

Etude d'une bèle d'un poids minimum et de résistance maximum (1)

C. LENTACKER,

Ingénieur-Conseil.

1. Conditions à remplir par la bèle.

Une bèle efficace doit, d'une part, réaliser la sécurité du chantier, d'autre part, contrôler efficacement les mouvements du toit.

En ce qui concerne la sécurité, la bèle doit être suffisamment résistante pour subir les efforts qui agissent sur elle, sans que le taux de travail approche la charge de rupture.

Pour que le contrôle des mouvements du toit soit efficace, il faut que la bèle soit rigide et ne subisse que de faibles déformations, même sous l'action des contraintes maximums. Ceci est particulièrement important quand plusieurs bèles sont accrochées en porte-à-faux.

Cette double condition de résistance et de rigidité amène la mise en œuvre de sections renforcées et de quantités importantes de matière.

Le désir légitime de créer un matériel toujours plus léger et plus maniable risque de mener dans la voie d'un allègement excessif. Il arrive que des bèles travaillent au delà de la limite d'élasticité. On a même prévu la possibilité de les redresser, après déformation, et cela à plusieurs reprises.

Et pourtant, la limite élastique n'est souvent guère éloignée de celle de la rupture. D'autre part, quelle tenue du toit peut-on demander à une bèle qui se déforme, qui manque de la raideur voulue pour s'opposer à l'affaissement du toit ?

Les bèles qui, dans les conditions normales, subissent des déformations permanentes, ne répondent donc pas au double rôle de sécurité et d'efficacité que l'on attend d'elles.

Si les conditions légèreté et maniabilité ne peuvent être négligées, elles doivent être subordonnées à la solidité et à la rigidité dont le degré devrait être imposé et contrôlé.

La présente étude montre qu'il est possible de satisfaire dans des limites acceptables à l'ensemble de ces conditions.

2. Choix d'un critère de résistance.

Nous étudions dans ce qui suit une bèle de 80 cm supportée par un seul étauçon au tiers de sa longueur (côté remblais).

La charge appliquée à la tête de l'étauçon est connue : elle est égale à la force portante du type d'étauçon considéré. Son point d'application est bien déterminé. Il importe de donner à la bèle une résistance en rapport avec celle de l'étauçon avec lequel elle est destinée à être utilisée. Ces deux pièces forment un ensemble, elles ne peuvent être traitées séparément.

Si la charge de l'étauçon s'applique en un point unique, les réactions du toit, par contre, peuvent se manifester d'une infinité de manières. Leur intensité et leur répartition dépendent de la façon dont le contact s'établit entre bèle et toit.

Une roche dure, peu fragmentée, à surface inégale, peut n'avoir que deux points de contact avec la bèle. Une roche plastique, au contraire, peut reposer sur toute la longueur de la pièce et y exercer des efforts répartis d'une manière continue.

Le contact entre la roche et la bèle peut d'ailleurs se modifier pendant le coulissement de l'étauçon et le tassement des roches. Enfin, il est possible de modifier intentionnellement ce contact en intercalant des morceaux de bois, entre la bèle et le toit.

Pour établir une base de calcul, il faut faire un choix parmi l'infinité de sollicitations possibles entre la charge continue et l'appui en deux points seulement.

La conduite de la présente étude aurait été plus aisée si elle était partie de bases indiscutables définies par une norme, fixant une sollicitation critère à appliquer à la bèle et un degré de résistance à respecter. Le problème aurait alors été réduit à la recherche de la meilleure forme, au choix de la matière la plus convenable permettant d'arriver à la construction la plus légère, la plus maniable.

L'existence de pareilles normes nous est inconnue, aussi bien en Belgique qu'à l'étranger. Il faut donc bien nous fixer certaines conditions. Dans le cadre de ces conditions, notre étude visera l'allègement maximum de la pièce. Nous procéderons à

(1) Les conclusions de cette étude ont été appliquées dans la construction de la nouvelle bèle AIGLE, dont la description et les caractéristiques se trouvent dans la rubrique « Matériel Minier » de la même livraison des « Annales des Mines ».

l'examen de divers modes et de divers procédés de construction. Pour chaque cas, la considération du poids nécessaire à la réalisation de la pièce permettra d'énoncer un jugement.

Si les conditions que nous proposons ci-dessous s'avéraient, soit trop faibles, soit trop sévères, ce travail serait aisément repris sur de nouvelles bases. Il n'aura pas été inutile.

Comme critère, nous admettons le cas de sollicitation le plus sévère : celui où la charge est appliquée aux deux extrémités de la bête.

Pour des raisons de possibilité de réalisation, nous placerons les réactions du toit à 6 cm des extrémités de la bête de 80 cm de longueur.

Comme il s'agit de préserver des vies humaines et comme, dans les mines, des mises en charges brusques sont à considérer, nous limiterons les tensions aux $2/3$ de la limite d'élasticité apparente. Pour introduire automatiquement ce coefficient de sécurité, nous tablons sur une force portante de l'étauçon de 60 t, au lieu des 40 t que développent normalement les étauçons modernes.

Dans ces conditions, les bras de levier correspondant aux deux points d'application ont respectivement 47,5 et 20,5 cm de longueur, les deux réactions atteignent 18,2 t et 41,8 t et le moment fléchissant au point d'appui sur l'étauçon vaut 860.000 kg/cm.

3. Etude de différentes constructions de bêtes.

a) Laminé I, en acier doux de construction.

Admettons pour l'acier doux une limite d'élasticité de 2500 kg/cm².

Le module de flexion I/v doit atteindre $M/\sigma =$

$$\frac{860.000}{2.500} = 344 \text{ cm}^3$$

Il faut recourir au type normal de 24 cm de hauteur et 10,6 cm de largeur.

La bête, démunie de ses articulations, pèse 29 kg. La flèche, à l'extrémité la plus éloignée, atteint 0,83 mm.

b) Laminé I en acier tenace.

On s'oriente, en Angleterre, comme en Allemagne, vers les aciers à haute résistance pour obtenir un matériel plus léger. Journallement, la gamme des aciers tenaces s'étend. Ceux-ci ne permettent cependant qu'une solution partielle du problème.

Si nous admettons une limite d'élasticité de 6.000 kg/cm², nous pouvons nous contenter d'un

$$\text{module de flexion de } \frac{860.000}{6.000} = 143 \text{ cm}^3.$$

Le profil n'a plus que 18 cm de hauteur et 8,2 cm de largeur, mais le moment d'inertie est réduit à 1444 cm⁴ au lieu de 4239 cm⁴, de sorte que la

$$\text{flèche devient } 0,83 \times \frac{4239}{1444} = 2,5 \text{ mm.}$$

La bête ne pèse plus que 17,5 kg.

On obtient donc avec les aciers tenaces un allègement considérable, mais on perd en rigidité ce que l'on gagne en solidité.

Il va de soi que les profils examinés ci-dessus ne peuvent convenir. Leur hauteur est beaucoup trop grande. On est donc forcé d'envisager la création de profils plus compliqués.

c) Poutre prismatique soudée ou moulée.

C'est la solution couramment employée pour la construction des bêtes modernes.

Elle permet un modelage plus adéquat de la section de la pièce pour répondre à sa sollicitation. Outre qu'elle offre l'avantage de pouvoir créer une section à plus grand moment d'inertie pour une hauteur imposée, elle permet encore de renforcer les âmes pour pouvoir résister à l'effort tranchant au droit de l'étauçon, et d'augmenter le moment d'inertie polaire contre les effets de torsion.

En général, on choisit des sections de la forme d'un caisson.

Leur réalisation avec des laminés et tôles soudées est laborieuse et coûteuse.

Par moulage, on obtient les résultats les meilleurs et les plus économiques. Malheureusement ce procédé de fabrication apporte ses défauts. Il n'est pas possible de garantir une qualité d'acier aussi bonne que celle des produits laminés. La moindre solution de continuité, résultant d'un défaut de coulée, constitue une amorce à la rupture si elle se trouve dans la partie tendue.

Ici aussi, l'emploi d'acier tenace doit se traduire par une diminution de la raideur.

Enfin, il est douteux que le modelage meilleur de la section ait permis d'enregistrer des accroissements très sensibles du moment résistant. Pour s'en convaincre, il suffit de calculer le moment résistant des types de bêtes offerts sur le marché, en multipliant leur module de flexion par le taux de travail admissible pour la matière utilisée.

d) Poutre en forme de corps d'égal résistance.

Seul le moulage permet d'obtenir une bête en forme de corps d'égal résistance. L'expérience de ces constructions nous permet d'escompter, à égalité de résistance, une économie de matière de 30 à 35 %. Mais cet allègement va de pair avec une réduction de la raideur de la pièce. L'emploi d'aciers tenaces permet d'obtenir un nouvel allègement au prix d'une nouvelle diminution de la raideur.

Un exemple de poutre réticulaire, d'égal résistance, de 12 cm de hauteur, est représenté schématiquement à la planche I, fig. 1. Cette bête pèserait 19 kg.

Du diagramme des moments fléchissants (fig 2) et de celui des moments d'inertie on peut déduire, par

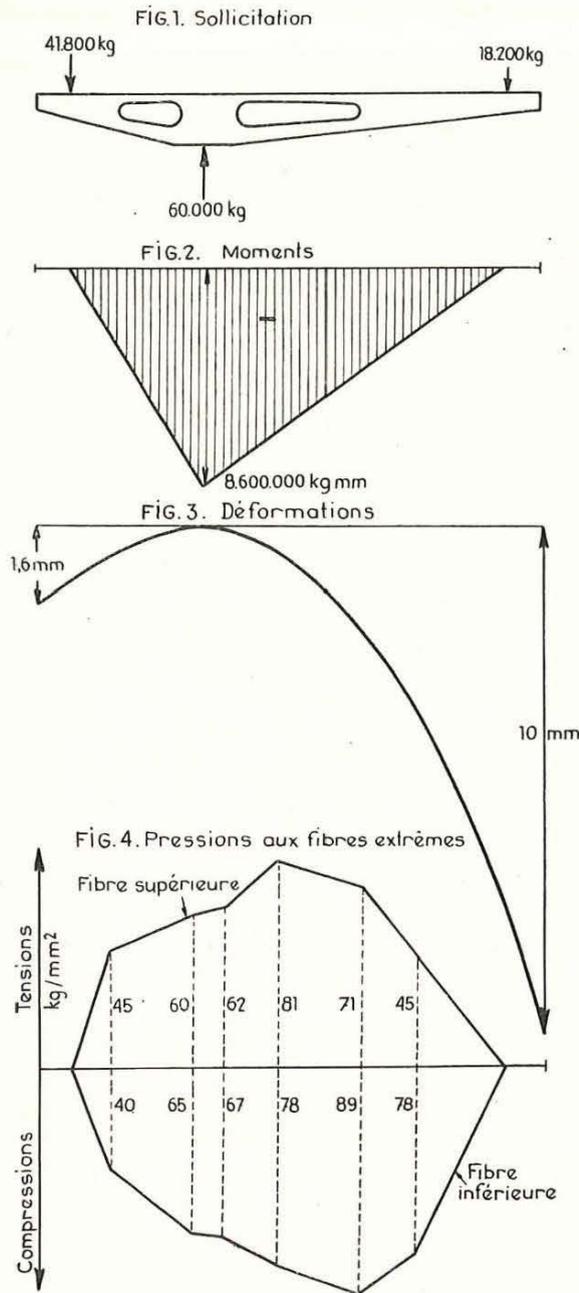


Planche I.

intégration graphique, la déformée de la bête (fig 3) et les tensions sur les fibres extrêmes (fig 4).

La flèche à l'extrémité atteint 9 mm et les tensions maximum sont de l'ordre de 80 kg/mm². Il serait difficile de trouver l'acier moulé qui pourrait convenir à cette construction. Il nous faut donc renforcer et raidir cette poutre.

e) Poutre armée.

Armons la poutre précédente en plaçant une lame d'acier à ressort de 100 × 6 mm² sur sa face supérieure (Planche II). Seules les extrémités de la lame sont soudées sur la poutre que nous appelons dorénavant armature : la longueur des cordons de soudure est limitée à la mesure strictement nécessaire pour transmettre aux abouts de l'armature en

acier moulé l'effort de traction exercé par la lame. Il ne s'agit donc pas d'un simple renforcement de la section. La lame est indépendante de la section fléchie. Contrairement aux fibres de l'armature, elle garde la même tension tout le long de la poutre. Elle est simplement étirée sous l'effet de la flexion subie par l'ensemble de la bête.

Elle exerce sur les abouts de l'armature un effort N. De ce fait, l'armature devient le siège de trois sollicitations :

- une flexion due aux forces extérieures (toit et étançon);
- une flexion, en sens opposé, due aux efforts N excentrés par rapport à la fibre moyenne de la pièce. Cette flexion provoque des moments contraires aux précédents que nous appellerons moments de relèvement.
- une compression provoquée par les mêmes efforts N.

En somme, l'armature est soumise à une flexion composée.

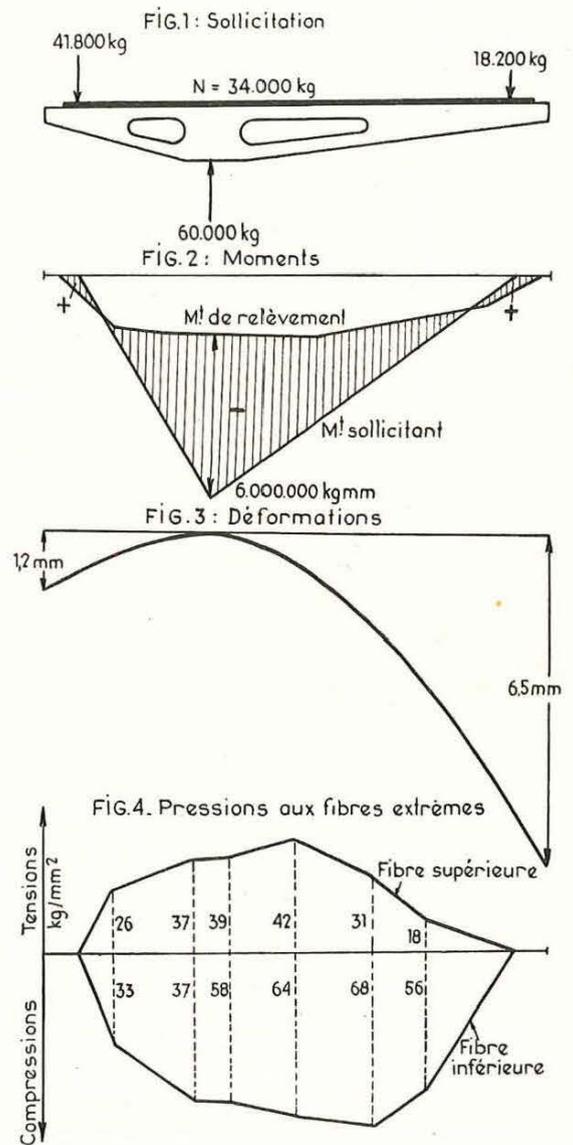


Planche II.

L'ensemble forme un système hyperstatique. La valeur de la traction N peut être déterminée par la théorie du travail moléculaire. On obtient $N = 34.000$ kg pour le système de contraintes envisagé (charge totale de 60 t agissant sur les deux extrémités de la bête).

En combinant le diagramme des moments fléchissants dus aux forces extérieures avec celui des moments de relèvement dus à la traction de la lame (fig. 2), on obtient le diagramme des moments résultants agissant sur l'armature (surfaces hachurées). On peut en déduire, comme ci-dessus, la déformée de la poutre. La flèche maximum est réduite à 6 mm.

La sollicitation de l'acier de l'armature résulte de la superposition des tensions provoquées par les moments de flexion et par la compression axiale N . On voit que les tensions de compression restent inférieures à 70 kg/mm^2 . Les tractions ne dépassent pas 42 kg/mm^2 . L'acier moulé travaille donc dans des conditions beaucoup plus favorables que dans la poutre sans lame de renforcement. La lame n'a cependant pas encore donné son plein rendement :

$$\text{l'acier à ressort travaille à } \frac{34.000}{100 \times 6} = 57 \text{ kg/mm}^2,$$

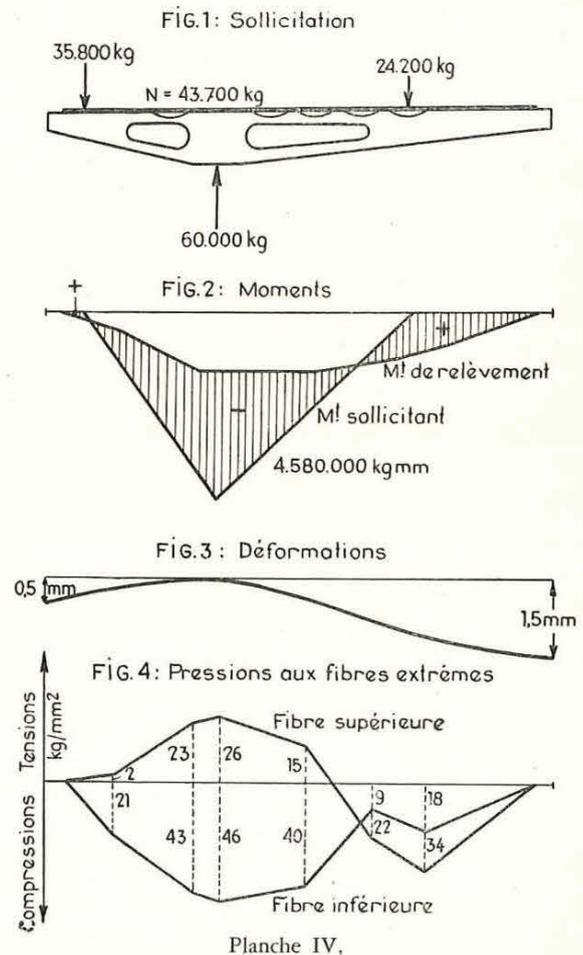
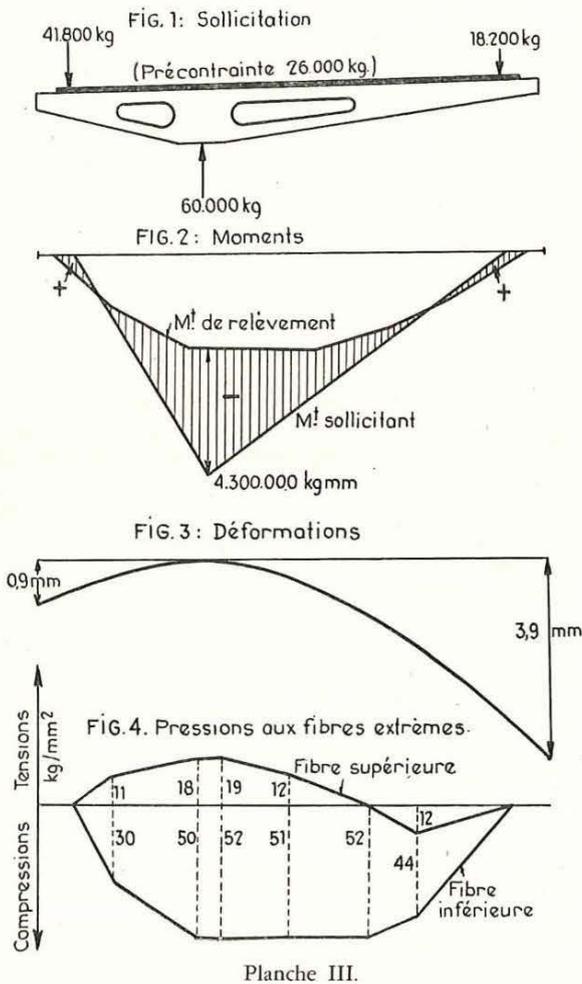
alors qu'il peut facilement supporter beaucoup plus.

f) Poutre armée précontrainte.

Un meilleur rendement peut être demandé à la lame en acier à ressort, à haute résistance. En soumettant la bête à une précontrainte lors de sa construction, on fait prendre par N une valeur supérieure à celle qui apparaît lors de la simple application de la charge de 60 t. On accroît donc les moments de relèvement et on diminue le moment résultant agissant sur l'armature (Planche III). On augmente simultanément la compression axiale exercée sur la pièce.

En combinant ces deux effets, on constate qu'une précontrainte appliquée à la lame a pour effet de diminuer fortement les tensions dans la fibre supérieure (ces tensions peuvent même se transformer en compressions) et, d'autre part, de diminuer, dans une mesure moindre, les compressions dans la fibre inférieure (fig. 4). Ce résultat est particulièrement favorable au travail de l'acier moulé de l'armature, qui offre de meilleures garanties de résistance à la compression qu'à la traction, par suite des défauts éventuels de moulage pouvant constituer des amorce de ruptures.

Par tâtonnement, il est possible de déterminer la précontrainte nécessaire pour provoquer la répartition optimum des tensions lorsque la charge est appliquée, et pour amener l'acier moulé à travailler exclusivement en compression.



Il est ainsi possible de réaliser une bête de 23 kg, capable de supporter une charge de 60 t répartie sur ses deux extrémités, sans recourir à l'emploi de métaux légers.

g) Poutre armée à évidements.

La précontrainte n'est pas le seul moyen d'augmenter la tension de la lame de ressort. On peut la faire augmenter par l'application même des charges à supporter. C'est dans ce but qu'ont été pratiqués des « évidements » à la face supérieure de la bête de la planche IV. L'application d'une charge au droit d'un de ces évidements fait fléchir la lame de ressort et l'applique contre le fond du creux. En épousant les sinuosités de la surface de l'armature, la lame subit un étirement. Aussi, sa tension sous charge atteint-elle 43,7 tonnes, tandis que, sans les évidements, elle n'aurait été que de 34 tonnes seulement (Planche II).

La présence des évidements, tout comme la précontrainte, renforce donc la compression axiale et les moments de relèvement exercés par la lame sur l'armature. Si plusieurs charges s'appliquent au droit des évidements (Planche V), les moments de relèvement prennent même une importance telle

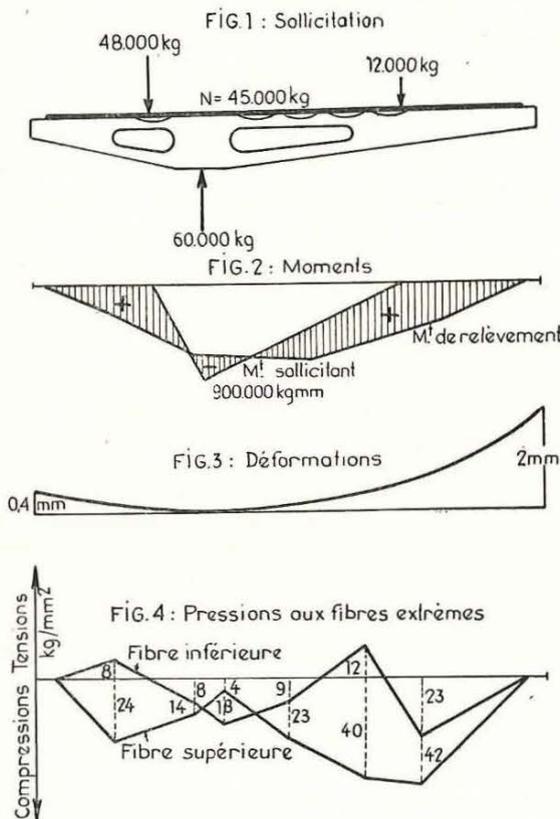


Planche V.

que les extrémités de la bête se relèvent au lieu de s'abaisser. La bête à évidements se comporte comme un arc renversé dont la corde est constituée par la lame de ressort et le bois par l'armature. Une charge appliquée sur la corde la fait fléchir, mais provoque le relèvement des extrémités de l'arc.

Dans le cas d'une charge répartie d'une façon continue sur toute la longueur de la bête (Planche VI), la lame est déprimée plus légèrement et n'atteint pas

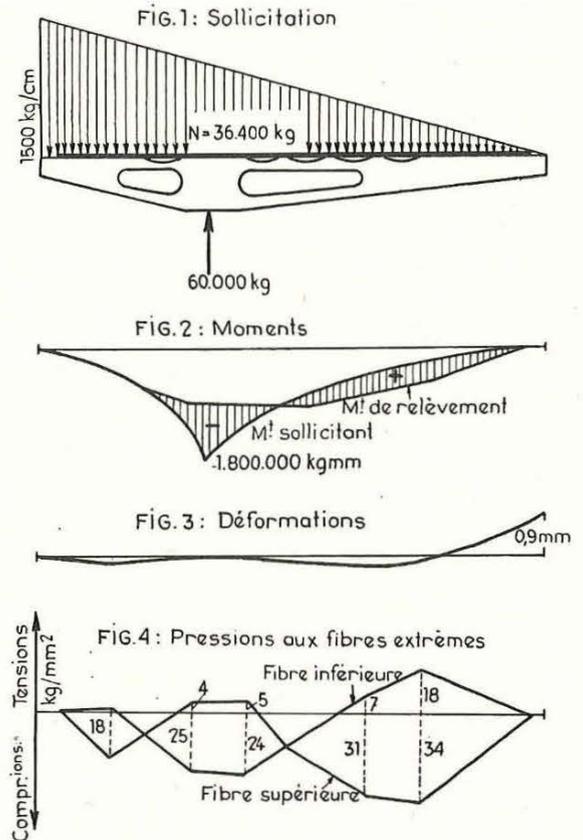


Planche VI.

le fond de chaque évidement. La tension de la lame atteint 36,4 tonnes, et les moments de relèvement compensent approximativement les moments fléchissants de sorte que la déformation de la bête est réduite au minimum.

Il est évidemment possible de combiner les deux procédés : précontrainte et évidement de la face supérieure de la bête.

4. Importance de la raideur de la bête.

Les figures 3 des Planches IV, V et VI mettent en évidence les flèches très faibles ou même négatives des bêtes armées, qu'elles soient précontraintes lors de leur construction, ou qu'elles subissent, du fait des évidements, des contraintes compensatoires pendant la mise en charge.

La raideur des bêtes est de grande importance, non seulement pour limiter les mouvements du toit pendant la mise en charge de la bête, mais aussi pour éviter le phénomène du « bondissement » ou de la « détente » des étançons à frottement.

Pendant la mise en charge et la flexion, la bête et l'étau accumulent une énergie élastique de déformation.

Lorsque la charge atteint 60 tonnes, l'étau coulisse, mais comme le coefficient de frottement pendant le mouvement est beaucoup plus faible qu'au

repos, la force portante de l'étau pendant le coulisement n'est qu'une fraction des 60 tonnes qu'il portait avant la mise en mouvement.

La matière sollicitée se détend donc brusquement. La bête agit comme un arc fortement bandé qui décoche sa flèche, constituée ici par le fût supérieur de l'étau. L'énergie élastique est transformée en énergie cinétique. Cette énergie peut être suffisamment élevée pour que le fût supérieur cesse d'être en contact avec la bête. Dans ce cas, l'étau se dégage et se renverse, compromettant le soutènement de la taille (« Knallen » der Stempel).

On peut déterminer l'énergie de déformation du soutènement. Prenons par exemple la sollicitation de la Planche I. En fléchissant, la bête a absorbé le travail fourni par les deux réactions du toit, soit :

$$\frac{1}{2} \sum P \delta = \frac{1}{2} (41.800 \times 1,5 + 18.200 \times 9) \\ = 113.400 \text{ kg.mm.}$$

D'autre part, un étau de 1.000 mm de longueur et 3000 mm² de section moyenne, soumis à une compression simple de 60 tonnes, absorbe une énergie de :

$$\frac{1}{2} P \delta = \frac{1}{2} P \frac{Pl}{E\Omega} = \frac{1}{2} \cdot 60.000 \cdot \frac{60.000 \times 1.000}{20.000 \times 3.000} \\ = 30.000 \text{ kg.mm.}$$

L'énergie totale avec laquelle le fût est projeté dans la serrure se chiffre donc par 143.000 kg.mm. Elle est absorbée au cours de la détente par la friction dans la serrure.

Si nous admettons avec Jacobi (Strebausbau in Stahl, Spruth, 1948, p. 72) que le coefficient de frottement acier sur acier passe de 0,6 à 0,15 par suite du coulisement, la résultante du frottement vaut :

$$60.000 \frac{0,15}{0,60} = 15.000 \text{ kg.}$$

$$\text{L'étau coulissera donc de } \frac{143.000}{15.000} = 9,5 \text{ mm}$$

pour absorber l'énergie de la détente.

Ce résultat découle bien entendu des conditions particulièrement sévères que nous avons admises. Mais le fait que, dans la pratique, des étaux se renversent sans autre cause montre bien que l'ordre

de grandeur obtenu est proche de la réalité. Ce petit calcul met en évidence le rôle de la flexibilité de la bête, qui emmagasine à elle seule 80% de l'énergie élastique totale.

A chaque détente, la bête se dérobe. Il en résulte des relâchements et prises en charges successifs qui doivent disloquer le toit. Ce danger est fonction directe de la quantité d'énergie élastique accumulée par le soutènement.

La faible valeur des flèches, des sollicitations et des quantités de matières mises en œuvre dans la bête décrite ci-dessus réduit au minimum l'énergie élastique absorbée sous la charge totale. De plus, la détente se produit ici dans une direction perpendiculaire à l'axe de l'étau et est sans action sur son bondissement. Le danger est donc limité dans toute la mesure du possible.

5. Conclusions.

De cette étude résulte ce qui suit :

Les conditions d'encombrement et de poids d'une part, de résistance et de solidité d'autre part, imposées aux bêtes, sont contradictoires. Il est impossible de satisfaire aux unes et aux autres en utilisant un corps prismatique sollicité uniquement par la flexion simple que provoquent les forces extérieures.

L'allègement et le renforcement ne peuvent être obtenus simultanément que par l'emploi combiné d'une forme rationnelle et d'un matériau à haute résistance.

La forme idéale ne peut s'obtenir que par moulage. Or, le matériau le plus adéquat, l'acier à très haute résistance (acier à ressort), ne se prête pas à ce genre de fabrication.

En utilisant le principe de la poutre armée, il est cependant possible de combiner les avantages de la forme et du matériau les meilleurs.

La poutre armée, précontrainte ou contrainte en cours de sollicitation, donne des résultats encore plus favorables.

L'acier moulé travaille à la compression et l'acier à ressort à la traction. En neutralisant le mieux possible les efforts de flexion, on arrive à faire produire le maximum de travail à la matière utilisée. Il est possible de cette façon de réaliser une bête de 80 cm ne pesant que 23 kg et capable de porter 60 tonnes.

La résistance à la flexion du corps de la bête ne constitue qu'un tiers environ de la résistance totale de l'ensemble.

Les modèles de bêtes répondant à cette conception se caractérisent par une grande raideur, assurant un contrôle efficace du toit et une garantie contre la détente brusque et le renversement des étaux.