

RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES ACIERS DE CONSTRUCTION

PAR

M. CH. FRÉMONT

La rupture par poinçonnage et cisaillement était, au siècle dernier, considérée comme un phénomène de glissement.

Aussi Vicat dit : (1)

« Si l'on perce deux trous cylindriques sur les faces opposées d'un solide quelconque de matière bien homogène et cela de telle sorte que le premier trou soit placé bien exactement sur le prolongement du second, et qu'on laisse en même temps un intervalle plein entre les deux trous, nous disons que la puissance qui parviendra à repousser, par l'une ou l'autre ouverture le solide cylindrique qui les sépare, mesurera la force *transverse* de la matière sur l'étendue développée du cylindre ainsi détachée. D'après notre définition, la cohésion aura été vaincue par une puissance tangentielle, c'est-à-dire *sans action oblique ou normale sur la face de rupture*. »

C'est là une hypothèse de mathématicien, que l'expérience contredit, comme le constate Vicat lui-même, car il ajoute :

« Les résistances transverses sont évidemment proportionnelles à l'étendue des surfaces désunies ; on remarque sur ces faces, d'ailleurs bien terminées, une pulvérulence qui, *s'étendant jusqu'à une certaine profondeur*, atteste combien a dû être violent le mode de désorganisation éprouvée par la matière. »

Il y a donc, latéralement au plan de rupture, une désagrégation plus ou moins importante de la matière.

Dans une note à l'Académie des Sciences (2), j'ai montré que le phénomène de la rupture par poinçonnage et par cisaillement est un travail de *traction* et non pas de glissement ; chaque couche comprimée par le poinçon ou la lame de cisaille ne se sépare pas immédiatement de la couche dont elle provient, il reste un ligament analogue à la partie tendue dans une éprouvette de traction qui va s'allongeant sous l'effort de l'outil. L'influence de cette traction n'est pas limitée au plan de rupture ; j'ai montré, dans un mémoire sur le rivetage remis l'an dernier à la Société d'Encouragement et actuellement sous presse, que la désagrégation latérale s'étend sur une zone d'une profondeur à peu près égale à l'épaisseur de la pièce cisailée ou poinçonnée.

(1) Vicat, Recherches expérimentales sur les phénomènes physiques qui précèdent et accompagnent la rupture ou l'affaissement d'une certaine classe de solides. *Annales des Ponts et Chaussées*, 1833, 2^e semestre, page 226.

(2) *Théorie expérimentale du cisaillement et du poinçonnage des métaux*, 10 décembre 1894.

Résistance au cisaillement. — Les premières expériences pratiques sur la résistance au cisaillement paraissent avoir été effectuées en Angleterre, à propos du rivetage du pont de Conway (1).

Pour déterminer la résistance du rivet au cisaillement, les ingénieurs anglais se servirent d'un bloc (fig. 1) portant deux joues parallèles, distantes de 19 mm. Ces joues étaient traversées par un boulon servant d'articulation à un levier de 1^m,829 de longueur qui se mouvait entre les deux joues, de manière à remplir tout l'intervalle. Les deux joues étaient percées d'un trou ayant rigoureusement le même diamètre que le rivet à expérimenter. On introduisait le rivet dans une seule joue, si on voulait observer le cisaillement *simple* ; dans les deux joues, si on voulait observer le cisaillement *double*.

Le cisaillement était obtenu au moyen de poids placés à l'extrémité du levier.

Les lois déduites d'une série de douze expériences sont les suivantes :

1^o La résistance au cisaillement est proportionnelle à la section totale cisailée ;

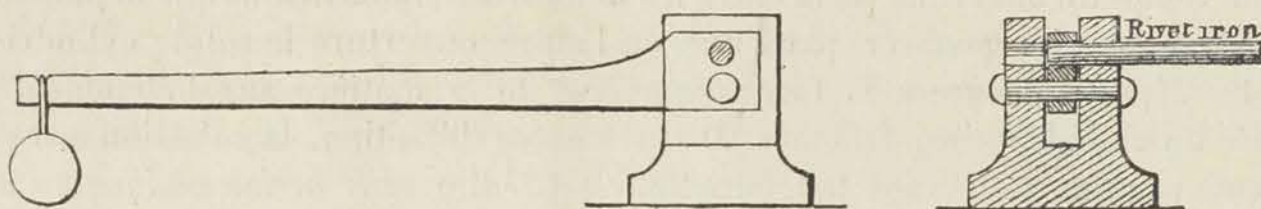


Fig. 1. — Appareil ayant servi à mesurer la résistance au cisaillement.

2^o La résistance au cisaillement est à peu près la même que la résistance à la rupture par traction du métal cisailé.

En effet les résultats de ces essais de cisaillement donnent une moyenne de 36 kg. par millimètre carré, alors que la résistance à la rupture par traction du métal cisailé était de 37,80.

Il est à remarquer dans ces expériences que la moyenne des résultats pour le cisaillement simple est de 38 kg., alors que la moyenne pour les résultats de cisaillements doubles est de 34,8.

Lors de la construction du pont de Clichy, près Paris, exécuté dans les ateliers de MM. Gouin et C^{ie}, M. Lavalley entreprit, pour vérifier les lois du cisaillement, une série d'expériences.

Voici comment il opéra (2) :

« Il fit tourner de petites tringles en fer corroyé, dit extra-martelé de Grenelle, à des diamètres respectifs de 8, 10, 12 et 16 mm. Ces petits morceaux de fer étaient insérés, en guise de goupilles ou clavettes, dans une fourchette et dans sa partie mâle. Ces pièces étaient en acier trempé, exactement alésées. Au moyen de poids ajoutés successivement, on les tirait en sens contraire, jusqu'au complet cisaillement des petites broches. »

(1) Edwin Clarke, *The Britannia and Conway tubular bridges*, 1850, t. 1, page 390.

(2) Mathieu et Lavalley, Sur la construction du pont biais de Clichy, chemin de fer de Saint-Germain. *Bulletin Société des Ingénieurs Civils*, 1852, page 156.

Ces essais au cisaillement double ont donné une moyenne de 31^{kg},89 pour du fer ayant une résistance à la traction de 40 kg. Ce qui donne pour le rapport de la résistance à la traction la proportion de 4/5^e, admise depuis plus de cinquante ans et encore enseignée dans nos cours de résistance des matériaux.

A la suite de nombreuses expériences (1), j'ai donné la formule : $C = T \times 0,35 + 6^{\text{kg}},5$, dans laquelle C est la résistance au cisaillement et T la résistance à la rupture à la traction et par millimètre carré.

Or, tout récemment M. Izod a présenté à l'Institution of Mechanical Engineers (2), une note sur le cisaillement dans laquelle il donne des résultats d'essais très différents de ceux que j'ai trouvés.

Ainsi pour des aciers au carbone dont les résistances à la traction sont respectivement de 39^{kg},20 et de 96^{kg},50, les résistances correspondantes au cisaillement sont de 29^{kg},15 et 60^{kg},30.

Or, d'après la formule que j'ai proposée, les résultats seraient respectivement 20^{kg},8 au lieu de 29^{kg},15 pour le premier acier (39^{kg},20 de résistance à la traction) et de 40^{kg},7 au lieu de 60^{kg},3 pour le second (résistance à la traction de 96^{kg},50).

Cette énorme différence n'est pas le fait d'une erreur d'opération ou de calcul; elle tient au mode d'opérer; il y a donc lieu de fixer les conditions d'expérience, surtout en vue d'utiliser l'opération du cisaillement pour en déduire la résistance à la traction du métal cisailé, et faire ainsi du cisaillement une méthode d'essai des aciers de construction, méthode qui auraient les avantages précieux d'être simple, rapide, économique et applicable dans beaucoup plus de cas que la méthode usuelle d'essai par traction.

M. Izod, comme Lavalley et plusieurs autres expérimentateurs, a probablement choisi le cisaillement *double* parce que ce procédé tend à localiser le cisaillement et à rapprocher la surface de rupture du plan de glissement hypothétique des mathématiciens, en réduisant la profondeur des déformations latérales.

A première vue le cisaillement double, ainsi effectué entre lames d'acier trempé, paraît devoir présenter, par unité de section, la même résistance que le cisaillement simple; mais l'expérience prouve qu'il n'en est pas ainsi parce que le phénomène de la rupture est complexe.

Dans une étude expérimentale du cisaillement et du poinçonnage (3), j'ai dit qu'en examinant la face de rupture d'un métal cisailé, on constate deux zones distinctes : une petite zone brillante et une plus grande zone mate.

La zone brillante est le résultat du frottement exagéré qu'a subi la surface de la partie entraînée en glissant sur la lame tranchante; il se produit alors un fort grippement qui apparaît sous forme de stries parallèles.

Les fibres qui ne sont pas rompues et subissent la traction, entraînent dans leur mouvement les fibres rompues qui leur sont adhérentes et les appuient fortement sur la paroi latérale de la lame tranchante. Cette pression subsiste pendant

(1) Ch. Frémont, Essai des métaux par pliage de barrettes entaillées. *Bulletin de la Société d'Encouragement*, septembre 1901, page 388.

(2) Un extrait de cette note sera donné dans le prochain n° de la *Revue de Métallurgie*.

(3) *Bulletin de la Société d'Encouragement*, septembre 1897, page 1198.

tout le temps qu'agit l'effort de traction pour opérer le cisaillement; elle augmente avec cet effort.

La zone mate qui succède à la zone brillante est constituée par la texture du métal rompu, tout comme dans une éprouvette de traction ordinaire; et, si

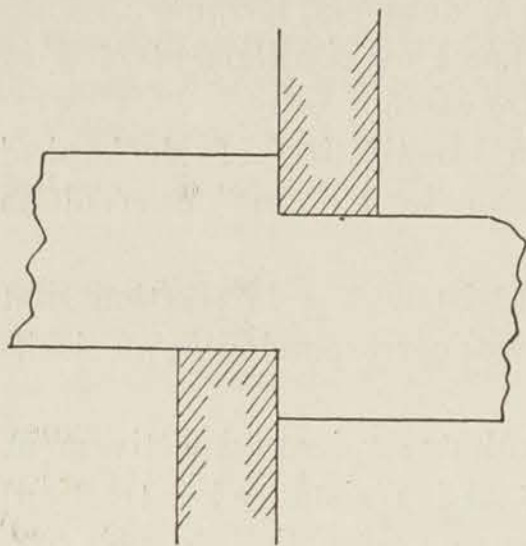


Fig. 2. — Schéma montrant, dans le cisaillement, les talons de la partie rompue frottant sur la paroi latérale des lames de cisaille.

les aspérités sont plus faibles, la surface plus unie, cela tient à ce que la striction des éprouvettes dans le cisaillement, est localisée et ne peut produire des arrachements aussi étendus que dans les éprouvettes de traction.

L'appareil enregistreur qui me servait à cette époque pour ces expériences manquait de précision; il ne donnait que des diagrammes de faibles dimensions et il m'était difficile d'effectuer des mesures précises; je ne pouvais constater dans les efforts que des écarts sensibles, tels que ceux qui surviennent lorsque les lames parallèles de la cisaille s'émoussent et s'arrondissent; et je remarquai que, dans ce cas, la résistance au cisaillement tendait à se rapprocher de la résistance à la traction.

Pour étudier l'influence de la résistance à la traction du métal cisailé et en dégager un rapport permettant de calculer une de ces deux résistances, l'autre étant connue, j'ai installé un enregistreur précis et j'ai donné les résultats de mes essais dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement* en septembre 1901.

Je me propose aujourd'hui de mesurer l'influence des frottements parasites et de déterminer la résistance au cisaillement *pur*.

J'ai opéré sur un acier carré de 8×8 mm de côté et d'une résistance à la traction de 45 kg. par millimètre carré.

En effectuant sur cet acier un cisaillement *double*, j'ai trouvé une résistance de 31^{kg},25 par millimètre carré de surface cisailée. Ce résultat ne s'écarte pas sensiblement de celui qu'aurait obtenu, toujours pour un cisaillement double, M. Izod pour un acier de même résistance à la traction.

Dans un cisaillement *simple*, effectué entre deux lames parallèles en acier trempé, j'ai trouvé une résistance de 23^{kg},25 par millimètre carré, soit une diminution, par rapport au cisaillement double, de 8 kg. par millimètre carré.

J'ai alors effectué de nouveaux cisaillements simples, mais en procédant par étapes successives et en limant à chacune de ces étapes, les talons des parties déjà rompues qui, dans le cisaillement habituel, viennent frotter sur la paroi

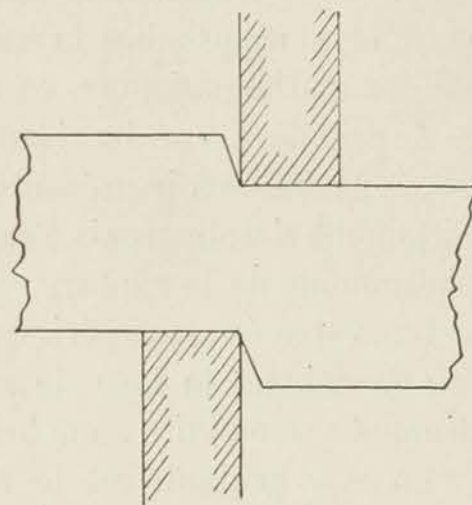


Fig. 3. — Schéma montrant les talons limés pour éviter le frottement de cette partie sur les lames de cisaille.

latérale de la lame de la cisaille pendant l'opération du cisaillement (fig. 2 et 3).

La résistance au cisaillement, effectuée dans ces conditions spéciales annulant à peu près complètement les frottements parasites, est descendue à 18 kg. par millimètre carré.

La résistance à la traction de cet acier étant de 45 kg., la résistance au cisaillement *pur* est donc les $2/5^e$ ou les $4/10^e$ de la résistance à la traction.

Pour un acier de 103 kg. de résistance à la traction, j'ai trouvé pour le cisaillement habituel 43^{kg,55} par millimètre carré et pour le cisaillement *pur* effectué comme précédemment, une résistance de 41 kg. soit encore les $4/10^e$ de la résistance à la traction.

En limant les talons, comme précédemment, dans un cisaillement *double* du même acier carré de 8×8 mm., la résistance au cisaillement par millimètre carré est descendue de 31^{kg,25} à 24^{kg,60}, c'est-à-dire qu'elle reste encore supérieure à 6^{kg,60} à la résistance au cisaillement pur du même acier.

Cette différence paraît anormale à première vue. En voici l'explication :

Dans le cisaillement double, la partie A B C D (fig. 4), détachée par le poinçon s'allonge latéralement au fur et à mesure de l'opération du cisaillement, et se cintre sur toute sa longueur; on constate en effet que la pression de la lame ne s'effectue qu'aux extrémités A et B et que le milieu de A B est concave. Ce cintrage produit une pression oblique qui s'ajoute en partie, à l'effort de traction du cisaillement.

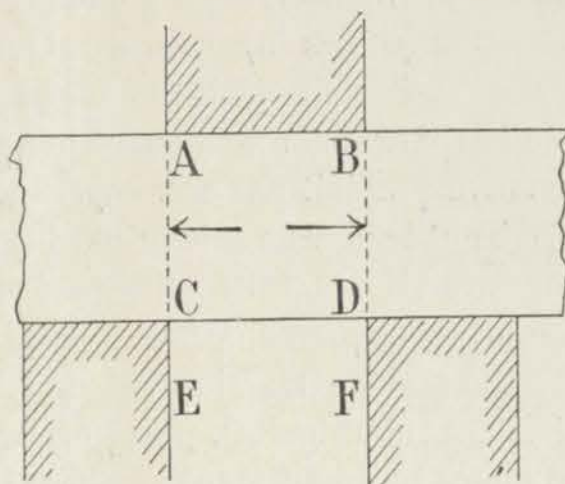


Fig. 4. — Schéma de la déformation du métal dans un cisaillement double.

Employer le cisaillement double pour déterminer la résistance au cisaillement pur est donc une erreur, puisqu'au lieu de supprimer les frottements parasites on complique le phénomène et on augmente artificiellement la résistance.

Dans ces expériences, les lames étaient en acier trempé avec arêtes vives; lorsque les lames ont le bord arrondi, la résistance au cisaillement augmente sensiblement.

Ainsi, avec un arrondi de 1^{mm,2} de rayon aux bords du poinçon et de la matrice, le même acier carré de 8×8 mm. a donné, au cisaillement double une résistance 37^{kg,5} et avec un arrondi de 6 mm. de rayon, une résistance de 50 kg. par conséquent plus élevée de 5 kg. que la résistance à la traction.

Il est utile de connaître cette influence du profil des lames tranchantes sur la résistance mesurée; ainsi les rivets d'une charpente métallique réunissent des pièces dont la matière peut être de résistance plus faible que le métal du rivet; il s'ensuit que, si la surface du métal cisailé subit l'écrasement, l'intrados du trou se déforme également, et on se trouve dans le cas d'un cisaillement double effectué avec des lames arrondies.

Ces variations de résistance suivant ces divers procédés de cisaillement

impliquent donc une définition exacte du procédé employé, surtout lorsqu'il s'agit de déduire du cisaillement effectué sur un acier sa résistance à la traction.

Dans un essai de traction habituel, on mesure la limite élastique, la résistance maximum et la ductilité.

Il est nécessaire de connaître : 1° la limite élastique pour savoir quel effort, en principe, le métal employé ne doit pas dépasser dans l'application pratique; 2° l'effort maximum, appelé généralement résistance à la rupture, qui indique la charge sous laquelle le métal, soumis à une traction *statique*, se romprait, est surtout utile à connaître pour déterminer sa place dans la classification des aciers; 3° la ductilité, mesurée habituellement par l'allongement de l'éprouvette essayée et, plus rarement, par la striction, est utile à connaître pour en déduire la *résistance vive statique*.

C'est la possibilité d'évaluer numériquement ces trois facteurs qui a donné à l'essai de traction, depuis une trentaine d'années, la faveur dont il jouit encore actuellement; les ingénieurs ont pu en effet inscrire dans leurs cahiers des charges, des quantités numériques auxquelles ils ont attribué une valeur absolue, alors que l'expérience a démontré par l'usage que très souvent cette précision exigée ne correspondait pas aux espérances.

Tout le monde sait aujourd'hui qu'un acier qui a montré, à l'essai de traction, une grande ductilité, c'est-à-dire un grand allongement, peut cependant se rompre brusquement dans des chocs relativement faibles.

L'essai de traction est donc insuffisant pour renseigner utilement sur la résistance d'un métal, puisqu'il ne donne pas d'indication sur la résistance vive au choc, toute différente de la résistance vive statique.

Pour les trois facteurs mesurés dans l'essai de traction : limite élastique, résistance à la rupture et ductilité, il y a lieu de présenter quelques observations.

Limite élastique. — La limite élastique *vraie*, c'est-à-dire la charge sous laquelle le métal cesse de conserver sa contexture, ne peut être mesurée que sur des éprouvettes ayant une forme à section croissante et à surfaces polies (1).

En effet, les diverses limites élastiques qu'on mesure dans l'essai de traction habituel, dépendent des circonstances dans lesquelles on les a obtenues et peuvent être entachées des erreurs les plus graves.

Elles sont subordonnées à l'apparition des déformations discontinues dont la présence est à peu près inévitable en pratique, mais dont la cause est purement accidentelle.

La grandeur correspondant à la limite élastique est quelquefois spécifiée dans les cahiers des charges; mais, dans la pratique des essais de recette, on n'en tient ordinairement pas compte et les cahiers des charges les plus récents ne demandent même plus cette mesure.

Quoi qu'il en soit, le diagramme du cisaillement permet de mesurer la limite élastique apparente avec au moins autant d'exactitude que l'essai de traction habituel.

(1) M. Frémont, Mesure de la limite élastique des métaux. *Bulletin de la Société d'Encouragement*, septembre 1903.

En effet, si le cisaillement présente une résistance égale aux $4/10^{\text{es}}$ de la résistance à la traction, augmentée de la résistance des frottements parasites produits pendant l'opération, il est évident qu'au début de cette opération, au commencement des déformations permanentes, à la limite élastique apparente, il n'y a pas encore de frottement appréciable; et la limite élastique apparente du cisaillement est égale aux $4/10^{\text{es}}$ de la limite élastique apparente à la traction.

J'ai vérifié cette loi sur plus de cinquante diagrammes de cisaillements effectués sur des fers et des aciers d'une résistance à la rupture de 30 kg. à 105 kg. et j'ai pu constater que la mesure de la limite élastique ainsi calculée était au moins aussi exacte que celle qu'on avait obtenue par la traction habituelle.

Résistance à la rupture. — J'ai donné autrefois la formule suivante permettant de déduire du cisaillement C, la résistance à la rupture T à la traction :

$$T = \frac{(C - 6,5)}{0,35}.$$

Je viens de faire une nouvelle série d'essais de cisaillements sur des aciers de résistance à la traction connue, et j'ai trouvé que cette formule devait être légèrement modifiée et s'écrire : $T = \frac{(C - 7,5)}{0,34}.$

Ductilité. — L'allongement total, tel qu'on le mesure dans les essais de traction, comme étant une caractéristique de la ductilité, englobe en réalité deux éléments tout à fait distincts n'ayant entre eux aucun rapport nécessaire, l'allongement réparti et l'allongement de striction (1).

L'allongement de striction qui indique la longueur dont peut s'étirer le métal en un point déterminé, avant de se rompre, est le seul élément dont on doit tenir compte; en effet, l'allongement total relevé sur les éprouvettes rompues à la traction présente d'autant plus de divergences que le métal a plus d'homogénéité, parce qu'alors il se produit souvent plusieurs commencements de striction.

En observant les diagrammes de cisaillements d'aciers connus, on constate que, la distance de l'ordonnée maximum au point de départ de l'opération, c'est-à-dire la distance de l'origine du diagramme à l'ordonnée maximum est bien fonction de la ductilité, mesurée par la striction; il est donc possible de déterminer la striction $\frac{S - S'}{S}$ d'après la mesure prise sur un diagramme de cisaillement.

Conclusions. — En résumé le diagramme du cisaillement d'un acier ordinaire de construction, effectué entre deux lames parallèles, permet de mesurer la limite élastique, la résistance à la rupture et la ductilité à la traction, avec au moins autant d'exactitude que l'essai de traction habituel.

La préparation des éprouvettes prismatiques de cisaillement est beaucoup plus simple, plus économique, plus rapide que celle des éprouvettes de traction; la possibilité de répéter l'opération pour constater le degré d'homogénéité et d'ef-

(1) *Congrès international des méthodes d'essais*, Paris, 1900, t. 1, page 422.

fectuer ces essais dans toute les parties du métal, si petites qu'en soient les dimensions, rend très pratique cette méthode d'essai.

Si l'on opère sur des sections variables le calcul est facile, et si l'on opère sur la même machine et avec une section constante telle que 8×10 (section de mes barrettes de choc) il suffit de préparer un abaque (fig. 5) tracé sur du papier transparent, et de le faire coïncider avec le diagramme obtenu par le cisaillement

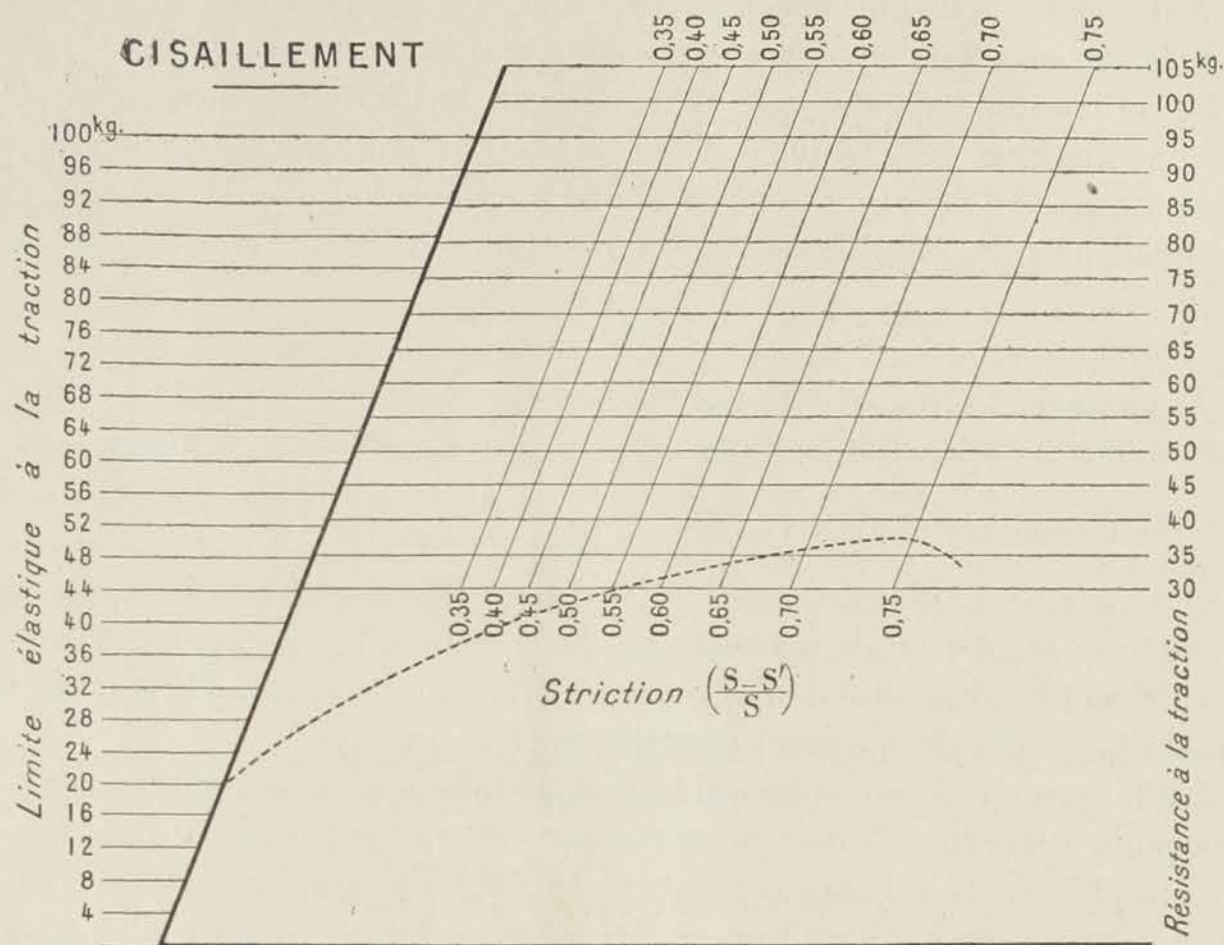


Fig. 5. — Abaque permettant de déduire, par simple lecture, les grandeurs d'un essai de traction, du diagramme d'un essai habituel de cisaillement

pour pouvoir obtenir instantanément et par simple lecture, la limite élastique, la résistance à la rupture et la ductilité à la traction du métal cisailé.

J'ai tracé en pointillé, à titre d'exemple, sur la figure 5, le diagramme du cisaillement d'un acier extra-doux de 37 kg. de résistance à la traction, de 20 kg. de limite élastique et d'une striction de 0,75; on constate que ces grandeurs sont bien également données par le diagramme de cisaillement.

Cet acier extra-doux, qui donne 25 à 35 0/0 d'allongement total, sur éprouvettes de 20 cm. de longueur utile est cependant très fragile, car essayé au choc sur barrettes entaillées de 8×10 mm. de section, il se brise avec une dépense de travail de 1 kgm.