le compte de la Société Citroën (on s'éloigne cependant beaucoup de l'industrie du bâtiment).

Il nous arrive régulièrement de nettoyer, en quelque sorte, les fours de coulée continue d'aluminium à la lance thermique. Il s'agit en fait de les débarrasser de composés à base d'alumine qui les obstruent partiellement très rapidement (corindon). La composition du matériau a pu être connue avec précision par analyse chimique d'une part, et par analyse diffractométrique et par fluorescence X d'autre part. Cela a permis de déterminer les fondants à associer à la lance thermique. Ce procédé a permis ainsi de réaliser aisément les opérations de nettoyage. C'est alors que l'on a pu constater, accidentellement, que si l'action était poursuivie vers le réfractaire elle le détruisait. Des essais d'autres natures, mais que nous ne sommes pas autorisés à citer, ont montré, en quelque sorte, l'aptitude de la lance thermique à découper de tels matériaux.

Vous soulevez d'ailleurs un problème qui nous préoccupe beaucoup, à savoir trouver un matériau (de fabrication industrielle accessible) qui résiste à l'action de la lance thermique; de nombreux problèmes de protection s'en trouveraient ainsi résolus avantageusement. Par exemple, il arrive souvent que des interventions, notamment sur des ouvrages en service, nécessitent le découpage thermique avec arrêt strict à une cote déterminée (canalisation H. P. par exemple); il serait heureux alors de posséder un tel bouclier.

**M. C. BLOCH.** — Au niveau des bruits, vous dites « sans aucun bruit »; peut-on suivre une conversation à 2 m de votre lance ?

**M. MALIER.** — Oui, absolument; le seul bruit provient de l'écoulement de l'oxygène dans la lance que l'on peut assimiler à celui d'un tuyau d'arrosage de pelouse (à petit débit).

**M. C. BLOCH.** — On a réalisé des travaux de découpage à côté de mon bureau; le bruit était, à mon avis, assez notable.

**M. MALIER.** — Est-ce que le bruit provenait du découpage thermique ou d'autres causes ?

**M. C. BLOCH.** — J'avais noté un sifflement.

**M. MALIER.** — Vous m'étonnez. Ce bruit provenait peut-être de ventilateurs... peut-être aussi un autre procédé (le décapage thermique) était-il utilisé ?

**M. C. BLOCH.** — C'est une solution envisagée pour reprendre une façade de centre de tri et les postiers tiennent beaucoup à leur tranquillité pendant le chantier.

**M. MALIER.** — Les réalisations, pour cette administration, sont déjà nombreuses, tout comme le sont celles dans les standards téléphoniques, les centres de calculs et les hôpitaux.

**M. FAWAZ.** — Le découpage thermique dans les sites sinistrés, dans des structures ayant subi des explosions, peut-il être considéré comme la méthode la plus économique ou bien peut-on envisager autre chose.

**M. MALIER.** — On l'utilise effectivement. Remarquons cependant que le problème du bilan économique (je ne sais si on peut le dire en termes aussi brutaux) ne peut être évoqué sans y associer la notion fondamentale de sécurité du chantier, notion encore plus difficile à cerner sur un ouvrage sinistré.

Ce problème, dans une certaine mesure, rejoint un peu celui de la démolition d'ouvrages en béton précontraint alors que la résistance mécanique de l'injection n'est pas connue.

Il faut alors, selon nous, établir à partir des hypothèses que l'on peut formuler, tous les schémas mécaniques et les comportements susceptibles de se produire; ensuite, prévoir en fonction des conditions de stabilité, les familles de coupes nécessaires au démontage de chacun de ces schémas; enfin, dans l'ignorance du schéma réel, exécuter **systématiquement** toutes les coupes correspondant à tous les cas. C'est ce que nous appelons la « méthode encadrante ». C'est celle qui nous a permis de découper plus de deux mille câbles de précontraintes sans aucun incident et en toute sécurité. Aussi, vous comprendrez que j'hésite beaucoup à parler de bilan économique sans y attacher cette notion de **sécurité absolue** dans des ouvrages aussi particuliers que ceux que vous citez.

**M. JUILLARD.** — Comment contrôle-t-on l'avance de la lance, c'est-à-dire sa pénétration ?

**M. MALIER.** — C'est l'action cinétique qui fait avancer la lance; il reste à l'opérateur à contrôler cette avance en position et direction.

**M. JUILLARD.** — Nous avons un problème, à la SNCF, pour démolir des ponts à hourdis nervurés au-dessus de lignes dont les catenaires sont très proches de l'ouvrage.

**M. MALIER.** — On peut citer une réalisation analogue: franchissement de voies SNCF par un pont autoroutier. Il est nécessaire d'établir un bouclier thermique sur la catenaire pour la protéger des étincelles. C'est un problème certes délicat, mais dont la solution a déjà donné satisfaction.

**M. DONNADIEU.** — Peut-on contrôler la profondeur du trou lors de son usinage ?

**M. MALIER.** — Vous avez trouvé le point délicat, Monsieur l'Inspecteur général; non, on ne le peut avec précision. Si la nature du béton est connue, on peut cependant en avoir un ordre de grandeur connaissant le rapport entre l'avance de la lance thermique et la longueur de lance brûlée (il varie entre 1/3 et 1/5).

Ainsi, si l'on veut produire un trou de 20 cm, il peut donc être nécessaire, par exemple, de brûler 80 cm de lance; toutes choses restant égales par ailleurs, on aura sans doute un trou de 20 cm  $\pm$  3 cm. Nous ne pouvons affirmer mieux.

C'est un problème que nous avons rencontré récemment sur un chantier de centrale nucléaire et qui reste très délicat.

**M. le PRÉSIDENT.** — Puisqu'il n'y a plus de questions nous allons clore le débat et remercier M. Y. Malier de son très intéressant exposé.