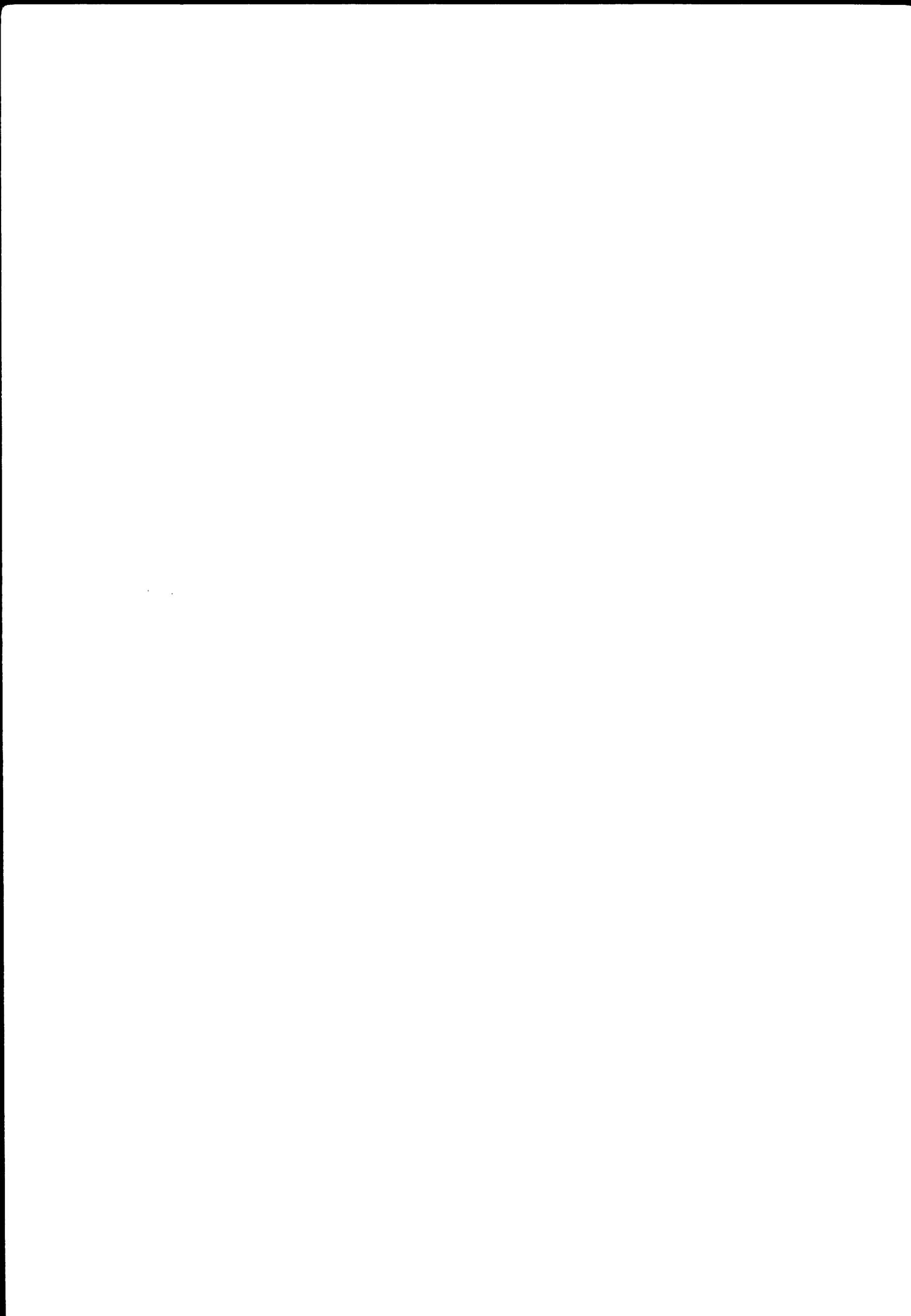


COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE  
DU CHARBON ET DE L'ACIER  
HAUTE AUTORITÉ

## Recherche internationale sur le laminage

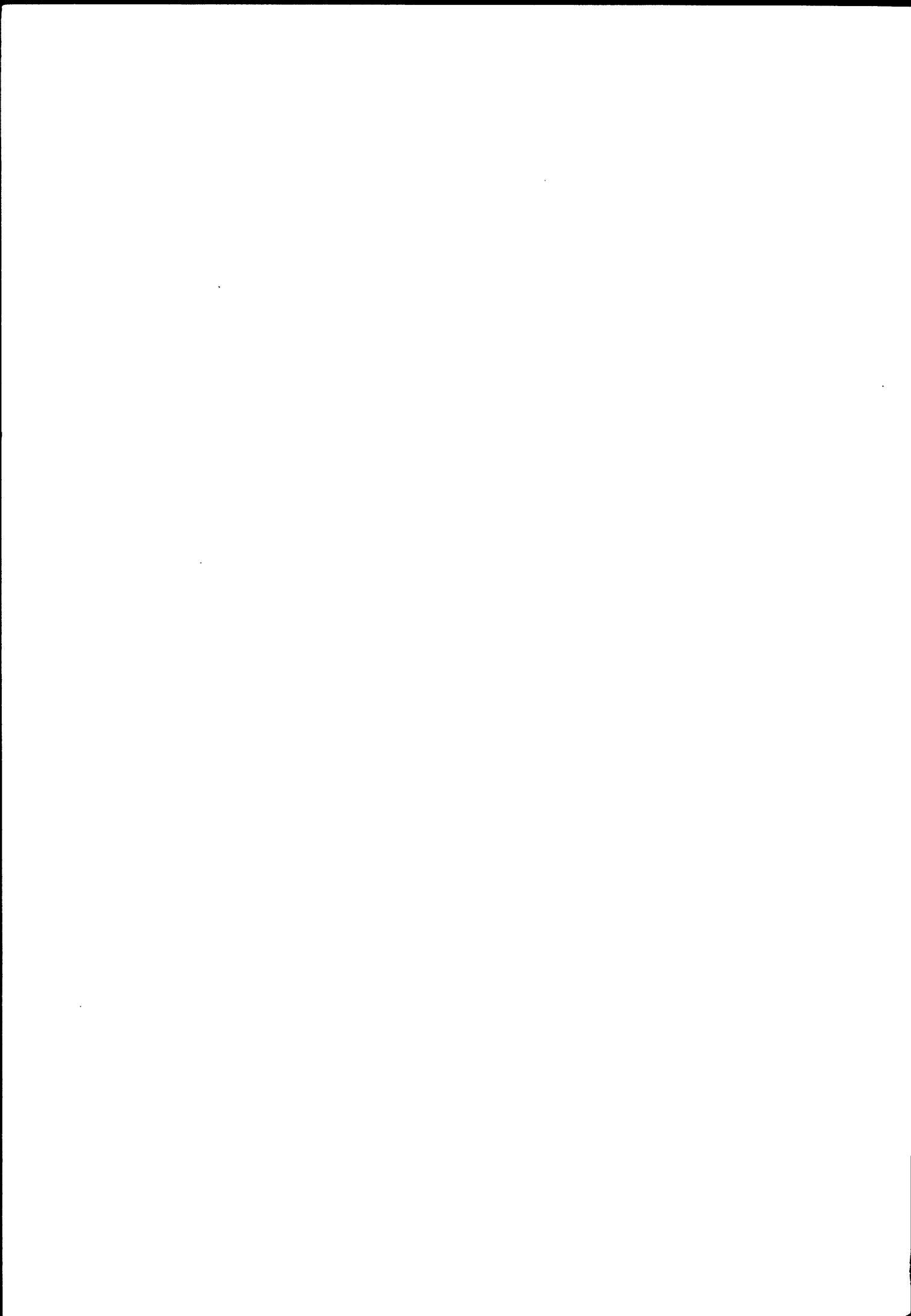
Luxembourg, mai 1959



COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE  
DU CHARBON ET DE L'ACIER  
HAUTE AUTORITÉ

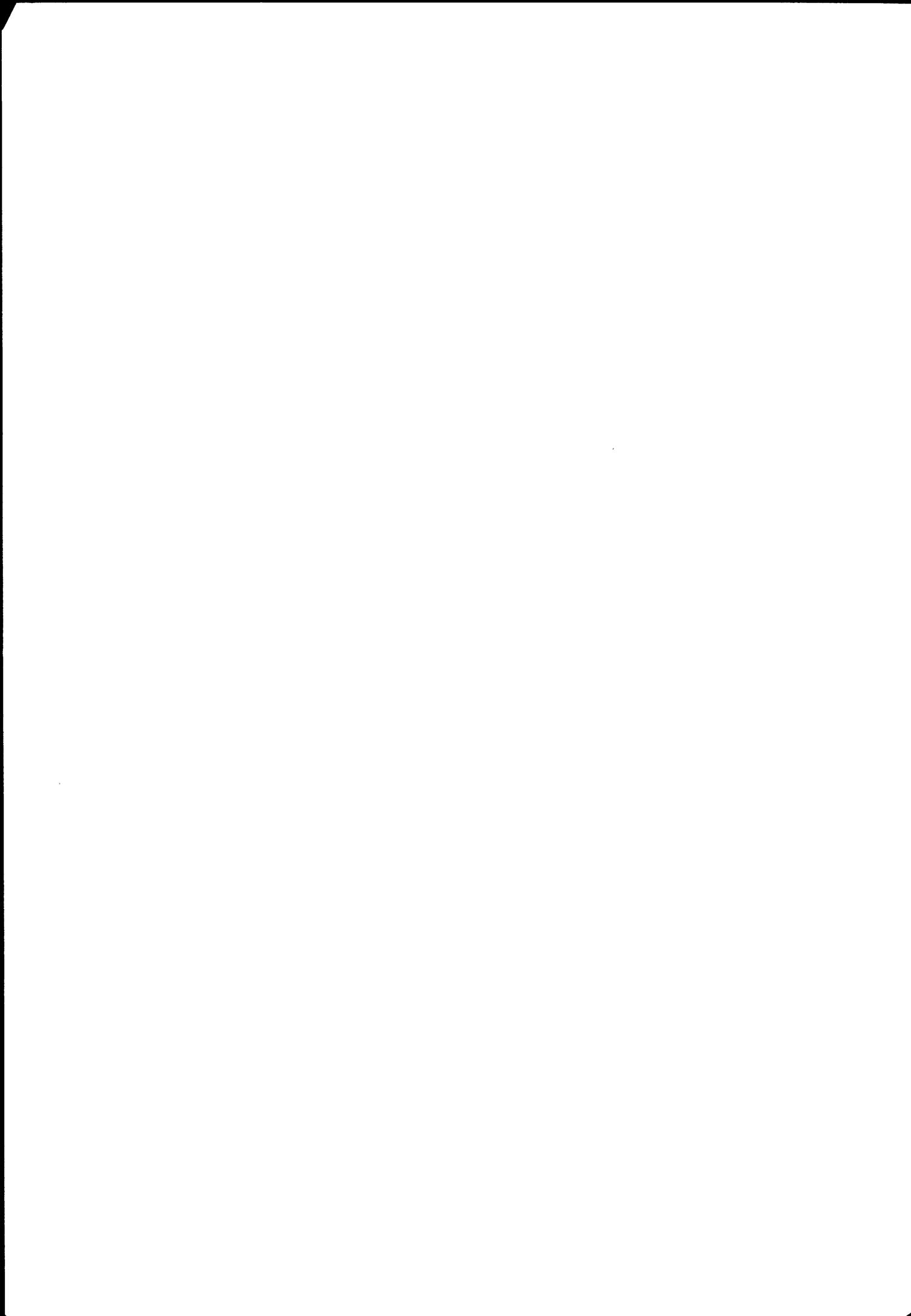
## Recherche internationale sur le laminage

Luxembourg, mai 1959



## SOMMAIRE

	PAGE
1. INTRODUCTION, par P. COHEUR	III - VI
2. RAPPORT SUCCINCT SUR LE LAMINAGE ET LES ESSAIS EFFECTUES SUR FEUILLARDS, par P. BLAIN	1 - 19
3. RAPPORT SUCCINCT SUR LE LAMINAGE ET LES ESSAIS EFFECTUES SUR RONDS DE 20 MM Ø par G. LEDER, Ing. Dipl.	21 - 45
4. RAPPORT SUCCINCT SUR LE LAMINAGE ET LES ESSAIS EFFECTUES SUR FILS, par M. GOOSSE	47 - 72
5. RAPPORT SUCCINCT SUR L'ETUDE DE LA CALAMINE.	
A) ETUDE DE LA CALAMINE, RAPPORT SUCCINCT, par MM. J. MOREAU, M. CAGNET, P. CHAUVEAU.	73 - 76
B) ETUDE DE LA CALAMINE SUR LES ACIERS, par Dr. Ing. W. LUEG	77 - 79
6. CONCLUSIONS, par P. BLAIN	81 - 83



## INTRODUCTION

par P. COHEUR

Le 1er juin 1953, la Commission de la Recherche Technique "Sidérurgie" de la C.E.C.A. manifestait le désir d'entreprendre des recherches dans le but de préciser l'incidence des conditions de laminage sur les propriétés physiques des aciers et d'éclaircir les facteurs qui régissent la formation et l'adhérence de la calamine.

La Commission souhaitait préciser en premier lieu l'influence du type de trains ou mieux, de l'ancienneté des trains sur les caractéristiques mécaniques des produits laminés.

Ainsi définie, cette recherche présentait à la fois un intérêt technique et scientifique et un aspect économique important pour les sidérurgistes préoccupés par des problèmes que pose la modernisation des usines.

Elle a de plus un caractère international car sa réalisation postule le concours d'usines disposant des trains de laminoirs nécessaires aux essais, et ces usines ne sont généralement pas localisées dans un même pays. C'est d'ailleurs ce qui lui assure son originalité.

Après avoir pris l'avis de spécialistes éminents, la Commission de la Recherche Technique décidait de faire porter les essais sur 3 catégories de produits, à savoir les *feuillards* (épaisseur 2,5 mm), les *ronds* (diamètre 20 mm) et les  *fils*  (diamètre 5,5 mm) en acier doux effervescent élaboré suivant 3 formules: Siemens-Martin, Thomas soufflé à l'air atmosphérique, Thomas soufflé au vent enrichi en oxygène.

En choisissant ces trois formules, la Commission n'avait nullement l'intention, directe ou indirecte, de comparer entre elles des méthodes d'élaboration différentes, mais bien de s'assurer que les aciers obtenus par ces trois formules réagissaient de la même façon aux diverses conditions de laminage que le programme des essais fixerait. Autrement dit, la Commission n'entendait point limiter les conclusions de la recherche à une seule catégorie d'acier et avait le souci d'y intéresser toutes les usines de la Communauté.

Pour l'exécution de la recherche, la Commission créa en septembre 1954 un Comité Directeur composé de: MM. COHEUR, Président (Luxembourg, Belgique), THOMAS (Allemagne), MASSINON (Belgique), MALCOR (France), CANTENOT (Sarre), SCORTECCI (Italie), de GRAAF (Pays-Bas) et GULDNER, observateur (Haute Autorité), et elle confia la réalisation pratique des essais à un Bureau Exécutif dirigé par M. BLAIN (France),

avec pour Conseiller technique M. CURTH (Allemagne) et pour Conseiller scientifique M. le Professeur LEREBOURS-PIGEONNIERE (France).

Le Bureau Exécutif fut épaulé par 4 sous-commissions:

- a) Sous-commission Feuillards, présidée par M. BLAIN (France);
- b) sous-commission Ronds, présidée par M. LEDER (Allemagne);
- c) sous-commission Fils, présidée par M. GOOSSE (Luxembourg);
- d) sous-commission Essais physiques.

Le secrétariat technique et financier fut assuré par la Section liégeoise du Centre National de Recherches Métallurgiques (Belgique, Luxembourg) et en particulier par MM. DECKER, SEVRIN et HUBEAUX.

Signalons encore que le programme d'expérimentation ou encore le plan statistique des essais fut établi en octobre 1954 avec le concours des statisticiens éminents des pays de la Communauté sur la base d'un projet établi par Mlle. ULMO (IRSid - France).

De plus, pour réduire à un minimum les erreurs systématiques ou accidentelles, il fut décidé, au cours de 16 réunions, qui se tinrent à Differdange, Düsseldorf, Gênes, Liège, Luxembourg, Paris et St. Germain-en-Laye:

- 1° d'élaborer dans une même aciérie les aciers destinés à une même catégorie de produits et de les transformer en demi-produits par un même laminoir;
- 2° de doubler les essais, en d'autres mots, de choisir chacune des trois catégories de produits (feuillards, ronds, fils) deux trains modernes et deux trains anciens;
- 3° d'opérer dans chacune des trois catégories avec des *prises de fer* aussi identiques que possible;
- 4° de laminier non seulement dans les conditions normales constituant la pratique courante des usines mais encore dans des conditions différentes. C'est ainsi qu'il fut décidé d'opérer dans chaque cas avec deux niveaux de température et de plus, dans le cas des fils, avec deux vitesses de refroidissement;
- 5° de contrôler les conditions par une même équipe de techniciens se déplaçant dans les diverses usines;
- 6° de mesurer chacune des propriétés physiques des produits laminés dans un même laboratoire et suivant une méthode opératoire bien définie;
- 7° de réaliser un nombre de mesures suffisamment élevé pour obtenir un résultat significatif.

L'aide financière de la Haute Autorité fut demandée en décembre 1954 et accordée en avril 1955.

Pour réaliser ce vaste programme, une quarantaine d'usines ont offert leur collaboration. Les spécialistes en ont retenu 16. Il s'agit de:

- ARBED, Aciéries Réunies de Burbach-Eich-Dudelange, S.A., Division de Belval, à Esch sur Alzette, Grand-Duché de Luxembourg.
- Forges de Clabecq, S.A., à Clabecq, Belgique.
- Forges et Aciéries de Commercy, à Commercy (Meuse), France.
- Hauts Fourneaux et Aciéries de Differdange-St. Ingbert-Rumelange (HADIR), Division de Differdange, à Differdange, Grand-Duché de Luxembourg.

- Hauts Fourneaux et Aciéries de Differdange - St. Ingbert - Rumelange (HADIR), Division de St. Ingbert, à St.-Ingbert (Sarre)
- Hauts Fourneaux, Forges et Aciéries de Thy-le-Château & Marcinelle, S.A., à Marcinelle, Belgique.
- Hüttenwerk Rheinhausen Aktiengesellschaft, à Rheinhausen, Allemagne.
- Ilva Bagnoli, à Bagnoli, Italie.
- Minière & Métallurgique de Rodange, S.A., Rodange, Grand-Duché de Luxembourg.
- Phoenix Rheinrohr A.G., Werk Ruhrort, Duisburg-Ruhrort, Allemagne.
- Société Anonyme des Forges et Aciéries de Dilling, Dillingen sur Sarre (Sarre).
- Société Anonyme des Laminoirs, Hauts Fourneaux, Forges, Fonderies et Usines de la Providence, Usines de Réhon près Longwy, à Réhon (Meurthe et Moselle), France
- Société des Hauts Fourneaux de la Chiers, Société Anonyme, à Longwy-Bas (Meurthe et Moselle), France.
- Theodor Wuppermann G.m.b.H., à Leverkusen-Schlebusch 1, Allemagne.
- Trierer Walzwerk Aktiengesellschaft, Werk Trier, à Trèves, Allemagne.
- Usine Sidérurgique du Nord de la France - Usinor, Usine de Louvroil, à Louvroil (Nord), France.

Les propriétés physiques (comportant 28.764 mesures) ont été déterminées dans 9 laboratoires de contrôle industriel et 2 instituts nationaux de recherches, à savoir:

- ARBED, Division de Belval, Grand-Duché de Luxembourg.
- Forges et Aciéries de Commercy, France.
- Forges de la Providence, Société Anonyme, à Marchienne-au-Pont, Belgique.
- Hösch Walzwerke Aktiengesellschaft, Hohenlimburg, Allemagne.
- Hösch Westfalenhütte Aktiengesellschaft, Dortmund, Eberhardstrasse 12, Allemagne.
- Hüttenwerke Ilsede Peine, Aktiengesellschaft, Peiner Walzwerk, à Peine, Allemagne.
- Istituto Siderurgico Finsider, Genova-Cornigliano, Italie.
- Max-Planck-Institut für Eisenforschung, à Düsseldorf, Allemagne.
- S.A. Cockerill-Ougrée, Division de Seraing, à Seraing, Belgique.
- Theodor Wuppermann G.m.b.H., Leverkusen-Schlebusch 1, Allemagne.
- Trierer Walzwerk Aktiengesellschaft, Werk Trier, à Trèves, Allemagne.

L'exploitation statistique des résultats (300.000 cartes mécanographiques) fut entreprise par le CNRM (Liège) et l'IRSid.

Ces quelques chiffres démontrent non seulement l'ampleur de la recherche mais encore et surtout son caractère international.

L'étude de la calamine qui constitue le deuxième objectif de la recherche laminage, fut entreprise sur des produits identiques, d'une part au Max-Planck-Institut à Düsseldorf par MM. W. DAHL, G. LEDER et W. LUEG, et d'autre part à l'IRSid à St.-Germain-en-Laye par MM. J. MOREAU, M. CAGNET et P. CHAUVÉAU. Le Max-Planck-Institut étudia la calamine par voie chimique et après l'avoir détachée de son substratum. Il mit au point une méthode originale pour déterminer l'importance du dépôt. L'IRSid, de son côté, étudia la formation de la calamine sur les lingots, demi-produits et produits finis par des exa-

mens effectués in situ et par voie physique. Les résultats de ces études ont déjà fait l'objet de publications dans la presse technique (1) (2) (3) (4), et on trouvera ci-joint, au Chapitre 5, un résumé de ces études (5).

Nous aurions voulu, en terminant cette introduction, remercier chacun des spécialistes qui nous ont apporté leur collaboration, chacune des usines et chacun des laboratoires qui ont bien voulu contribuer à l'exécution des essais. Nous aurions voulu mettre en évidence le rôle particulier qu'ils y ont joué. Or, nous avons reçu l'aide effective de 60 spécialistes et de 25 usines ou laboratoires. Ces deux chiffres sont impressionnants.

Qu'ils me permettent en conséquence de les remercier tous ensemble en soulignant tout particulièrement l'esprit de franche collaboration qui a toujours présidé aux discussions ou réunions qui eurent lieu.

Et cet aspect humain de la recherche Laminage qui la caractérise tout autant que son côté scientifique, technique ou international, est des plus réconfortant, si pas des plus important, car il démontre que des recherches scientifiques d'envergure peuvent être entreprise dans le cadre de notre Communauté.

P. COHEUR

- (1) *Etude des calamines de lingots*, par J. Moreau. *Revue de Métallurgie* 53, No. 9, septembre 1956, p. 703 - 714.
- (2) *Etude du calaminage des billettes*, par J. Moreau et M. Cagnet. *Revue de Métallurgie*, mai 1957, 54, No. 5, p. 383 - 403.
- (3) *Über den Einfluss der Walzbedingungen auf die Eigenschaften von kohlenstoffarmen Warmband. - Teil I. Zunderaufbau und Beizverhalten*, par Winfrid Dahl et Werner Lueg. - *Stahl und Eisen* 78 (1958) p. 368 - 377.
- (4) *Zunderuntersuchung an Walzdraht* par Paul Funke Jr. et Werner Lueg - *Stahl und Eisen* (à paraître).
- (5) *Nous tenons à signaler que des rapports complets sur tous les essais ont été adressés en 2 exemplaires aux institutions suivantes:*
  - Allemagne: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf;*
  - France: Institut de recherches de la Sidérurgie, St. Germain;*
  - Italie: Istituto Siderurgico Finsider, Genova - Cornigliano;*
  - Pays-Bas: Hoogovens en Staalfabrieken, IJmuiden;*
  - Belgique: Centre national de recherches métallurgiques à Liège et Charleroi.*

RECHERCHE INTERNATIONALE SUR LE LAMINAGE, ORGANISEE DANS LE  
CADRE DE LA C.E.C.A.

Sous-commission Feuillards

RAPPORT SUCCINCT SUR LE LAMINAGE ET LES ESSAIS  
EFFECTUES SUR FEUILLARDS

par M. P. BLAIN

BUT DES ESSAIS

Il s'agissait de déterminer quelle était l'influence sur la qualité de feuillards laminés à chaud de  $230 \times 2,5$  mm, de la nature du train de laminoirs utilisé pour le laminage final des produits ainsi que, pour chaque train, d'une variation de la température de laminage à la dernière cage. Les essais ont porté sur trois qualités d'acier extra-doux non calmé:

- a) un acier Thomas d'élaboration normale;
- b) un acier Thomas soufflé à l'oxygène;
- c) un acier Martin;

ceci dans le but de s'assurer que les trois qualités d'acier réagissaient bien de la même façon aux variations des conditions de laminage des feuillards.

Au cours de l'établissement du plan statistique, qui devait être suivi pour les essais, il a notamment été décidé de ne garder dans la recherche qu'un nombre limité de coulées afin d'obtenir un ensemble aussi homogène que possible. Ce nombre a été fixé à huit par nuance d'acier pour les essais sur feuillards.

Elaboration de l'acier et préparation des demi-produits.

Les coulées des trois nuances ont été élaborées dans la même usine sidérurgique, toutes précautions étant prise pour obtenir une homogénéité aussi grande que possible des diverses coulées pour chaque mode d'élaboration. On s'est astreint notamment à élaborer les huit coulées dans le plus court intervalle de temps possible. Cet intervalle de temps n'a pas dépassé 8 jours. Les limites d'analyse visées étaient les suivantes:

Mode d'élaboration	C	Mn	P	S	N <sub>2</sub>
Thomas normal	< 0,060	0,250 - 0,450	< 0,060	< 0,040	< 0,015
Thomas oxygène	< 0,060	0,250 - 0,450	< 0,035	< 0,030	0,005 - 0,007
Martin	< 0,080	0,250 - 0,450	< 0,040	< 0,040	< 0,007

L'acier Thomas a été élaboré dans des cornues de 18t. Aussi bien pour l'acier Thomas normal que pour l'acier Thomas à l'oxygène la fonte enfournée a été de composition très régulière. L'analyse moyenne de cette fonte était:

C: 3,72    Mn: 0,49    P: 1,85    S: 0,046    Si: 0,31

La durée du soufflage a été en moyenne de 14 min. 7 sec. pour l'acier Thomas normal et 14 min. 45 sec. pour l'acier Thomas à l'oxygène. Pour l'acier Thomas à l'oxygène la fonte a été soufflée tout d'abord à l'air pendant 8 minutes, puis jusqu'à la déphosphoration à l'air enrichi à 27% d'oxygène, enfin ce taux d'enrichissement a été porté à 35% pendant la déphosphoration.

On a terminé systématiquement assez froid, la température moyenne donnée par le pyromètre à immersion étant de 1600°. Une addition de 6 kg par tonne de spiegel a été faite dans la cornue et une addition d'environ 4 kg de ferro-manganèse chauffé au rouge a été faite, moitié dans la cornue et moitié dans la poche.

L'acier Martin a été élaboré dans des fours de 80t chauffés au goudron. Il a été chargé environ 220 kg de fonte par tonne d'acier de la composition suivante:

Mn: 2,1%    P: 0,69%    S: 0,04%    Si: 0,55%

La durée totale des coulées a varié entre 7h 30 et 8h 45. Une addition de 2 kg de ferro-manganèse ordinaire et de 3 kg de ferro-manganèse affiné par tonne a été faite dans le four. Enfin une addition de 0,2 kg à la tonne d'aluminium a été faite en poche.

Les analyses obtenues sur lingots sont les suivantes:

	C	Mn	P	S	N <sub>2</sub>
Acier Thomas normal					
Moyenne	0,048	0,334	0,039	0,030	0,010
Maximum	0,070	0,410	0,046	0,039	0,014
Minimum	0,030	0,240	0,035	0,016	0,007
Acier Thomas oxygène					
Moyenne	0,040	0,295	0,035	0,030	0,006
Maximum	0,050	0,320	0,035	0,039	0,007
Minimum	0,030	0,250	0,035	0,026	0,004
Acier Martin					
Moyenne	0,075	0,342	0,020	0,023	0,004
Maximum	0,090	0,400	0,026	0,026	0,004
Minimum	0,050	0,290	0,016	0,014	0,004

L'acier a été coulé en lingots de 4 à 5 tonnes en chute pour les deux nuances d'acier Thomas et en source pour l'acier Martin. La vitesse de coulée était de 2t par minute pour les lingots d'acier Thomas et de 0,5t par minute pour l'acier Martin coulé en source. Une très légère addition d'aluminium (de 20 à 35 gr à la tonne) a été faite en lingotière pour régler l'effervescence. Le plan statistique demandait 4 lingots par coulée. Les coulées d'acier Thomas comportaient précisément 4 lingots. Dans les coulées d'acier Martin 4 lingots ont été choisis au hasard dans *la seconde base de coulée en source*.

Les quatre laminoirs finisseurs devant laminier les feuilards avaient besoin de brames de section et de poids différents. Chacun des 4 lingots d'une coulée numérotés dans l'ordre de coulée pour les coulées Thomas et arbitrairement pour les coulées Martin devait donc être affecté au laminage des brames destinées à un des laminoirs finisseurs. Cette affectation a été faite avant la coulée. Les brames destinées aux trains modernes étant très lourdes il a été nécessaire de partir dans ce cas de lingots d'un poids suffisant permettant d'approcher du *chutage* très important prévu. C'est la raison pour laquelle le poids des lingots était différent quoiqu'ils aient tous été coulés dans la même lingotière, les lingots les plus lourds étant affectés aux deux laminoirs finisseurs modernes.

Le dégrossissage des lingots et le laminage des brames se sont effectués dans une usine autre que celle dans laquelle le métal a été élaboré. Les lingots ont donc dû être chargés froids dans les fours pits. Il s'agissait de cellules pouvant chauffer 8 à 10 lingots. Trois cellules étaient donc occupées par les 24 lingots appartenant aux trois nuances d'acier et destinés à un même laminoir finisseur. Pour que ce chargement de lingots froids ne perturbe pas trop la marche des trains dégrossisseurs il était effectué le dimanche. Le dégrossissage des lingots destinés aux quatre laminoirs finisseurs a donc été fait en quatre *campagnes*. Le chauffage dans les fours pits a duré de 8h 30 pour la première campagne, durée qui s'est révélée insuffisante, 11 heures environ pour les dernières. Les lingots ont été dégrossis au blooming en 17 passes, puis les ébauches obtenues ont été transformées, au cours de la même chaude, en brames de la section demandée sur un laminoir réversible de 950 en 2 ou 4 passes suivant le type de brame. Les produits ont ensuite été chutés et découpés à la cisaille. Le *chutage en tête* a varié de 30 à 42% et *en pied* de 13 à 20%. Les *écarts de chutage en tête* s'expliquent du fait que même au poids maximum qu'il a été possible d'obtenir les lingots étaient un peu insuffisants pour donner les grosses brames des trains modernes avec le chutage prévu (40% minimum en tête et 10% minimum en pied).

Pour s'assurer de l'homogénéité et de qualité des demi-produits obtenus des prélèvements ont été faits à *l'extrémité côté tête*, en un point voisin du milieu du lingot et à *l'extrémité côté pied*. Ces prélèvements ont été soumis à des essais macrographiques, à des essais d'attaque profonde à l'acide, enfin des *copeaux* ont été prélevés sur toute la surface de la section pour analyse chimique.

Les essais macrographiques et les essais d'attaque profonde à l'acide étaient destinés à vérifier si la *ségrégation* dans une section perpendiculaire à l'axe du lingot d'origine était bien celle que l'on pouvait attendre d'un bon acier effervescent. Ces essais n'ont rien décelé d'anormal. Ils ont montré que pour toutes les coulées le processus d'effervescence avait été très régulier.

Les analyses chimiques devaient permettre de s'assurer qu'il n'existait pas, du fait de la ségrégation majeure, une différence trop grande entre les points des demi-produits provenant de régions différentes du lingot. Le prélèvement pour analyse a été fait avec beaucoup de soin, les copeaux étant obtenus par rabotage d'une couche mince d'épaisseur régulière sur toute la section du demi-produit. Les résultats des dosages ont été soumis à une analyse statistique. D'après cette analyse, pour les teneurs en manganèse et en azote, l'influence de la ségrégation donne des variations plus petites que celles existant entre les teneurs moyennes des diverses coulées choisies pour l'essai. Pour le carbone et le phosphore cette influence, quand elle est significative, donne des variations du même ordre de grandeur que celles que l'on peut constater entre les teneurs moyennes de chaque coulée. Enfin pour le soufre cette influence est plus importante, mais les écarts observés, inévitables pour des produits provenant de lingots de poids relativement élevé, n'ont pas paru être de nature à influencer de façon gênante les résultats des essais.

#### LAMINAGE A CHAUD DES FEUILLARDS

Les figures 1, 2, 3 et 4 indiquent la disposition des quatre laminoirs ayant participé aux essais de laminage des feuillards. On voit que deux de ces laminoirs, le train M5 et le train M6 sont des trains continus modernes tandis que les deux autres A5 et A6 sont des trains de disposition ancienne. Il est à remarquer que dans chacun de ces groupes on trouve un *laminoir bobinant immédiatement le feuillard* et un *laminoir disposant le feuillard en boucles* sur une table avant de le bobiner.

Pour chaque laminoir les brames ont été classées au hasard en deux séries; l'une de ces séries a été laminée en s'efforçant de finir le laminage à la température de 920°, l'autre série de brames a été laminée en laissant le produit refroidir un peu au cours du laminage afin que la température à la dernière passe soit aussi voisine que possible de 820°.

Ces deux températures de finissage ont été obtenues, non pas en faisant varier la température de défournement, mais en laissant le produit attendre plus ou moins longtemps sur les rouleaux entre le groupe de cages dégrossisseuses et le groupe de cages finisseuses dans le cas des trains modernes et en un point choisi de façon analogue pour les trains anciens. Les températures ont été mesurées en trois points au cours du laminage: au voisinage du défournement de la brame, à la dernière passe et enfin au bobinage. Les températures de finissage effectivement réalisées sont suffisamment voisines des températures prescrites pour que l'essai puisse être considéré comme valable. Elles sont précisées par le tableau I donné en annexe. On constate que pour les trains modernes et pour la 1ère combinaison la température à la dernière cage a été un peu supérieure à celle prescrite (967 et 947° pour 920°). D'une façon générale pour la 2ème combinaison la température effective de laminage a été plus forte que celle prescrite (831, 846, 847 et 853° pour 820°). Ceci tient à la crainte qu'éprouvaient les

lamineurs de voir laminer à température aussi basse. Il en résulte que l'écart entre les températures effectives des 2 combinaisons est un peu faible pour les trains anciens (59 et 78° pour 100° demandé).

#### ESSAIS EFFECTUES SUR LES BANDES LAMINEES A CHAUD

Des prélèvements ont été effectués suivant des instructions précises, après élimination d'une certaine chute aux deux extrémités, d'autre part au milieu de la longueur des bandes. Dans chaque prélèvement des échantillons ont été découpés pour les essais de traction, les essais d'emboutissage, les essais micrographiques et pour l'étude de la calamine. Après prélèvement les bandes ont été transformées en laminés à froid et divers essais ont été effectués sur ces produits. Un tableau joint au présent rapport donne la nomenclature et le nombre des divers essais effectués (tableau II).

#### RESULTATS OBTENUS.

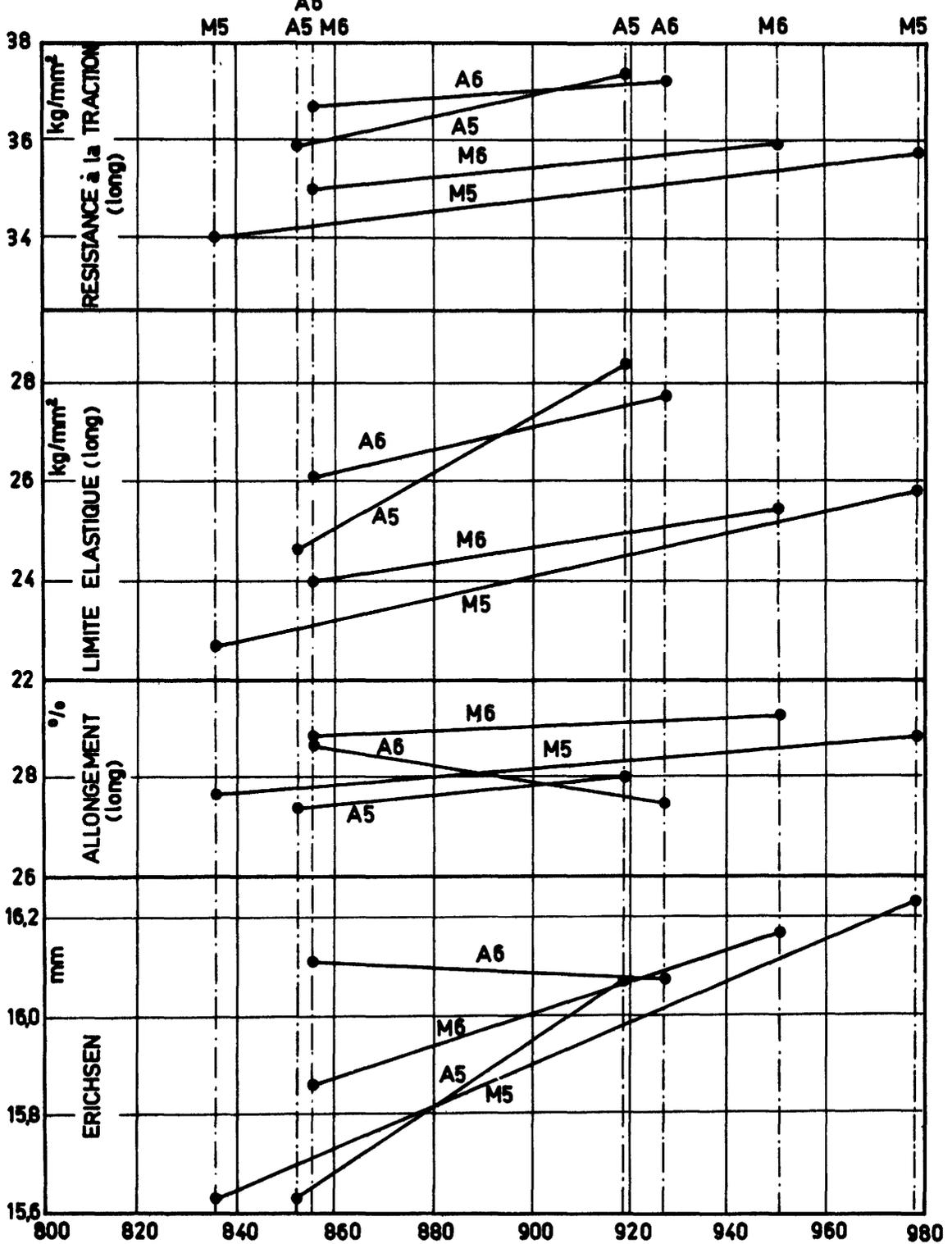
##### a) Essais mécaniques

Un premier travail de l'exploitation statistique des résultats à consisté à comparer entre eux les résultats obtenus au cours des diverses séries d'essais effectués sur un même lot. On a constaté un certain décalage entre les deux séries d'essais de traction effectués sur les mêmes lots de prélèvements pour les valeurs de la limite élastique, de la charge de rupture et de l'allongement. Cet écart est particulièrement net pour la limite élastique, la valeur moyenne obtenue au cours du 2ème essai dépassant de  $1 \text{ kg/mm}^2$  environ la valeur moyenne obtenue au cours du 1er essai. La différence est dans le même sens mais nettement plus faible ( $0,2 \text{ kg/mm}^2$ ) pour la charge de rupture. Ces écarts sont vraisemblablement dus au vieillissement intervenu dans l'intervalle de temps séparant les deux séries d'essais. On n'observe pas de différence systématique pour l'allongement et l'essai Erichsen.

Une étude statistique ultérieure a permis de déterminer l'écart existant entre les résultats obtenus aux essais effectués sur des prélèvements provenant de la région voisine de la tête et de celle voisine du pied des lingots. Comme il fallait s'y attendre les prélèvements provenant de la tête des lingots donnent en moyenne des limites élastiques un peu plus fortes ( $+ 1 \text{ kg/mm}^2$ ), des résistances à la traction également un peu plus fortes ( $+ 0,9 \text{ kg/mm}^2$ ) et des allongements un peu plus faibles ( $- 0,7\%$ ) que les prélèvements provenant de la région du lingot plus voisine du pied. Mais ces différences sont faibles et comme dans chaque lot on trouve une proportion sensiblement égale de demi-produits provenant de la région voisine de la tête et de la région voisine du pied du lingot, ces différences n'auront aucun effet sur les valeurs moyennes.

Une comparaison a enfin été faite entre les résultats obtenus avec les

RESULTATS D'ESSAIS Prélèvement médian



trois nuances d'acier étudiées. On constate une différence significative du point de vue statistique entre les résultats obtenus avec ces diverses nuances d'acier. Mais comme elles réagissent toutes en général de la même façon aux conditions de laminage, on peut sans inconvénient se servir des résultats moyens donnés par les diverses séries d'essais sur les trois nuances d'acier pour déterminer la réponse aux questions faisant l'objet de la recherche: influence de la nature du train et de la température de laminage sur la qualité des feuillards laminés à chaud. Ce sont ces chiffres moyens qui figurent dans les tableaux suivants:

INFLUENCE DE LA NATURE DU TRAIN

Train	Essais de traction en long				Essais de traction en travers				Essais d'embou-tissage
	E	R	E/R	A	E	R	E/R	A	
M5	24,44	35,80	68,05	27,86	27,01	37,05	72,84	27,98	15,81
M6	24,96	36,06	68,96	28,84	27,04	36,70	73,53	29,02	15,96
A5	26,29	36,83	71,14	27,94	28,49	37,10	76,73	28,84	15,84
A6	27,13	37,19	72,80	28,01	28,72	37,13	77,12	29,59	16,03
Moy.	25,70	36,47	70,24	28,16	27,84	37,00	75,05	28,86	15,91

On constate que les différences entre ces valeurs moyennes des caractéristiques sont très faibles. On peut remarquer que les trains modernes donnent des valeurs un peu plus faibles pour la limite élastique et la résistance à la rupture que les trains anciens. En ce qui concerne l'allongement et la *flèche à l'essai Erichsen* il n'y pas a de différence systématique entre trains modernes et trains anciens. On remarque un léger avantage des trains M6 et A6 en ce qui concerne ces caractéristiques de *ductilité*. Nous reviendrons plus loin sur cette question.

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE LAMINAGE

	Essais de traction en long				Essais de traction en travers				Essais d'embou-tissage
	E	R	E/R	A	E	R	E/R	A	
Combinaison à haute température (920°)	26,84	36,62	73,09	28,39	28,27	36,45	77,46	29,83	16,16
Combinaison à basse température (820°)	24,35	35,46	68,43	28,15	26,95	36,65	73,36	28,42	15,80

On voit que les résultats des essais de traction et d'emboutissage sur bandes laminées à chaud ne mettent que faiblement en évidence l'influence défavorable du laminage à basse température. La différence la plus nette apparaît pour la limite élastique qui est plus faible dans le cas du laminage à basse température. Néanmoins, bien que les différences soient faibles, l'analyse statistique, faite séparément pour chacun des trains, a montré que l'effet de la température de laminage sur les caractéristiques mécaniques était significatif dans la grande généralité des cas.

Nous avons examiné successivement, en comparant des moyennes générales de résultats d'essais, l'effet du train et de la combinaison de laminage sur les propriétés mécaniques des bandes laminées à chaud. Il est intéressant pour avoir une vue d'ensemble de la question d'examiner les diagrammes ci-contre qui donnent les valeurs moyennes des caractéristiques obtenues par train et par température de laminage. Nous n'avons pris pour ces moyennes que les valeurs obtenues lors des essais effectués sur le prélèvement médian qui représente certainement beaucoup plus fidèlement la qualité d'ensemble de la bande que les prélèvements extrêmes.

Ces diagrammes mettent bien en évidence ce fait déjà signalé que les trains anciens donnent des bandes ayant des limites élastiques et des résistances à la traction un peu plus fortes que des trains modernes. Ils montrent également que la limite élastique et la résistance à la traction croissent légèrement dans tous les cas lorsque l'on passe de la température de 820° à celle de 920°.

En ce qui concerne les caractéristiques de ductilité, allongement et indice Erichsen on constate que les résultats classent les trains très nettement en deux catégories, d'une part les trains A6 et M6, d'autre part les trains A5 et M5. Il est intéressant de noter que pour les trains A6 et M6 la bande est *serpentée sur les plaques* avant d'être bobinée, tandis que pour les trains A5 et M5 la bande en sortant de la dernière passe va directement à la bobineuse. On voit que le refroidissement occasionné par le serpentage de la bande avant bobinage atténue l'effet défavorable du laminage à basse température sur les caractéristiques de ductilité de la bande laminée à chaud.

#### b) Essais micrographiques

Trois prélèvements ont été effectués sur chaque bande, un à chaque extrémité et un au milieu de la longueur, sauf pour les quatre dernières coulées laminées sur les trains anciens pour lesquelles on n'a pas réalisé de *prélèvement médian*. Pour chaque prélèvement l'examen micrographique a porté sur une surface de 25 mm<sup>2</sup> *en peau* et *à coeur*. Il sera fait ici abstraction des résultats de dénombrement des divers types d'inclusions, la présence des inclusions ne pouvant évidemment dépendre du type de train ni des conditions de laminage. Ces *dénombrements* n'ont été faits que pour le cas où l'on aurait eu besoin de s'y reporter pour trouver une explication à un écart anormal dans les caractéristiques mécaniques. Ce cas ne s'est pas présenté.

L'aspect de la perlite fut apprécié d'après la classification suivante:

1. perlite lamellaire en prépondérance;
2. perlite lamellaire et *dégénérée* en quantités égales;
3. perlite dégénérée en prépondérance;
4. perlite lamellaire *non résolue et dégénérée*,

Notons que la catégorie No. 1, perlite lamellaire en prépondérance, ne se rencontre pas dans ces lots de bandes (1 seule micrographie). En peau la presque totalité des échantillons examinés appartient à la catégorie No. 3, perlite dégénérée en prépondérance. A coeur on trouve un certain pourcentage d'aspects des catégories 4 et 2 mais c'est beaucoup la catégorie 3 qui l'emporte. L'influence du type de train et des conditions de laminage est assez faible. Tout au plus peut-on dire que le laminage à basse température provoque une augmentation du pourcentage de l'aspect 3, perlite dégénérée en prépondérance.

L'examen des joints a conduit à la conclusion que le pourcentage de micrographies avec beaucoup *d'impuretés aux joints* augmente lorsque la température de laminage diminue. Cet effet est plus apparent pour les trains modernes que pour les trains anciens de sorte que pour la température de laminage de 820° ce sont les trains modernes qui donnent la plus grande proportion de micrographies avec impuretés dans les joints de grains.

Les grains sont sans allongement dans tous les prélèvements. Les structures rubanées sont rares (14 cas sur 1048 micrographies à coeur et zéro cas en peau). C'est le train A6 qui donne le pourcentage le plus élevé de structures rubanées.

Les observations les plus intéressantes sont celles concernant la grosseur du grain.

Une haute température de laminage donne un grain fin. L'effet est général et très important. Pour la combinaison à haute température les trains anciens donnent un grain plus fin que les trains modernes. A basse température le grain le plus fin est observé par le train A6 *en axe et rive* et pour le train M6 *en axe*. Il y a lieu de rapprocher cette observation de celle faite plus haut au sujet des caractéristiques mécaniques de ductilité, allongement et indice Erichsen (les trains A6 et M6 sont ceux qui serpentent la bande avant de la bobiner). Quelle que soit la combinaison le grain le plus gros apparaît pour les bandes laminées sur le train M5. Les examens micrographiques ont montré que d'une façon générale le laminage à haute température donne un fort pourcentage de micrographies avec une seule grosseur de grain ou une grosseur de grain prédominante avec un second type de grain peu fréquent (< 20%). Au contraire le laminage à basse température donne un très fort pourcentage de micrographies avec grain irrégulier: une grosseur de grain prédominante et un second type de grain fréquent (30%) ou 3 grosseurs de grain.

#### LAMINAGE A FROID

Dans le but de vérifier si les conditions de laminage à chaud des feuillards exerçaient une action sur les caractéristiques des feuillards laminés à froid, les

bandes obtenues au cours des essais de laminage à chaud ont été laminées à froid. Le feuillard laminé à chaud de 2,5 mm d'épaisseur a successivement été amené à 1,2 mm (écrouissage 52%) recuit, amené de 1,2 à 0,6 (écrouissage 50%) recuit, amené enfin de 0,1 à 0,275 (écrouissage 54%) puis recuit. Les recuits ont eu lieu à 700, 720°. Des essais ont été effectués sur le feuillard de 0,6 mm recuit et sur le feuillard de 0,275 mm recuit.

Les essais réalisés sont les suivants:

- 1) sur les feuillards de 0,6 et 0,27 mm recuits:
  - a) un essai de traction en long et un *en travers* par prélèvement;
  - b) trois essais d'emboutissage par prélèvement (un en axe et deux en rive);
- 2) sur les feuillards de 0,27 mm:
  - a) 4 essais de dureté par prélèvement:
    - en axe et en peau;
    - en axe et à coeur;
    - au 1/3 de la largeur en peau;
    - au 1/3 de la largeur à coeur;
  - b) un essai de pliage alterné en long et un essai de pliage alterné en travers.

MOYENNES DES PRELEVEMENTS

			Train M5		Train M6		Train A5		Train A6	
			900	800	900	800	900	800	900	800
Feuillards 0,6 mm	Essais de traction en long	E	25,63	24,03	23,37	22,73	26,07	24,50	25,85	23,70
		R	36,90	35,60	34,57	34,60	35,47	34,80	35,70	34,25
		All.	28,87	29,66	33,05	31,17	31,43	32,50	32,35	32,85
	Essais en traction en travers	E	26,73	26,13	25,00	24,93	26,70	26,40	28,55	25,35
		R	36,77	36,40	35,00	35,27	35,70	35,60	35,85	34,65
		All.	30,60	32,40	34,70	34,07	35,00	34,50	35,95	36,65
Erichsen		9,74	9,86	10,13	10,15	10,03	10,01	9,95	10,12	
Feuillards 0,3 mm	Essais de traction en long	E	25,23	24,93	26,60	26,20	27,23	27,10	28,15	27,15
		R	35,56	35,97	36,67	36,53	37,07	36,97	38,60	37,60
		All.	26,13	25,90	26,40	24,97	25,60	25,70	25,55	25,35
	Essais de traction en travers	E	25,77	26,27	27,97	27,77	29,07	28,70	29,65	28,60
		R	35,70	36,57	36,80	37,03	37,40	37,33	38,35	37,70
		All.	29,20	28,93	28,73	28,50	25,93	26,80	28,40	28,30
	Erichsen		9,33	9,23	8,55	8,73	8,60	8,64	8,76	8,62
	Dureté	Peau	108,38	106,92	111,00	112,10	117,90	117,40	115,90	114,00
		Coeur	128,57	122,45	127,00	125,20	123,60	124,40	114,70	115,00
Pliage alterné	Long	12,90	12,67	11,90	11,87	12,00	11,57	14,85	13,80	
	Trav.	15,90	15,60	15,40	15,63	15,23	14,43	18,85	18,00	

## RESULTATS OBTENUS

On remarque tout d'abord en examinant l'ensemble des résultats que l'effet de la nuance d'acier se fait sentir de façon normale. Mais comme l'effet du laminoir et de la combinaison de laminage est très peu sensible et est le même pour les trois nuances en question, nous n'examinerons que les résultats moyens obtenues.

Une autre remarque d'ordre général, qui d'ailleurs peut surprendre, est que les résultats des essais de traction et de pliage en long et en travers sont systématiquement décalés, les résultats obtenus aux essais en travers étant légèrement meilleurs que ceux obtenus aux essais en long (limite élastique, charge de rupture et allongement légèrement plus forts en travers qu'en long).

En ce qui concerne les essais d'emboutissage les essais en rive donnent des résultats voisins mais systématiquement plus forts que les essais en axe, ce qui est normal.

Quant aux essais de dureté les valeurs en axe et au 1/3 de la largeur coïncident, mais on trouve systématiquement une différence de l'ordre de 10 points Vickers entre la dureté en peau et la dureté à coeur.

Le tableau ci-contre donne les résultats moyens obtenus par train et par combinaison de laminage.

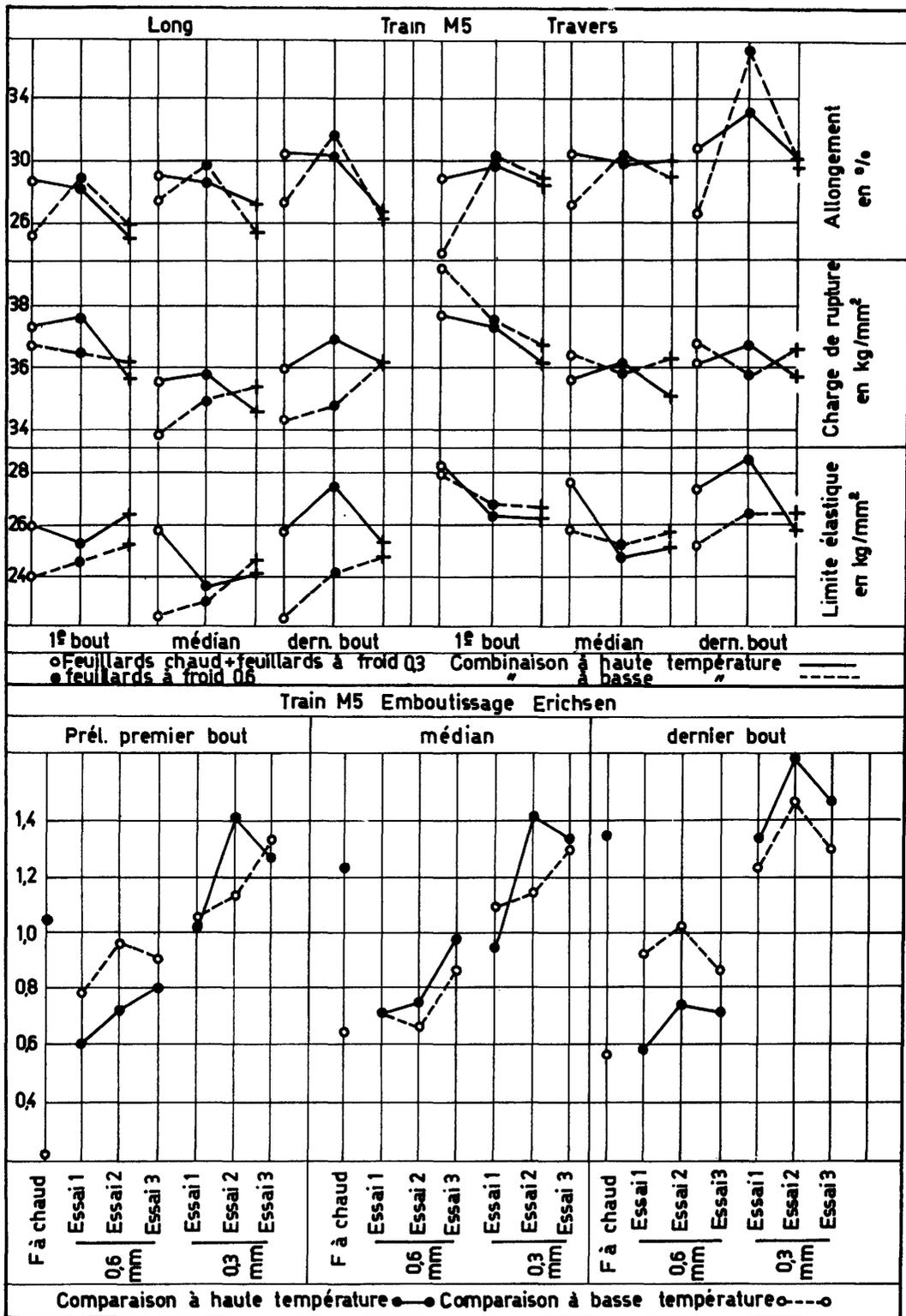
On constate que l'effet du train et de la combinaison de laminage est rarement significatif. Les différences lorsqu'il en existent ne sont pas systématiques et ne permettent pas de tirer de conclusions.

Ainsi à l'épaisseur de 0,6 ce sont les bandes du train M5 qui donnent la moins bonne ductilité, tandis qu'à l'épaisseur de 0,27 ce sont ces mêmes bandes qui donnent les meilleurs résultats pour les caractéristiques de ductilité (allongement et indice Erichsen).

D'ailleurs les écarts observés sur feuillards laminés à chaud s'estompent après laminage à froid et ceci d'autant plus que la réduction d'épaisseur est plus importante. Le diagramme ci-contre donne un aperçu général des résultats d'essais obtenus pour le train M5 pour lesquels cette tendance à l'uniformisation des résultats est particulièrement nette.

A noter que pour pouvoir porter sur le même diagramme les indices Erichsen pour les bandes laminées à chaud et les bandes laminées à froid de 0,6 et 0,27 d'épaisseur, nous avons retranché 15 mm des indices des laminés à chaud, 9 mm des indices des feuillards de 0,6 et 8 mm des indices des feuillards de 0,27 mm

En ce qui concerne l'état de surface des bandes, toutes celles-ci quel que soit le laminoir producteur ont pu être décapées normalement et ont pu être présentées, bien débarassées de leur oxyde au laminoir à froid. Au cours du laminage à froid et au cours de l'examen des produits finis, aucune différence dans l'état de surface des bandes n'a pu être décelée.

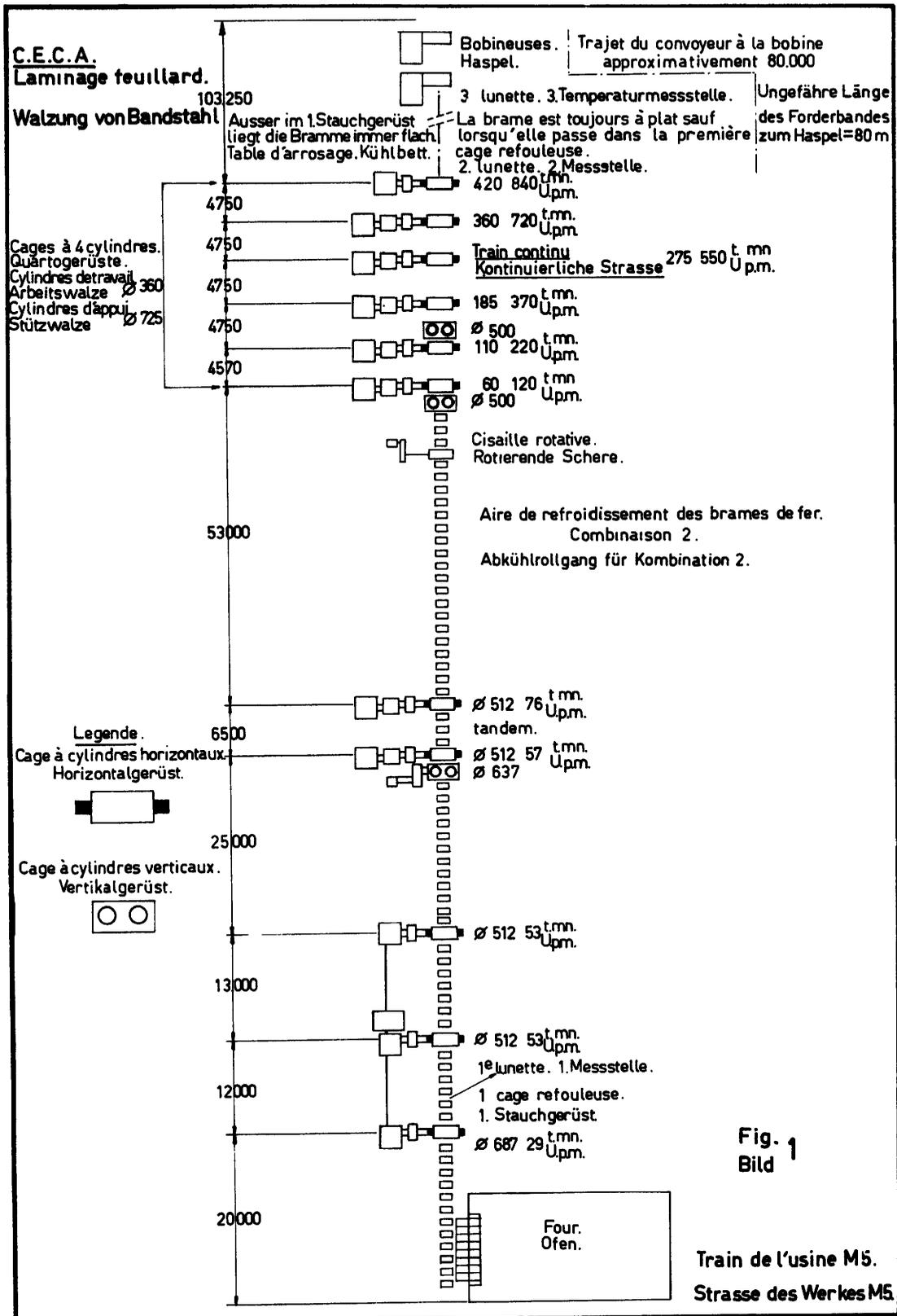


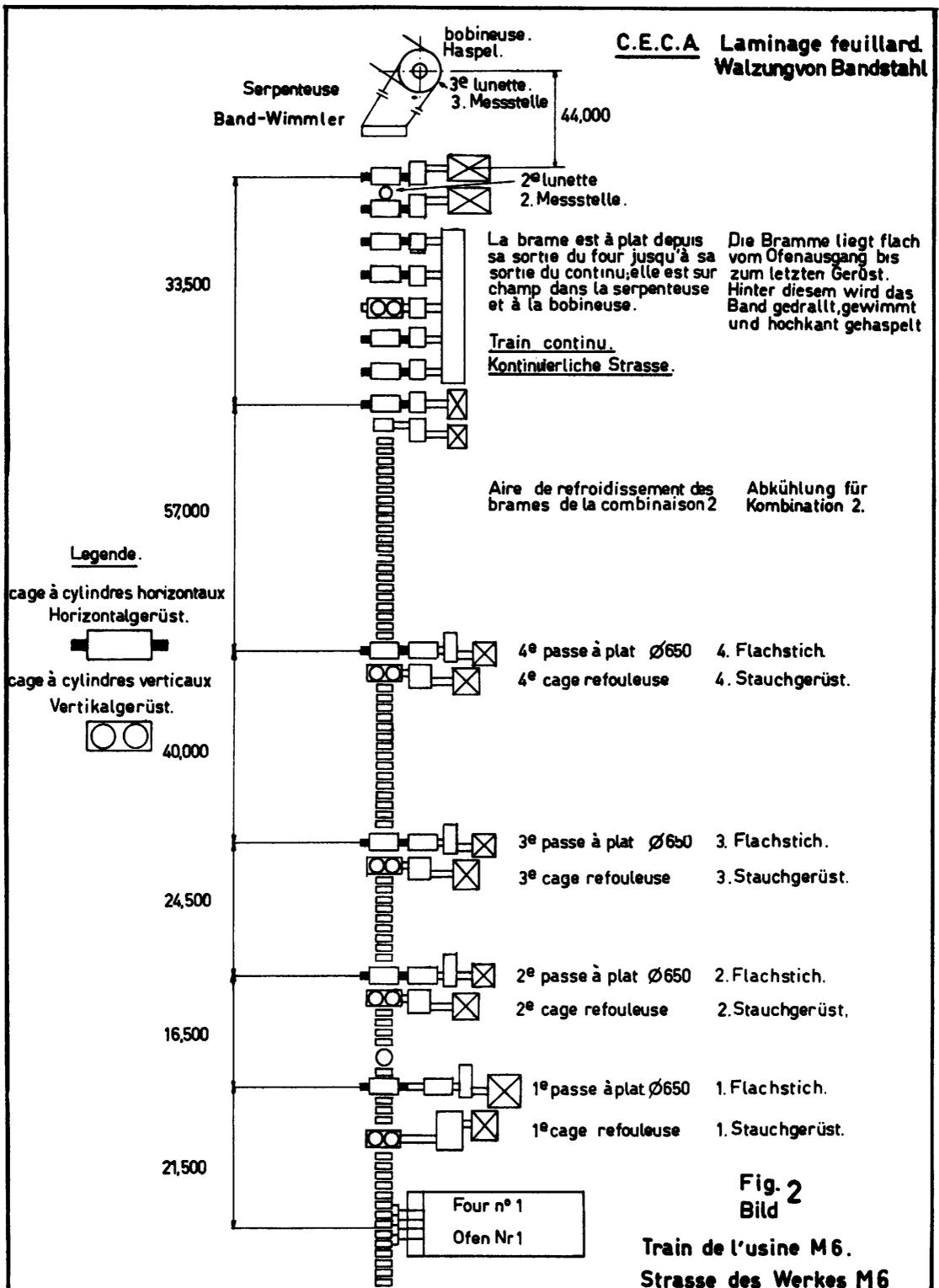
### Conclusions pratiques et considérations d'ordre métallurgique

Le laminage à 950° donne dans l'ensemble des feuillards laminés à chaud ayant des caractéristiques mécaniques un peu meilleures que le laminage à 850°. On doit donc donner la préférence au laminage à haute température, cette recommandation pouvant toutefois être tempérée par des considérations relatives à l'état de surface, l'épaisseur de la couche de calamine croissant très vite avec la température.

Il est particulièrement intéressant de constater les différences observées lors du laminage à 850° entre les produits obtenus sur les trains qui bobinent immédiatement et les trains qui serpentent avant de bobiner. L'effet défavorable, au point de vue de l'inégalité du grain, effet qui se répercute sur les propriétés mécaniques, du laminage à basse température, est amplifié par le séjour prolongé à température relativement élevée dans le coil bobiné immédiatement après la dernière passe. L'attention est appelée à nouveau sur l'intérêt d'un refroidissement rapide de la bande entre la passe finisseuse et le bobinage.

Une amélioration de l'équipement de refroidissement de la bande entre cage finisseuse et bobinoirs pour les trains à feuillards paraît désirable.





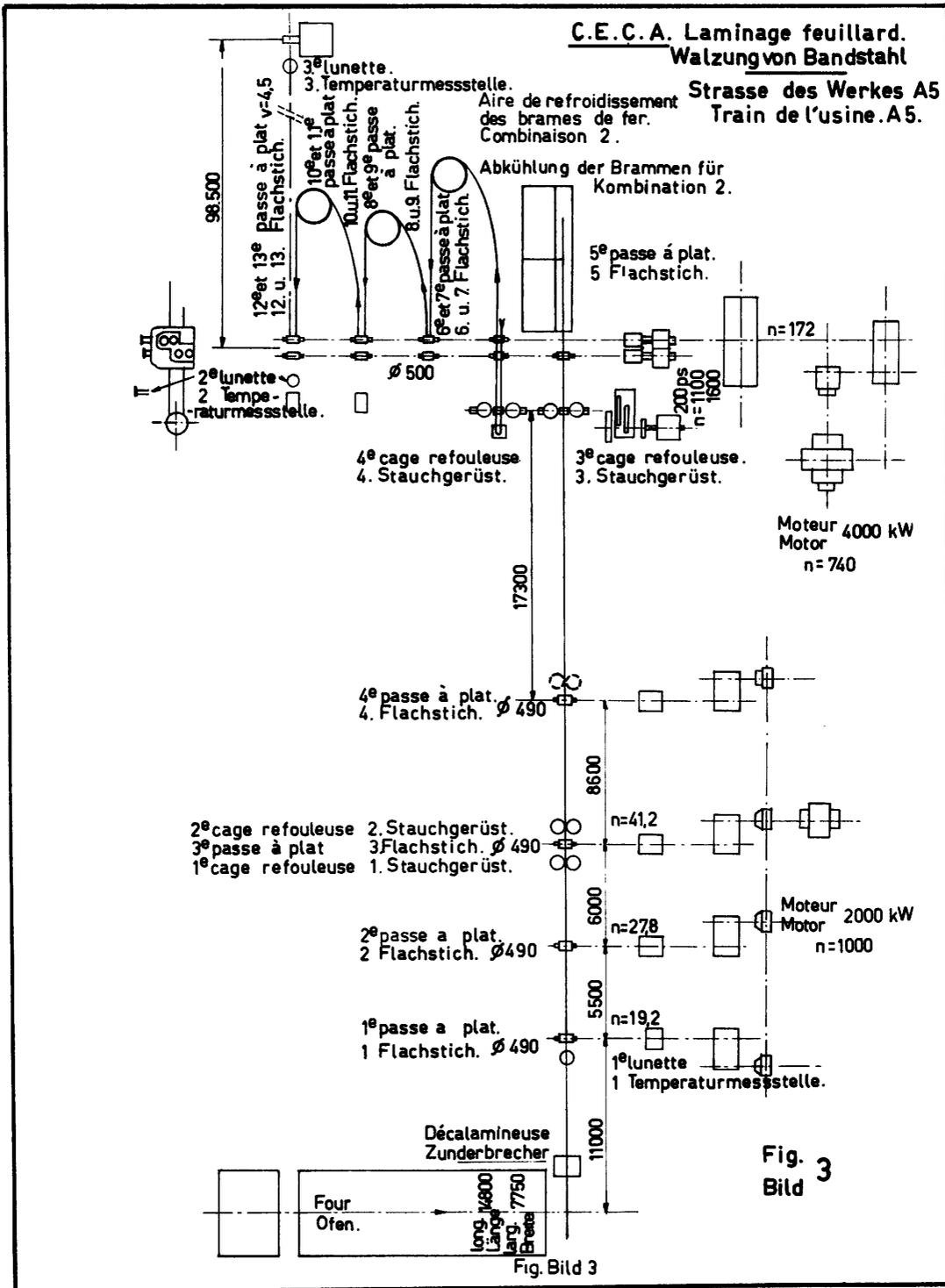
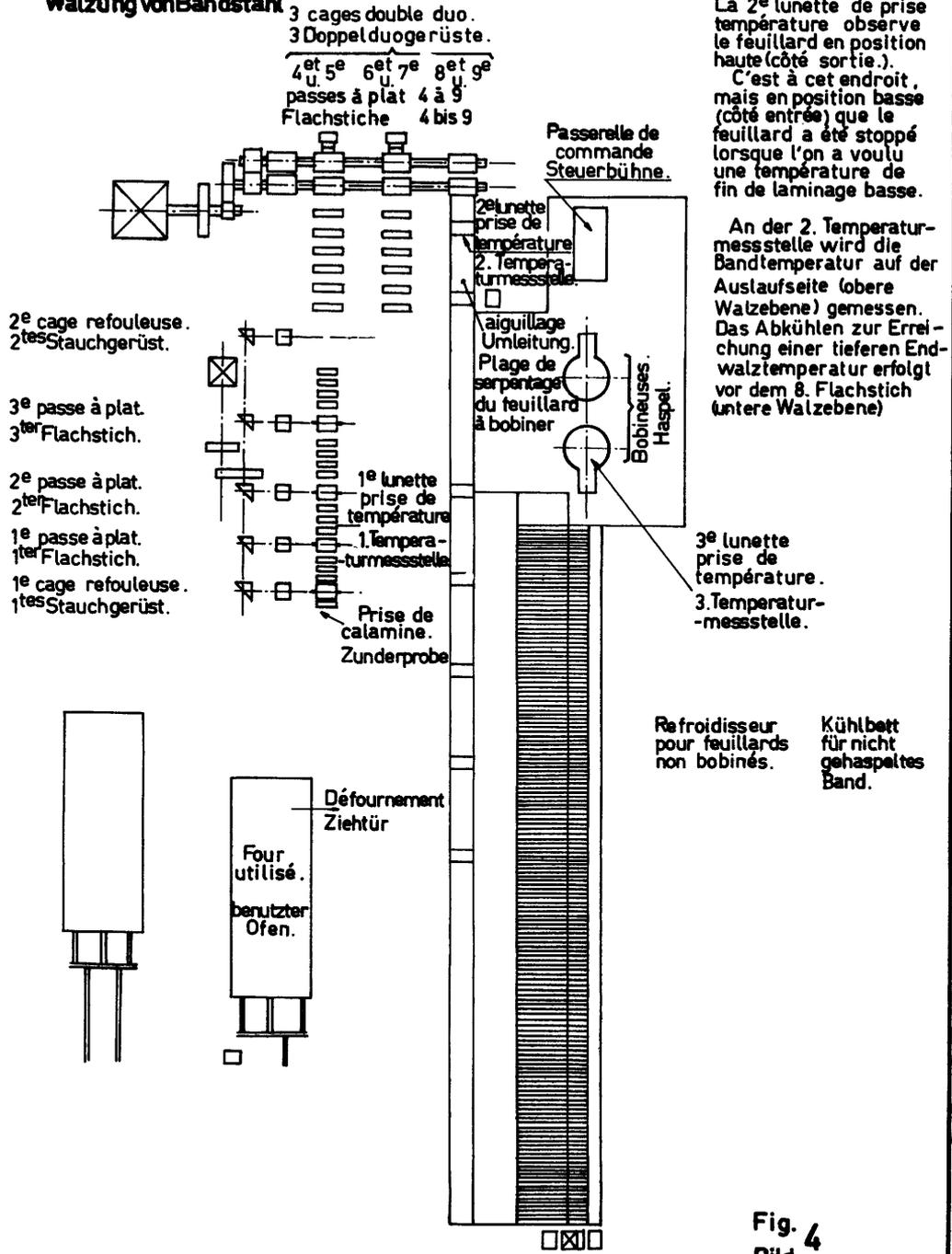


Fig. Bild 3

**C.E.C.A. Laminage feuillard.**  
**Walzung von Bandstahl**



La 2<sup>e</sup> lunette de prise température observe le feuillard en position haute (côté sortie). C'est à cet endroit, mais en position basse (côté entrée) que le feuillard a été stoppé lorsque l'on a voulu une température de fin de laminage basse.

An der 2. Temperaturmessstelle wird die Bandtemperatur auf der Auslaufseite (obere Walzebene) gemessen. Das Abkühlen zur Erreichung einer tieferen Endwalztemperatur erfolgt vor dem 8. Flachstich (untere Walzebene)

Refrigerateur pour feuillards non bobinés. Kühlbett für nicht gehaspeltes Band.

Train de l'usine A6.  
 Strasse des Werkes A6.  
 Fig. 4  
 Bild.

Fig. 4  
 Bild

RESULTATS DONNES PAR LES MESURES DE TEMPERATURE

Tableau I

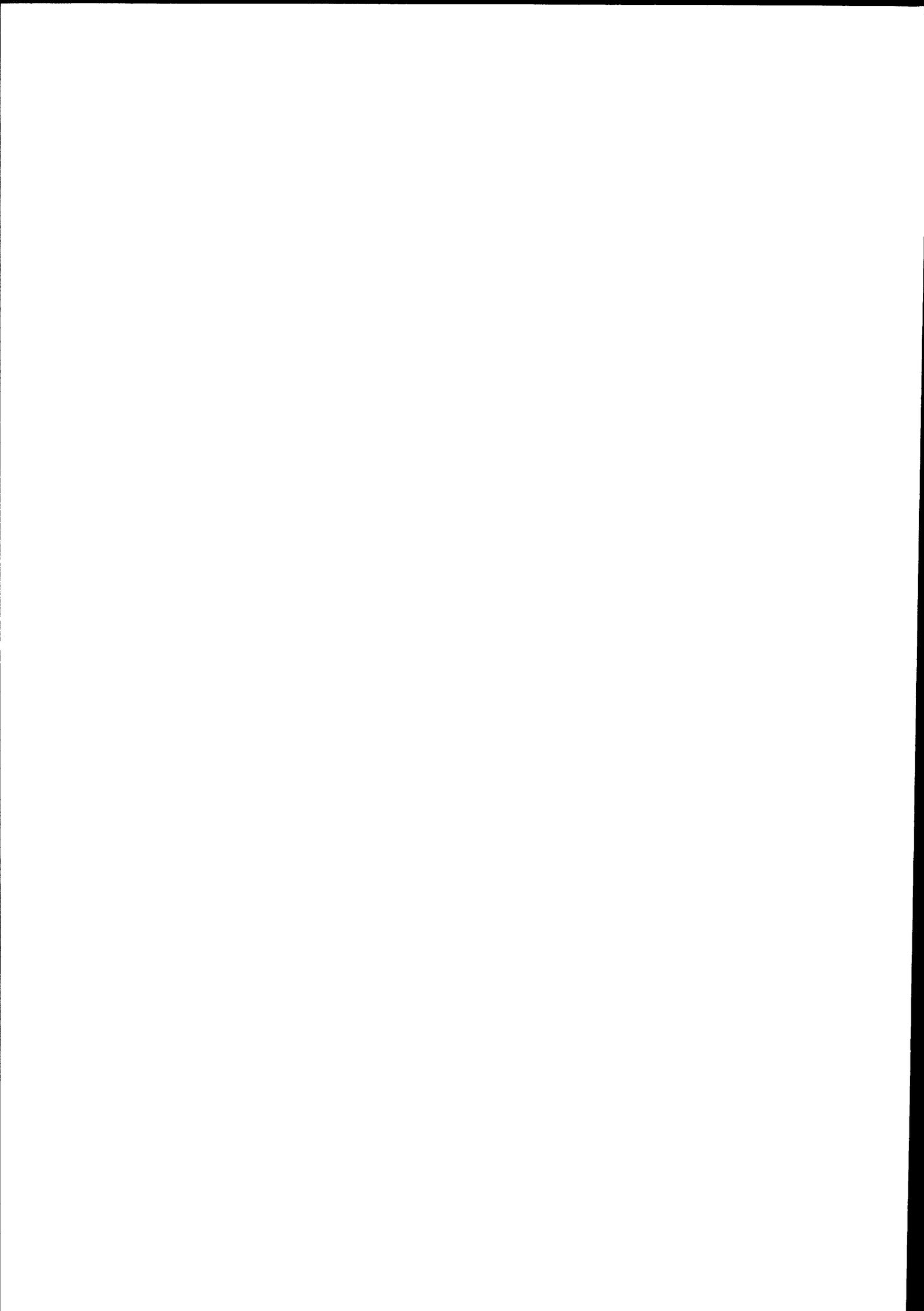
	Usine	M5		M6		A5		A6	
		1	2	1	2	1	2	1	2
	Combinaison								
Chiffres relatifs au défournement	1 Températures au défournement, milieu des brames								
	moyenne °C	1212	1210	1161	1154	1203	1203	1240	1181
	étendue °C	50	60	55	85	140	80	65	60
	2 Différences des températures, moyennes des deux niveaux de défournement		2		7		0		59
	Température de fin de laminage visée	920	820	920	820	920	850	920	850
Chiffres relatifs à la fin de laminage	3 Température de fin de laminage au milieu du feuillard								
	moyenne °C	967	831	947	846	906	847	931	853
	étendue °C	35	90	40	60	50	45	35	35
	4 Différence entre les deux températures températures de fin de laminage		136		101		59		78
	5 Différence moyenne entre les deux extrémités du feuillard	9	28	20	25	29	9	19	0
	6 Baisse moyenne de température entre le défournement et la fin de laminage	245	379	214	308	297	356	309	328
Chiffres relatifs aux bobineuses	7 Température à l'entrée de la bobineuse au milieu du feuillard								
	moyenne °C	832	702	730	688	756	716	780	716
	étendue °C	30	50	115	60	90	30	80	65
	8 Baisse moyenne de température entre la dernière cage et la bobineuse	135	129	217	158	150	131	151	137

**Tableau II**

**ESSAIS SUR PRELEVEMENT DE FEUILLARD**

Sur feuillard laminé à chaud  
épaisseur 2,5 mm

Essais	Nombre d'essais par prélèvement	Total
Traction	4	2088
Emboutissage	4	2088
Micrographie	2	1044
Contrôle des dimensions	(6 par bobine)	1140
Sur feuillard laminé à froid épaisseur 0,6 mm		
Traction	2	816
Emboutissage	3	1224
Sur feuillard laminé à froid épaisseur 0,27 mm		
Traction	2	816
Emboutissage	3	1224
Pliages alternés	2	816
Dureté Vickers	2	816
Micrographie	1	408



RAPPORT SUCCINCT SUR LE LAMINAGE ET LES ESSAIS EFFECTUES  
SUR RONDS DE 20 MM DE DIAMETRE

par M. G. LEDER, Ing. Dipl., Düsseldorf

1. OBJET DE LA RECHERCHE

Il s'agissait d'étudier dans quelle mesure la qualité des ronds de 20 mm est influencée ou modifiée par la nature du train et le type de cannelures, ainsi que par la température de laminage. Les essais devaient être réalisés sur de l'acier doux ordinaire de trois nuances différentes, à savoir:

- a) de l'acier Thomas normal,
- b) de l'acier Thomas à l'oxygène
- c) de l'acier Martin.

Pour chacune des trois nuances d'acier, les essais ont été exécutés sur 8 coulées, laminées selon un programme défini de façon à obtenir le demi-produit nécessaire aux essais.

2. LES DEMI-PRODUITS

L'acier des essais a été élaboré dans une même usine sidérurgique, toutes précautions étant prises afin d'obtenir pour les essais, un demi-produit homogène,

Avant le début des travaux, les limites suivantes ont été fixées pour l'analyse des trois qualités:

ANALYSE PRESCRITE

	C %	Mn %	P %	S %	N <sub>2</sub> %
Thomas normal	0,08	0,25 - 0,40	0,05 - 0,08	0,05	0,01 - 0,015
Thomas à oxygène	0,08	0,25 - 0,40	0,035	0,03	0,005 - 0,007
Siemens-Martin	0,08	0,25 - 0,40	0,040	0,04	0,007

Pour obtenir une meilleure uniformité de la fonte enfournée, les 8 coulées nécessaires aux essais ont été élaborées en deux journées consécutives pour les nuances Thomas et en quatre journées consécutives pour l'acier Martin.

Les analyses de la fonte employée étaient d'une uniformité remarquable. Les valeurs moyennes pour l'acier Thomas normal et l'acier Thomas à l'oxygène étaient de:

3,65 %C, 0,091% Mn, 1,90 %P, 0,048 %S, 0,28 %Si.

Les 6 convertisseurs ont une capacité de 16t chacun. Pour les charges on a opéré avec la même hauteur de bain et dans les mêmes conditions de travail, de sorte que les temps de soufflage et de coulée ont pratiquement été les mêmes et les températures de coulée n'ont que très peu différé les unes des autres. Toutes les charges Thomas ont été coulées en chute.

Dans l'aciérie Martin, également, on a opéré avec le même enfouement et suivant la même technique pour toutes les coulées d'essais. Les fours Martin chauffés avec un mélange de gaz de haut fourneau, gazogène et de four à coke avaient une capacité de 80t. L'acier Martin fut coulé en source. Toutes les charges sélectionnées pour les essais présentaient des analyses situées à l'intérieur des limites prescrites. Les chiffres moyens ci-dessous ont été obtenus lors de l'analyse des charges:

ANALYSES MOYENNES

	C %	Mn%	P %	S %	Cu %	N, %
Thomas normal	0,047	0,35	0,060	0,025	0,056	0,013
Thomas à l'oxygène	0,056	0,36	0,031	0,023	0,065	0,006
Martin	0,074	0,34	0,016	0,026	0,140	-

Les charges Thomas ont donné chacune 4 lingots qui ont été utilisés pour les essais. Les charges Martin ont donné chacune 4 sources de 4 lingots mais, seuls les 4 lingots de la deuxième base ont été utilisés pour les essais. Le poids des lingots allait de 4,5 à 5,5t. Ils avaient une section de 635/575 mm et furent placés chauds dans les fours pits. On utilisa à cet effet des fours pits modernes à grande capacité. Toutefois, certains lingots ont été mis dans des fours secs.

Pour le chauffage en fours pits, on s'est efforcé autant que possible, d'obtenir une bonne constance du mode opératoire: durée de séjour, atmosphère, température, etc. . . . Les lingots ont ensuite été laminés en un bloom de 185 mm<sup>2</sup> sur un train blooming à 19 passes. La température moyenne des blooms à la cisaille était de:

Acier Thomas normal                    1238°  
 Acier Thomas à l'oxygène            1244°  
 Acier Martin                                1240°

Après l'éboutage, les blooms ont été laminés sans chauffage intermédiaire

en billettes de la dimension demandée sur un train trio à trois cages de 850. Les 4 trains finisseurs choisis devaient recevoir les dimensions suivantes de billettes:

Train A 3	60 de côté
Train M 3	64 de côté
Train M 4	75 de côté
Train A 4	85 de côté

Afin d'obtenir malgré les différents formats des billettes, des lots de demi-produits pouvant être considérés comme identiques, un programme de répartition des lingots a été établi, en étroite collaboration entre les métallurgistes; les ingénieurs de laminage et les statisticiens; le schéma de ce programme est indiqué au tableau suivant:

REPARTITION DES LINGOTS ENTRE LES 4 TRAINS FINISSEURS

No. de la charge d'essai par nuance	Lingot No. 1	Lingot No. 2	Lingot No. 3	Lingot No. 4
1	60 de côté	64 de côté	75 de côté	85 de côté
2	64 " "	60 " "	85 " "	75 " "
3	75 " "	85 " "	60 " "	64 " "
4	85 " "	75 " "	64 " "	60 " "
5	75 " "	85 " "	64 " "	60 " "
6	64 " "	60 " "	75 " "	85 " "
7	85 " "	64 " "	60 " "	75 " "
8	60 " "	75 " "	85 " "	64 " "

Après le laminage des blooms en billettes, on a effectué un chutage en tête représentant 39,52 à 40,95 % du lingot et en pied représentant 19,84 à 24,3 %. Seule la partie centrale restante fut utilisée pour les essais.

La fig. 1 indique la répartition des billettes des différents lingots et la position des prélèvements. On a effectué sur chacune des éprouvettes un essai d'écrasement, une attaque profonde à l'acide, une macrographie et une analyse chimique.

Les résultats de ces examens prouvent que les 4 trains finisseurs ont reçu pour les essais de laminage, des lots de billettes qui peuvent être considérés comme identiques au point de vue de leurs propriétés mécaniques et métallurgiques.

### 3 LE LAMINAGE DES RONDS

Les fig. 2, 3, 4 et 5 représentent la disposition des 4 laminoirs finisseurs sélectionnés pour les essais de laminage. Ainsi qu'il résulte des illustrations, il

s'agit ici de deux trains anciens (fig. 2 et 3) et de deux trains modernes (fig. 4 et 5). Les caractéristiques des 4 trains utilisés sont reproduites au tableau I, le tracé de leurs cannelures à la fig. 6. Les caractéristiques de déformation figurent au tableau 2.

Ainsi qu'il résulte de l'examen des figures 2 à 6 et des tableaux 1 et 2, le nombre de passes varie dans les 4 trains suivant la prise, allant de 9 passes (au train A 3) à 12 passes (au train A 4). Néanmoins le degré moyen de déformation par passe est très voisin (tableau 2), et plus particulièrement pour les 5 dernières passes (tableau 6).

Les cannelures choisies ne sont pas uniformes. Tandis que le train A 4 emploie, de la première à la dixième passe, la série losange-carré, les trois autres trains utilisent, en particulier pour les premières passes, des cannelures différentes plates et trapézoïdales, et ensuite des cannelures aplaties, demi-rondes et rondes.

En outre, les autres conditions de travail sur les quatre trains sont fondamentalement différentes les unes des autres.

Sur le train A 3, les premières passes sont faites avec emploi de doubleuses sur un train préparateur à deux cages. Ceci permet donc de fixer librement la dimension des cannelures.

C'est seulement entre la quatrième et la cinquième passe (continu avec commande collective) qu'une tension peut se produire, mais celle-ci ne peut guère causer de dommages car toutes les passes suivantes s'effectuent au moyen de doubleuses, ou sont repassées à la main.

Sur le train A 4, la première ligne préparatoire, composée de trois cages, est construite pour laminier et repasser en sens inverse sur deux étages. A chaque passage, deux passes sont faites, puis la barre sort librement; elle est descendue ou élevée à un autre plan de laminage où elle subit alors deux passes en sens opposé (voir figure 3).

Dans le laminage des ronds de 20 mm de  $\emptyset$ , six passes sont ainsi faites sur la ligne préparatrice.

A chacun des trois passages, une tension se produit dans la barre. Ses effets peuvent être atténués dans une large mesure, car la barre sort librement après chaque deuxième passe.

Les trains M 3 et M 4 ne comportent en principe, qu'une passe sur chaque cage de laminoir. Comme cependant leurs lignes préparatoires et intermédiaires sont équipées de commandes collectives, la cannelure doit être très rigide. En effet des écarts, même faibles, dans le diamètre de laminage ou dans les dimensions des cannelures, par rapport aux dimensions prévues, peuvent provoquer une augmentation dangereuse de la traction qui se produit entre les cages de laminage, et provoquer ainsi des défauts de profil.

Sur les trains M 3 et M 4, toutes les passes sont engagées mécaniquement dans la cannelure suivante. Au contraire, pour les trains A 3 et A 4, deux passes sont relaminées à la main. Ce sont:

pour le train A 3: le losange (passe 6) dans le carré de 22 mm (passe 7)  
l'ovale (passe 8) dans la cannelure de finissage (passe 9);

pour le train A 4: le losange (passe 9) dans le carré de 21,5 mm (passe 10)  
l'ovale (passe 11) dans la cannelure de finissage (passe 12).

En dehors des différences de cannelures, il existe encore des différences importantes entre les quatre trains, puisque le nombre des passes au cours desquelles une tension dans la barre peut se produire entre les différentes cages de laminage varie d'une passe pour le train A 3 à 7 passes pour le train M 4.

De même, les possibilités qu'ont les quatre trains d'empêcher ou de compenser les effets de cette traction varient beaucoup (commande individuelle, commandes collectives, nombre et succession des passes de compensation au moyen des doubleuses, nombre de repassages à la main, laminage à une ou plusieurs lignes).

Afin de garantir une uniformité aussi grande que possible du processus de travail, des délégués du bureau exécutif assistaient aux laminages d'essai. Les opérations dans les fours et sur les laminoirs ont été soigneusement observées et les valeurs nécessaires enregistrées (pour les résultats, voir le rapport principal).

Ainsi que nous l'avons déjà indiqué plus haut, il était prévu de procéder aux laminages à deux températures différentes, à savoir:

combinaison 1 avec une température de défournement de 1200° C;

combinaison 2 avec une température de défournement de 1100° C.

Les températures des barres laminées ont été mesurées à deux endroits; on s'est efforcé de mesurer la température:

1. après la première ou la seconde passe;
2. immédiatement après la passe finisseuse.

Etant donné la disposition des trains, il n'a pas été possible de procéder uniformément à cette opération sur les 4 trains. Les figures 2 à 5 indiquent la position des lunettes de prise de température. Les mesures de la température ont été effectuées par des spécialistes de l'IRSidet du Service des études thermiques du VDEh, avec les mêmes instruments pour les 4 usines, afin d'obtenir des mesures comparables. Le tableau 3 récapitule les résultats des mesures de température.

Lors du passage d'une température de défournement (1200° C) à la seconde (1100° C), des pauses convenables ont été intercalées ou bien le laminage a été poursuivi en dehors des essais, afin de permettre aux fours de s'adapter à la nouvelle température.

Le refroidissement sur les refroidissoirs a été effectué selon les méthodes usuelles en exploitation normale, c'est-à-dire que les barres laminées ont été placées les unes auprès des autres à une distance déterminée par la structure des refroidissoirs.

Il résulte des précautions prises pour la sélection et le tri des demi-

produits, et de la bonne constance du mode opératoire, du chauffage et du laminage, du contrôle et de la surveillance des températures, que les propriétés des ronds laminés à 20 mm Ø ne peuvent être influencées que par la nature du train, le type de cannelures, la vitesse de laminage, et la combinaison de laminage.

#### 4. LES RESULTATS DE LA RECHERCHE

Après le laminage des billettes en ronds de 20 mm, un certain nombre d'éprouvettes ont été prélevées à des endroits exactement déterminés à l'avance; ces éprouvettes ont été analysées dans plusieurs laboratoires d'usine, à l'IRSid, à Finsider et au MPI à Düsseldorf.

Exactement comme pour la sélection des demi-produits et pour les processus de laminage, les critères et les techniques à appliquer ont été également exactement arrêtés à l'avance dans le détail pour les différents types d'essais technologiques.

##### I. *Les examens micrographiques* ont porté sur:

- A) la nature, l'aspect et la situation des inclusions non métalliques;
- B) *la texture*, à savoir:
  - la forme de la perlite,
  - l'aspect des joints de grains, et
  - la structure rubannée;
- C) *la dimension des grains*, et sa dispersion;
- D) la situation de la *zone de ségrégation*.

##### ad A) - Impuretés

Bien que la structure, les cannelures des différents laminoirs, et les températures de laminage choisies ne puissent guère influencer la nature et la quantité des inclusions non métalliques, celles-ci ont toutefois été contrôlées et enregistrées.

Les examens ont porté sur les catégories suivantes d'impuretés:

- a): sulfures;
  - b): oxydes en bandes, en lignes ou résolus;
  - c): oxydes, sous forme sphérique ou polyédrique.
- a) Les sulfures étaient les plus rares sur le train A 3 et se présentaient le plus fréquemment sur le train A 4. Les différences sont toutefois très faibles.
  - b) Oxydes. Il n'a pas été observé de différences caractéristiques dues au train ou à la température de laminage, ni en peau, ni à coeur.
  - c) Oxydes. En peau, les inclusions non métalliques c) étaient les moins fréquentes sur le train A 4; venaient ensuite les trains A 3,

M3 et M4. A coeur les éprouvettes des trains A3, A4 et M4 sont comparables; sur le train M3 les inclusions sont plus nombreuses. Toutefois, les différences ne sont pas importantes. Il en va de même pour les 2 températures de laminage.

ad B) - Texture.

*La forme de la perlite*, est appréciée d'après la classification suivante:

1. perlite lamellaire;
2. perlite lamellaire et dégénérée;
3. perlite dégénérée en prépondérance;
4. perlite lamellaire et dégénérée non résolue.

Les examens ont montré que l'on ne rencontre pas de perlite purement lamellaire (n1). Le tableau 4 indique la présence de perlite 2, 3 et 4 sur les 4 trains. La différence entre les trains A3 et M3 est considérable.

Les différentes éprouvettes ne présentent pas de différences notables au point de vue de *l'aspect des joints des grains et l'allongement du grain*.

On n'observe pas de *structure fortement rubannée*. Le rubannage augmente à coeur lorsque la température de laminage est ramenée de 1200° à 1100° C. La différence entre les 4 trains n'est pas significative.

ad C) - Grosseur du grain.

Il a été constaté que le pourcentage de micrographies à grains réguliers en peau est de 81,2% pour le train A3; 56,2% pour le train M3; 39,5% pour le train A4 et 56,2% pour le train M3.

Par contre, en coeur, la fréquence de ce type de grains est de 70,8% pour A3; contre 97,9% pour M3 et 100% pour M4 et A4.

Le train A3 se distingue aussi des autres trains par la grosseur des grains en peau, pour cette usine, le pourcentage de micrographies présentant des gros grains (grains No 7 selon l'échelle ASTM), est à peu près double de celui que l'on rencontre pour les trois autres trains.

ad D) - Situation de la zone de ségrégation.

En général, les clichés Baumann sont bons. Les températures de laminage n'exercent aucune influence. L'effet du laminage apparaît au tableau 5. La figure 7 montre les résultats caractéristiques des quatre trains.

*En résumé, il résulte de l'examen micrographique que d'une façon générale ni les conditions de travail des quatre trains, ni les températures de laminage choisies n'entraînent des différences fondamentales.*

La température de laminage la plus basse favorise une légère structure rubannée à coeur; la température de laminage la plus élevée entraîne une légère augmentation de la régularité du grain en peau.

C'est sur le train A3 que le grain le plus gros se présente, tant en peau

qu'à coeur; ce train présente aussi le grain le plus régulier en peau et le plus irrégulier à coeur.

Le train A4 caractérisé par une légère structure rubannée, plus fréquente que sur les autres trains.

## II. *Les essais mécaniques sur ronds.*

Pour les essais mécaniques, deux prélèvements ont été effectués sur chacun des ronds, à une distance de 5 mètres de l'extrémité côté tête et côté pied. Pour chaque éprouvette, les essais suivants ont été effectués:

- A) 3 essais de résilience;
- B) 2 essais de traction sur des ronds non usinés;
- C) 1 essai de traction sur les ronds usinés à 18 mm de  $\emptyset$ ;
- D) 3 essais d'écrasement à chaud.

Sur les éprouvettes prélevées à l'extrémité côté tête, il a été en outre procédé à un essai de traction après vieillissement artificiel.

### ad A) *Essais de résilience.*

Il résulte du tableau 6 que les valeurs de résilience ne sont pas influencées notablement par les températures de laminage et par la nature de la structure des trains.

### ad B), C) et E) *Essais de traction.*

Les caractéristiques moyennes par usine des trois types d'essais de traction sont reproduites au tableau 7. Ici également, les différences entre les 4 trains sont faibles. Cependant, on peut constater que l'allongement (tant pour 5d que pour 7,5d) est le plus faible pour le train A4; viennent ensuite les trains A3 et M3. Les meilleures valeurs ont été trouvées sur le train M4. Pour les autres caractéristiques de traction, la classification des trains est variable. Il n'a pas été possible de constater d'influence des différentes températures de laminage.

### ad D) *Essais d'écrasement*

Les éprouvettes de même longueur ont été écrasées à une température de 900° C jusqu'à une hauteur finale de 13 mm. Les critères d'appréciation des essais sont indiqués à la planche-type représentée figure 8. Il en résulte que l'influence de la température de laminage n'est pas uniforme. La plupart du temps, les barres laminées à basse température ont tendance à présenter une plus faible résistance à la fissuration.

La position du prélèvement de l'éprouvette est sans importance. Au con-

traire, des différences importantes existent entre les billettes provenant des quatre trains de laminage. Le pourcentage des éprouvettes présentant des fissures moyennes et grandes (colonnes 3 du tableau 8) varie entre 6,6% sur le train A3 et 99,3% sur le train M3. Il convient de souligner que de bons résultats ont été obtenus sur un train ancien et sur un train moderne (train A3 avec 6,6% et train M4 avec 18,4% de fissures) tandis que le second train ancien A4 et le second train moderne M3 ont donné de mauvais résultats (65,28% à 99,3%) de fissures.

La cause de ces différences n'a pas été établie clairement.

On peut admettre que ces différences ne sont imputables que dans une très faible mesure à la qualité des billettes utilisées. Les précautions prises dans les aciéries, sur le train blooming et sur le train à demi-produits, de même que le système de répartition des lingots des différentes coulées entre les quatre trains, garantissent que les 4 trains ont reçu des lots de demi-produits pratiquement identiques; c'est ce que montre les épreuves d'écrasement effectués sur demi-produits. Les différences constatées lors de cet essai, ainsi que les différences inévitables de qualité à l'intérieur d'un même lingot, ne peuvent nullement expliquer les résultats des essais d'écrasement sur les ronds.

De plus, il est impossible que le traitement des billettes dans les fours poussants soit la cause des différences constatées dans la formation de fissures. Tous les fours ont été observés par des spécialistes neutres, avant et après les essais. Il est donc impossible qu'il y ait eu surchauffage partiel ou exagéré des billettes, de même qu'est exclue la possibilité d'un chauffage insuffisant.

Il ne reste donc que trois causes possibles pour les fissures:

- a) le tracé des cannelures;
- b) la tension qui se produit dans la barre laminée lors du passage d'une cage à l'autre;
- c) le mode de fonctionnement de l'équipement accessoire et en particulier des guides de torsion et des doubleuses.

ad a) - Cannelures.

Tous d'abord on peut admettre sans hésiter que le tracé des cannelures des 3 dernières passes n'est pas responsable des différences observées. Contrairement aux trois autres trains, le train M3 utilise, pour la troisième passe avant la fin, une cannelure ronde de 22 mm de  $\varnothing$ ; cependant cette différence est compensée par le fait que le degré de réduction entre l'antépénultième et l'avant-dernière cannelure est moins grand que sur les trois autres trains. Mais il existe des différences notables entre les 4 trains pour les 5 premières passes. Le train A4 utilise alternativement, de la première à l'avant-dernière passe, des losanges et des carrés. Cette série de cannelures présente le grand avantage *de déformer à peu près régulièrement sur toutes les passes, l'ensemble des zones de chaque profil*. Par contre, elle présente un inconvé-

nient car elle oblige à culbuter la barre très fréquemment.

Les autres trains commencent par effectuer successivement deux passes à plat, le train M3 en fait même trois, sans culbuter la barre. Ensuite ils utilisent alternativement un double trapèze et un ovale ou des losanges et des carrés. Il est très facile de culbuter, de maintenir et de faire passer dans les guides les passes à plat très larges et minces, particulièrement caractérisées sur le train M3. Cependant, dans ces passes à plat, la barre est beaucoup plus sollicitée, sur les bords de ses côtés larges qu'au centre. Aussi, doit-il en résulter, sur les rives, une certaine tendance à la formation de fissures, en particulier si cette tendance est favorisée par de légers défauts, soit à l'intérieur de la barre, soit à la surface. Comme le montre la figure 6, sur les trains A3 et M4, les champs des passes à plat sont chanfreinés.

ad b) - Tension.

La figure 6 montre les endroits où une tension se produit sur les 4 trains. C'est sur le train A2 que les conditions les plus favorables sont réunies, puisqu'une tension ne peut se produire qu'entre la 4ème et la 5ème passes. Sur le train A4, on trouve quatre zones semblables; toutefois chaque passe créant une tension est suivie d'une passe à sortie libre. Les déformations causées par la tension peuvent ainsi être partiellement compensées au cours de la passe suivante. Sur le train M3, une tension se produit trois fois de suite, puis vient une passe de compensation à laquelle fait suite une quatrième passe provoquant une tension. Sur le train M4 enfin, il existe au total sept zones avec tension. Sur quatre de ces zones, la déformation provoquée par la tension peut être atténuée, le nombre de tours de chacune des deux cages de laminage pouvant être réglé indépendamment sur l'autre.

ad c) - Guides.

On sait que les guides bien conçus, soigneusement entretenus, et convenablement montés, sont des conditions nécessaires à un laminage impeccable. Cette remarque est valable plus particulièrement pour les dispositifs qui servent à faire tourner la barre laminée de 45 ou de 90°. Il n'y a pas de règle générale valable pour la construction des culbuteurs, doubleuses, gardes, etc.; au contraire, ces éléments si importants sont presque partout fabriqués d'après des expériences personnelles et les nécessités particulières du laminoir considéré. On reconnaît généralement aujourd'hui que des guides à galets endommagent moins la surface de la barre laminée que des guides lisses. D'autre part cependant, il est démontré qu'avec suffisamment de soins, il est possible de laminier impeccablement un produit sans utiliser de galets. Une grande expérience et des soins minutieux ont au moins autant d'importance que des constructions modernes et élégantes.

Dans le cas présent, il ne fait aucun doute que tous les laminoirs intéressés n'ont employé, pour les essais, que des guides de première qualité et que leur montage a été effectué avec le plus grand soin. Cependant, il n'est pas

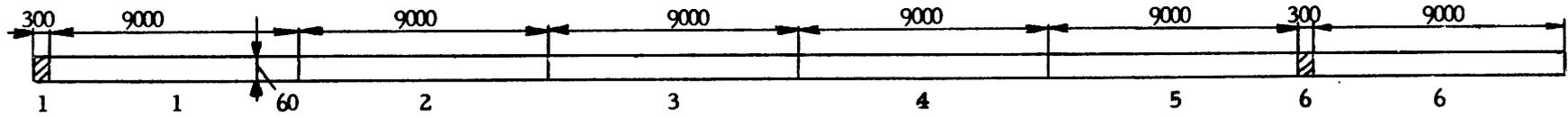
impossible que des guides aient pu, ça et là, favoriser la formation de fissures au cours des essais, car il est souvent impossible de remarquer un tel effet pendant le laminage.

Bien entendu, les influences de ces trois facteurs: cannelures, tension et guides, se recouvrent dans le résultat final et les défauts qu'ils entraînent peuvent s'additionner. Il n'est donc pas possible d'indiquer les raisons précises des écarts si importants constatés dans les pourcentages des fissures sur les 4 laminoirs. Les considérations ci-dessus font toutefois apparaître les facteurs suivants comme causes très probables des fissures:

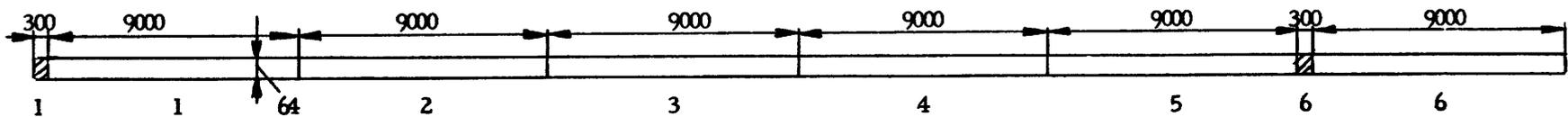
1. Sur les 4 trains, une partie quoique faible des fissures, est imputable à des défauts du matériau. Pour quelques lingots, les essais d'écrasement effectués sur billettes (60 à 85 mm<sup>2</sup>) ont donné des fissures moyennes et grandes. Les mêmes fissures doivent se retrouver en grande partie sur les ronds de 20 mm laminés à partir de ces billettes.
2. Sur le train A3, il se produit une seule tension, à savoir, entre la 4ème et 5ème passes; après toutes les passes précédentes et suivantes, les billettes sortent librement ou sont repassées. Cette situation favorable est encore accentuée par le fait que la sollicitation des cannelures sur le fer laminé est protectrice et relativement régulière. Cette circonstance est notamment soulignée par les textures observées sur ce train (nature de la perlite, répartition des grains réguliers en peau).
3. Le train A4 utilise une cannelure qui, dans toutes les passes, sollicite régulièrement la barre laminée; chaque passe créant une tension est suivie d'une passe de compensation. Ces deux facteurs, cannelures et tension, ne peuvent guère expliquer l'origine des fissures. Sur ce train, en dehors des guides, la première ligne continue semble constituer une source de danger. Dans cette ligne, six passes au total ont lieu en trois passages. La commande du groupe étant fixe, la vitesse périphérique des cylindres ne peut être adaptée que dans une faible mesure aux conditions de déformation survenant dans chaque cas.
4. Le train M3 réunit deux facteurs défavorables: en particulier dans les passes 2, 3 et 5, le matériel est sollicité très inégalement et, immédiatement après ces passes, il se produit dans la barre laminée une tension qui ne peut être atténuée par un réglage de la vitesse. Les passes 6 à 9 exigent des guides travaillant très exactement, ceci s'applique aussi aux culbuteurs.
5. Le train M4, qui avec 18% de fissures se classe en deuxième place est le seul des trains considérés qui ait laminé les ronds en deux lignes. On peut admettre avec certitude que les résultats obtenus par ce train seraient encore bien meilleurs si le laminage avait été fait en une seule ligne.

REPARTITION DES BILLETES POUR LE LAMINAGE DE 20 MM DE  $\phi$

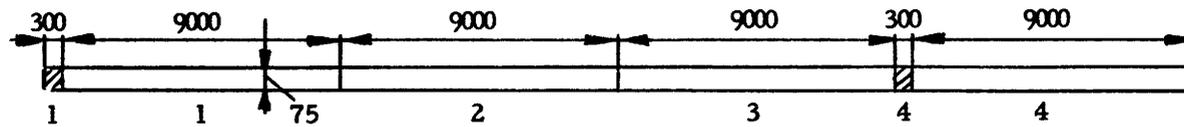
a) Lingots laminés en billettes de 60<sup>□</sup>



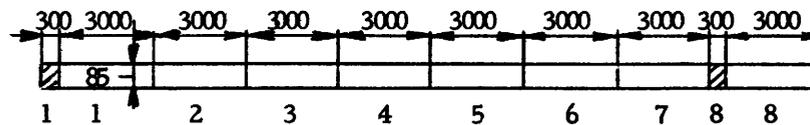
b) Lingots laminés en billettes de 64<sup>□</sup>



c) Lingots laminés en billettes de 75<sup>□</sup>



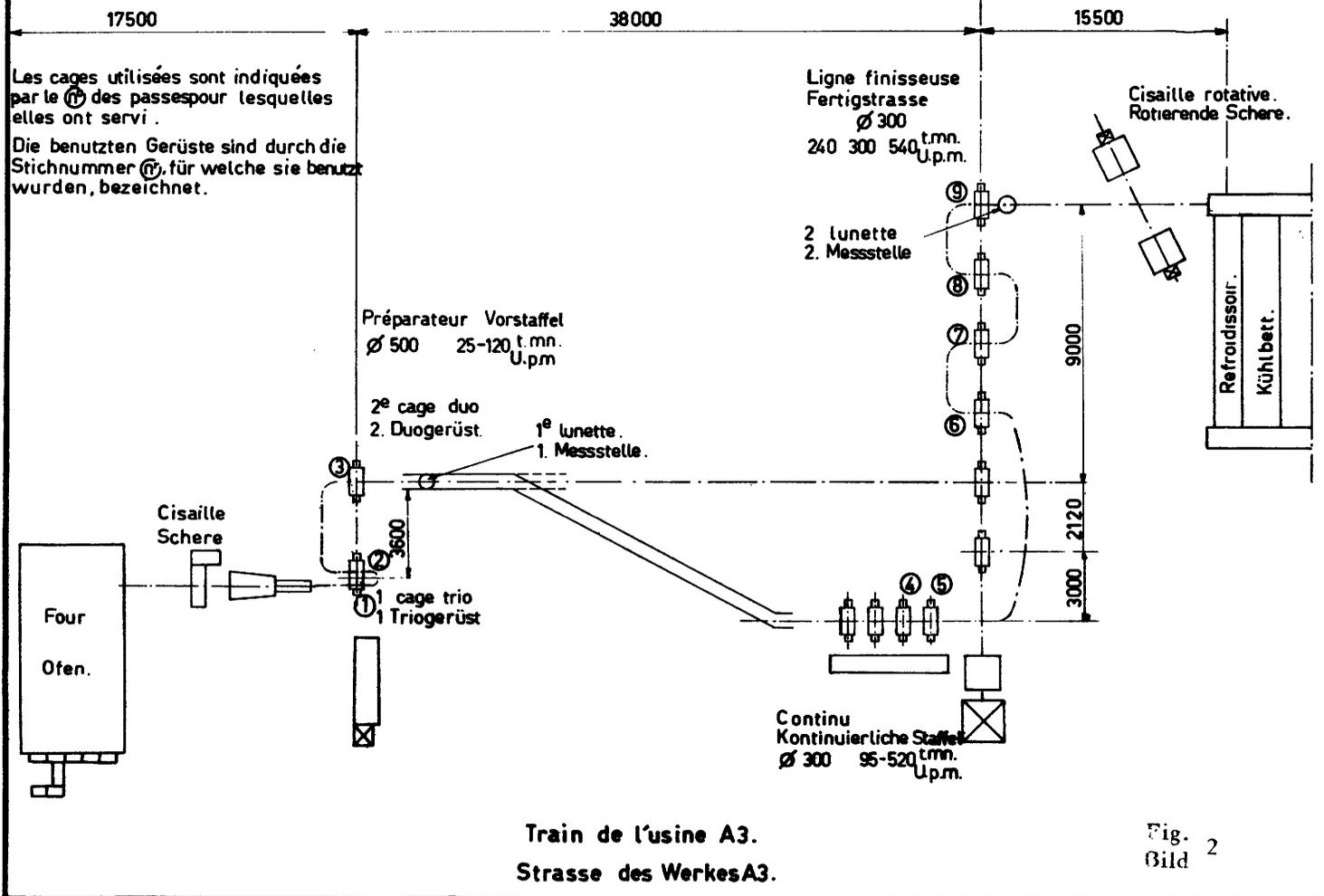
d) Lingots laminés en billettes de 85<sup>□</sup>



← Tête de lingot

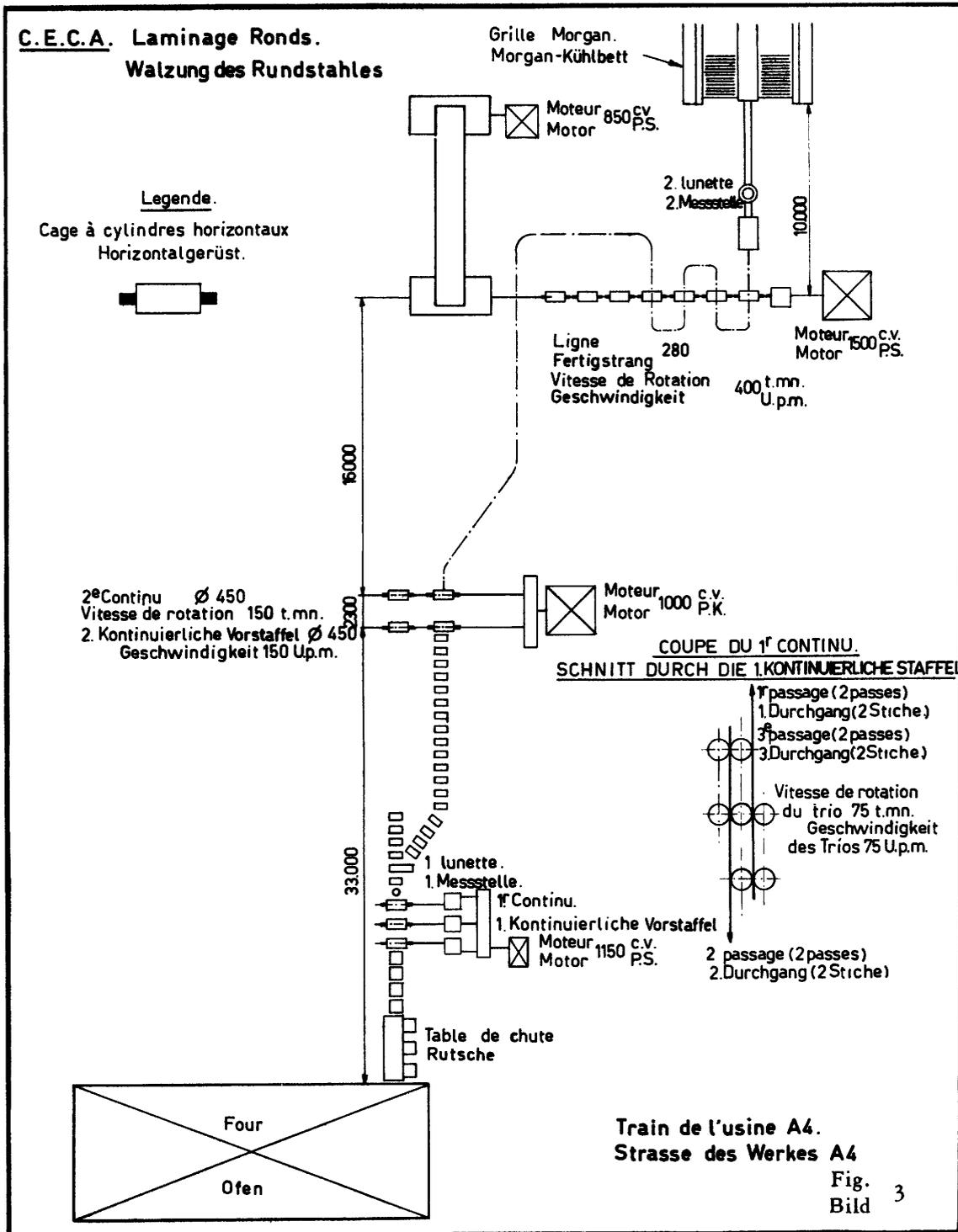
Pied de lingot →

**C.E.C.A. Laminage Ronds.  
Walzung des Rundstahles**

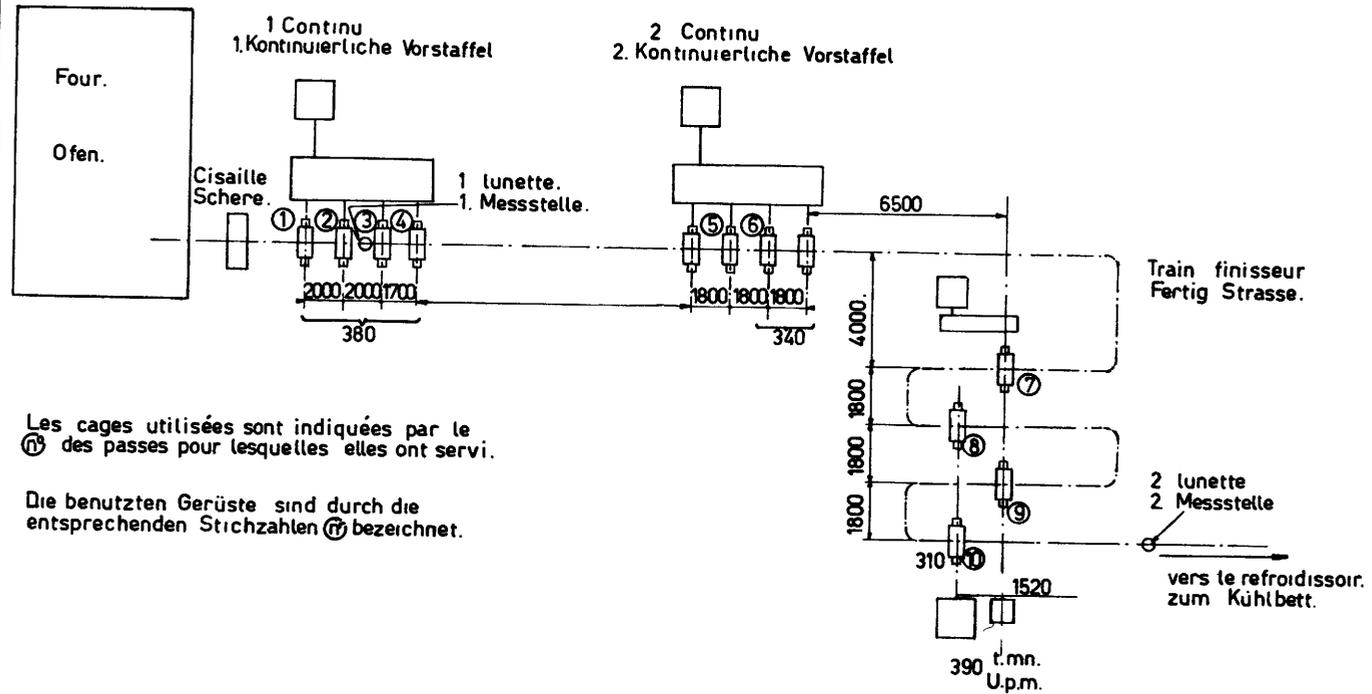


**Train de l'usine A3.  
Strasse des Werkes A3.**

**Fig. 2  
Bild 2**



C.E.C.A. Laminage Ronds.  
Walzung des Rundstahles.



Les cages utilisées sont indiquées par le  
Ⓢ des passes pour lesquelles elles ont servi.

Die benutzten Gerüste sind durch die  
entsprechenden Stichzahlen Ⓢ bezeichnet.

Train de l'usine M3.  
Strasse des Werkes M3.

Fig. 4  
Bild 4

C.E.C.A. Laminage ronds.  
Walzung des Rundstahls.

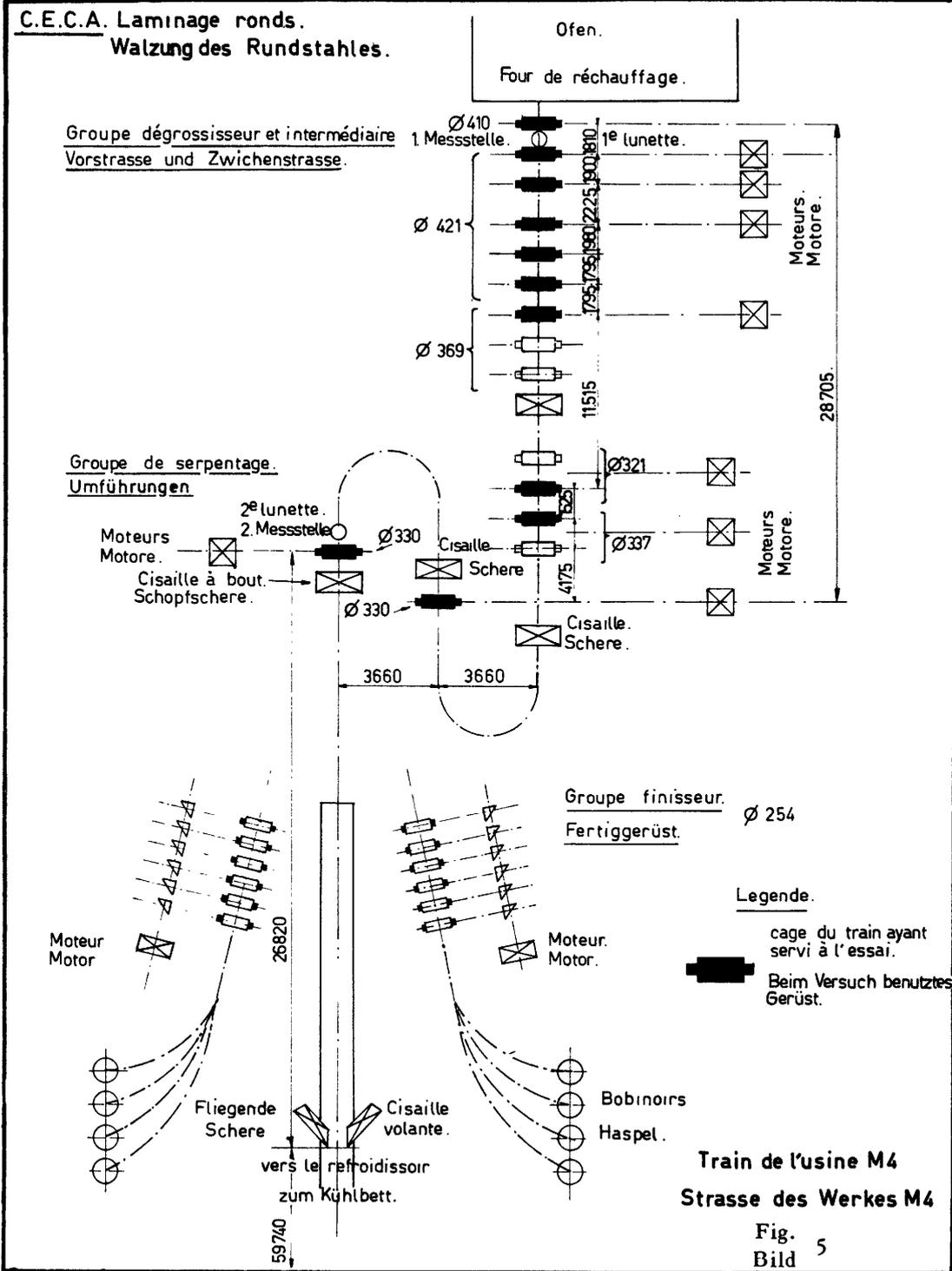


Tableau 1

## CARACTERISTIQUES DE PRODUCTION

		Train A 3	Train M 3	Train A 4	Train M 4
Quantité de métal laminé	Dimension des billettes en mm	60 × 60 × 9.000	64 × 64 × 9.000	75 × 75 × 9.000	85 × 85 × 3.000
	Poids des billettes en kg	240	275	380	165
	Nombre de billettes engagées	1	1	2	1
	Diamètre des ronds en mm	20	20	20	20
	Longueur approximative du rond obtenu par laminage d'une billette en m	98	112	155	66
Vitesse de laminage de la cage finisseuse	Vitesse de rotation de la cage finisseuse en tours / minute	333	390	402	400
	Ø des cylindres de la cage finisseuse en mm	300	310	330	280
	Vitesse de sortie des ronds en m/ sec.	5,2	6,4	7,2	5,8
	Production maximum pour cette vitesse en t/h.	45,9	56,3	127,0	52,2
	Temps de passage des ronds à travers la cage finisseuse, en sec.	19	21	21,5	11,5
Temps de passage du premier bout laminé de la première à la dernière cage, en sec.		33	26,5	22,8	57
refroidissoir: longueur en m.		85	80	84	80



Tableau 2.

DETERMINATION DE LA DEFORMATION MOYENNE  
PENDANT LE LAMINAGE

	Train A 3	Train M 3	Train M 4	Train A 4
Section de la billette de départ	60	64	75	85
Diamètre du rond obtenu	20	20	20	20
Nombre de passes	9	10	11	12
$\frac{S_0}{S_n}$	10,95	12,45	17,20	22,11
$d = \sqrt[n]{\frac{S_0}{S_n}}$	1,305	1,287	1,297	1,295
$\lambda = 100 (d - 1)\%$	30,5	28,7	29,7	29,5
$\gamma = 100 (d - \frac{1}{d})\%$	23,3	22,3	22,9	22,8

RESULTATS DES MESURES DE TEMPERATURES

Tableau 3.

Train	A 3		M 3		M 4		A 4	
Combinaison	1	2	1	2	1	2	1	2
Température de défournement visée	1200	1100	1200	1100	1200	1100	1200	1100
1. Température moyenne du four en ° C	1174	1085	1199	1085	1260	1140		
Chiffres concernant le défournement								
2. Température de défournement au milieu de la billette								
3. Moyenne ° C	1192	1089	1197	1086	1196	1107	1259	1134
Etendue ° C	75	45	15	30	55	15	75	40
3. Différence des températures moyennes des deux combinaisons	103		111		89		125	
4. Température de fin de laminage au milieu du rond								
Moyenne ° C	1060	1036	1089	1050	1132	1074	1088	966
Etendue ° C	90	55	10	30	50	20	30	55
Chiffres concernant la fin du laminage								
5. Différence entre les 2 températures moyennes de fin de laminage	24		39		58		122	
6. Différence de température entre les deux extrémités de la barre en ° C	5 - 10	5 - 10	5 - 10	5	25 - 30	5	5 - 10	10 - 15
7. Baisse moyenne de température entre le défournement et la fin du laminage pour chaque combinaison	132	53	108	36	64	23	171	168
8. D°: moyenne des 2 combinaisons	92		72		43		170	

Tableau 4.

## FREQUENCE EN % DES TYPES DE PERLITE 2, 3 ET 4

1. Peau													
	Train A3			Train A4			Train M3			Train M4			
	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	
1200 ° C	37,5	0	62,5	54,1	4,1	41,6	66,6	0	33,3	50,0	0	50,0	
1100 ° C	33,3	8,3	58,3	45,8	20,8	33,3	58,3	4,1	37,5	50,0	0	50,0	
Moyenne	35,4	4,1	60,4	50,0	12,5	37,5	62,5	2,0	35,4	50,0	0	50,0	
2. Coeur													
	1200 ° C	37,5	0	62,5	58,3	4,1	37,5	66,6	0	33,3	50,0	0	50,0
	1100 ° C	33,3	8,3	58,3	45,8	20,8	33,3	58,3	4,1	37,5	50,0	0	50,0
	Moyenne	35,4	4,1	60,4	52,0	12,5	35,4	62,5	2,0	35,4	50,0	0	50,0

## APPRECIATION DES CLICHES BAUMANN

Tableau 5.

	Train A3		Train A4		Train M3		Train M4	
	Bon	Moyen	Bon	Moyen	Bon	Moyen	Bon	Moyen
1200 ° C	100	0	95,8	4,1	100	0	95,8	4,1
1100 ° C	100	0	87,5	12,5	100	0	95,8	4,1
Moyenne	100	0	91,6	8,3	100	0	95,8	4,1

Essais macrographiques sur ronds de 20mm  
Makrographische Versuche bei 20mm Rundstahl

TRAINS  
STRASSEN

A3



A4



M3



M4



Bild 7

Tableau 6.

## RESULTATS DE L'ESSAI DE RESILIENCE (MOYENNES)

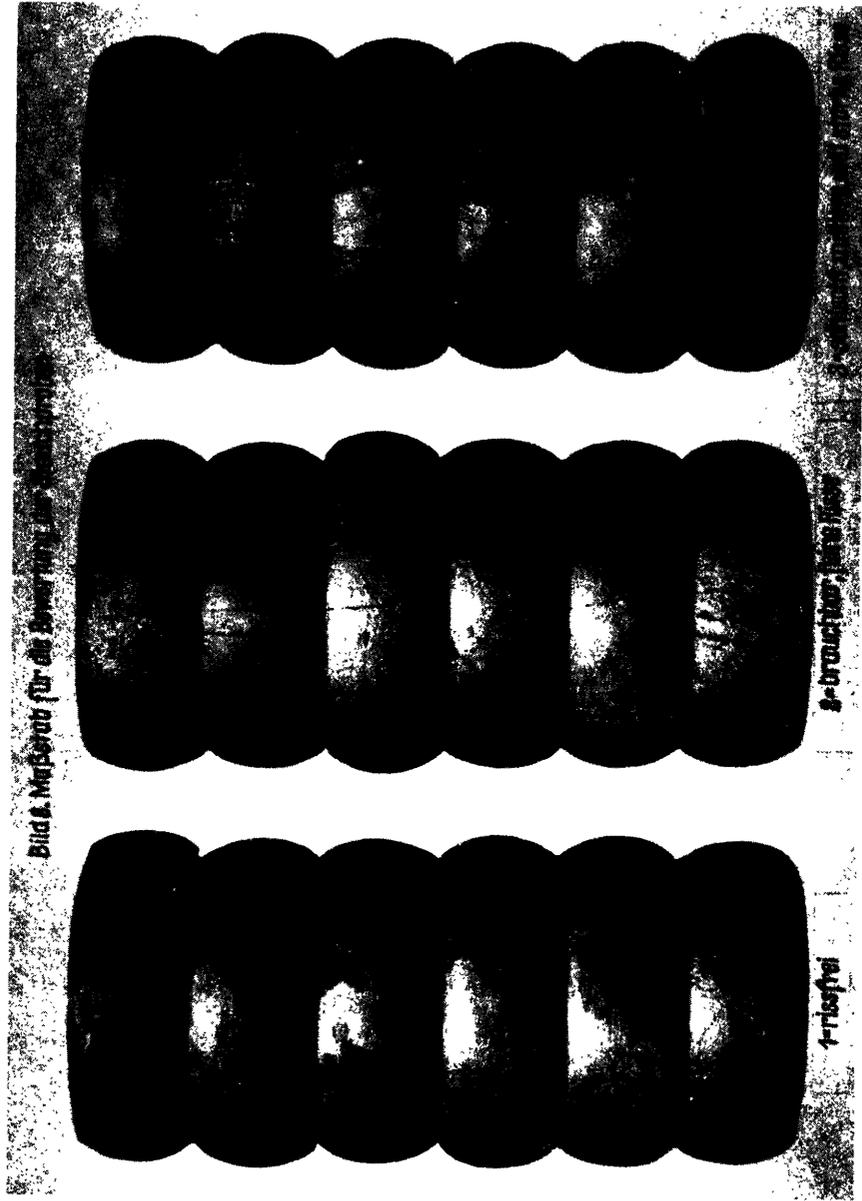
Train	1200° C			1100° C		
	Tête	Pied	Moyenne	Tête	Pied	Moyenne
A 3	14,39	14,36	14,38	14,38	14,62	14,50
A 4	14,94	15,04	15,00	15,05	15,29	15,16
M 3	14,39	14,56	14,48	14,43	14,69	14,56
M 4	14,42	14,23	14,33	14,58	14,76	14,67

Tableau 7.

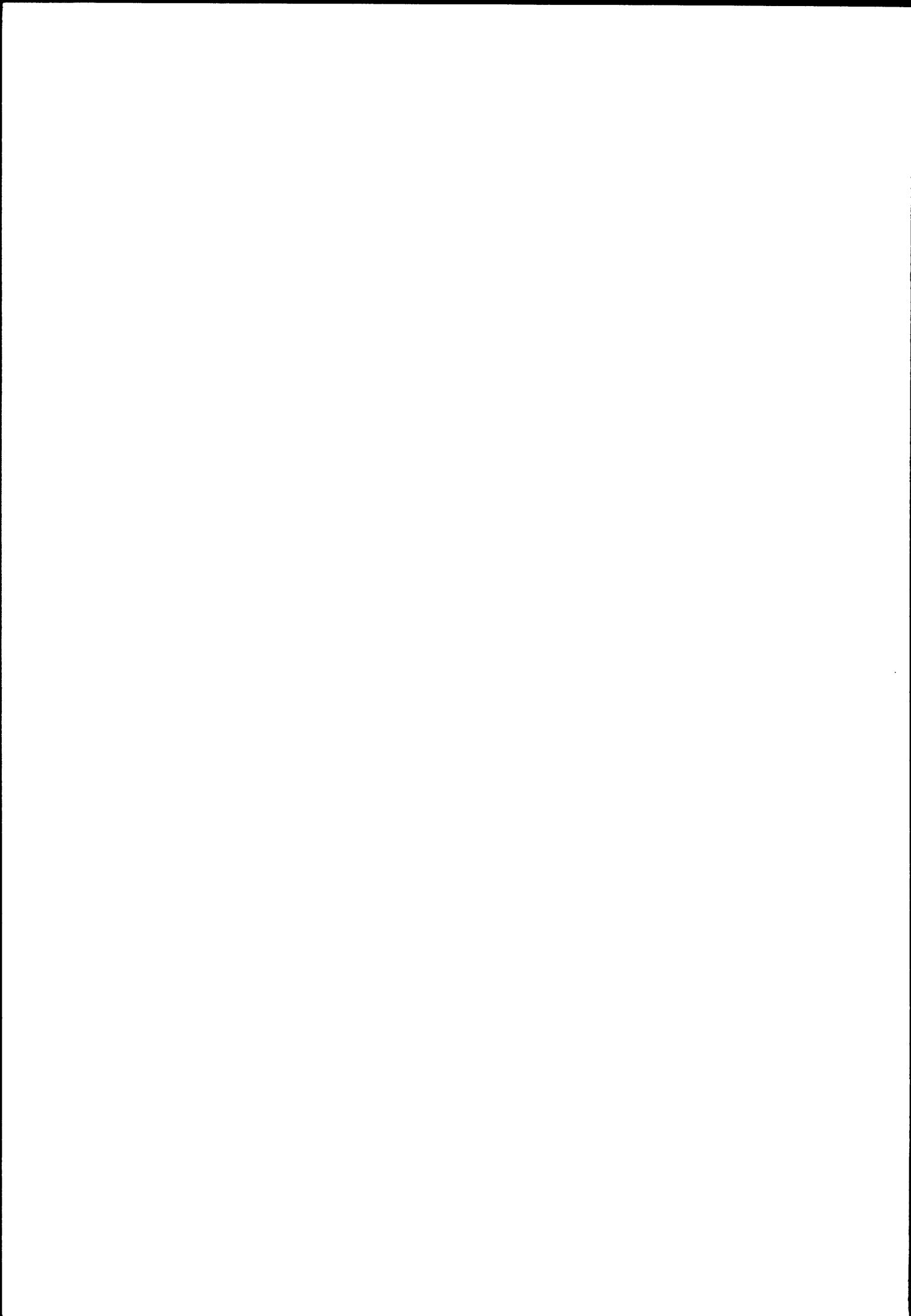
## RESULTATS DES ESSAIS DE TRACTION (MOYENNES)

Train	Limite d'élasticité en kg / mm <sup>2</sup> (E)			Résistance à la rupture en kg / mm <sup>2</sup> (R)			E / R en %			Allongement 5 d			Allongement 7,5 d			Striction	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
A3	27,34	29,15	35,57	37,32	38,08	41,10	73,21	76,56	86,60	41,03	37,40	28,64	36,29	32,49	24,20	70,93	70,69
A 4	26,74	27,74	35,65	37,00	37,84	41,36	72,41	73,23	86,24	40,16	36,74	28,47	35,60	32,00	24,44	70,42	70,11
M 3	27,01	28,25	35,66	36,76	37,77	41,11	73,45	74,72	86,81	42,10	38,08	29,01	37,42	33,14	24,79	71,08	70,46
M 4	26,47	28,14	35,25	36,69	37,70	40,91	72,09	74,64	86,22	42,16	39,63	29,15	37,44	34,48	24,86	70,66	70,51

Colonnes 1: éprouvettes non usinées  
Colonnes 2: éprouvettes usinées  
Colonnes 3: éprouvettes vieilles







RAPPORT SUCCINCT SUR LE LAMINAGE ET LES ESSAIS  
EFFECTUES SUR FILS

par M. GOOSE

**BUT DES ESSAIS**

Les recherches avaient pour but de déterminer l'influence sur les caractéristiques du fil machine de 5,5 mm de diamètre.

1. de la nature du train de laminoir utilisé pour le laminage du fil;
2. de la température de début de laminage ou autrement dit, de la température de défournement des demi-produits utilisés;
3. de la vitesse de refroidissement du fil entre la sortie de la dernière cage et l'entrée dans la bobineuse, et
4. de l'endroit du prélèvement de l'échantillon dans la botte.

Les essais ont porté sur 3 qualités d'acier doux effervescent:

- a) un acier Thomas d'élaboration normale;
- b) un acier Thomas soufflé à l'oxygène;
- c) un acier Martin.

Ceci dans le but de s'assurer que les trois qualités d'acier réagissaient bien de la même façon aux variations des conditions de laminage des fils.

Au cours de l'établissement du plan statistique, qui devait être suivi pour les essais, il a notamment été décidé de porter la recherche sur un nombre limité de coulées, 8 par nuance, formant un ensemble *aussi homogène que possible*.

**ELABORATION DE L'ACIER ET PREPARATION DES DEMI-PRODUITS.**

Les coulées des trois nuances ont été élaborées dans la même usine sidérurgique, toutes précautions étant prises pour obtenir une homogénéité aussi

grande que possible des diverses coulées pour chaque mode d'élaboration. On s'est astreint notamment à élaborer les 8 coulées dans le plus court intervalle de temps possible. Cet intervalle de temps n'a pas dépassé 4 jours. Les limites d'analyse visées étaient les suivantes:

Mode d'élaboration	C	Mn	P	S	N <sub>2</sub>
Thomas normal	< 0,080	0,250-0,400	0,060	0,050	0,010-0,015
Thomas oxygène	< 0,080	0,250-0,400	0,035	0,030	0,005-0,007
Martin	< 0,080	0,250-0,400	0,040	0,040	0,007

L'acier Thomas a été élaboré dans des cornues de 16t, sur des fonds usés pour éviter une influence de la hauteur du bain sur la qualité de l'acier. Aussi bien pour l'acier Thomas normal que pour l'acier Thomas à l'oxygène, la fonte enfournée a été de composition très régulière. L'analyse moyenne de cette fonte était:

C: 3,64 Mn: 0,85 P: 1,79 S: 0,46 Si: 0,33 Cu: 0,05

La durée de soufflage a été en moyenne de 14 minutes 9 sec. pour l'acier Thomas normal et 10 minutes 10 sec. pour l'acier Thomas à l'oxygène. Pour l'acier Thomas à l'oxygène la fonte a été soufflée tout d'abord à l'air pendant 4 minutes, puis jusqu'à 1 minute de la fin de l'opération, le fluide soufflé a été de l'air enrichi à 30% d'oxygène, ensuite ce taux d'enrichissement a été porté à 35% d'oxygène durant 30 sec. A ce moment l'oxygène a été coupé. On a ajouté 6,05 kg/t acier de ferro-manganèse chauffé vers 800° C et 1,85 kg/t acier de spiegel dans la cornue pour l'acier Thomas ordinaire et 8,42 kg/t acier de ferro-manganèse chauffé à 800° C pour l'acier Thomas à l'oxygène.

L'acier Martin a été élaboré dans des fours de 80t chauffés par un mélange de gaz de haut-fourneau, de gazogène et de cokerie. Il a été chargé par tonne d'acier environ 245 kg de fonte de la composition suivante:

Mn: 2,54 P: 0,109 S: 0,028 Si: 0,78 C: 4,18 Cu: 0,13

La durée totale des coulées a varié entre 7h 30 et 9h 30.

Une addition de 1,59 kg de ferro-manganèse affiné par tonne de fonte a été faite dans le four. Enfin, une addition de 0,2 kg d'aluminium et 0,68 kg/t de ferro-manganèse affiné a été faite en poche.

Les analyses obtenues sur lingotins sont les suivantes:

Acier Thomas normal	C	Mn	P	S	N <sub>2</sub>
moyenne	0,050	0,37	0,052	0,023	0,014
maximum	0,060	0,41	0,060	0,028	0,016
minimum	0,040	0,33	0,045	0,020	0,011
Acier Thomas oxygène					
moyenne	0,058	0,32	0,028	0,018	0,0047
maximum	0,070	0,37	0,035	0,022	0,0050
minimum	0,049	0,28	0,020	0,016	0,0030
Acier Martin					
moyenne	0,070	0,34	0,016	0,026	-
maximum	0,070	0,35	0,017	0,029	-
minimum	0,060	0,32	0,015	0,021	-

L'acier Thomas fut coulé en chute et l'acier Martin *en source* et *en fosse*.

Chaque coulée Thomas donnait 4 lingots de 4 t à 4,5 t numérotés suivant l'ordre de coulée; chaque coulée Martin donnait 4 sources de 4 lingots de 4 t à 4,8 t chacune: les lingots de la 2ème source numérotés arbitrairement de 1 à 4 étaient seuls retenus pour l'essai.

La vitesse de coulée était de 2,78 t/min. pour l'acier Thomas normal, 3,25 t/min. pour l'acier Thomas à l'oxygène et 0,75 t/min. pour l'acier Martin. On a choisi pour les essais les lingots 2 et 3 de chaque coulée. Toutefois les lingots 1 et 4 ont été laminés avec le métal destiné à l'essai et les billettes obtenues ont servi ultérieurement dans les laminiers finisseurs au réglage des appareils de prise de température.

Les lingots ont été enfournés chauds dans des fours pits à grande chambre. Le tableau suivant indique le track-time, la durée de séjour en lingotière et aux fours pits.

	Thomas normal Minutes	Thomas à l'oxygène Minutes	Martin Minutes
<i>Tracktime</i>			
Temps moyens	49	56	117
Etendues	17	34	65
<i>Temps de séjour en lingotière</i>			
Temps moyens	41	42	63
Etendues	15	15	23
<i>Séjour aux pits</i>			
Temps total	Heures 6 <sup>16</sup>	Heures 5 <sup>50</sup>	Heures 3 <sup>49</sup>

Les lingots ont été dégrossis en blooms de 185 mm  $\varnothing$  en 19 passes, puis les blooms obtenus ont été transformés, au cours de la même chaude, en 15 passes en billettes de 50 mm  $\varnothing$ .

Afin de répartir entre les laminoirs, un métal aussi homogène que possible, il n'a été utilisé que l'acier provenant de la partie médiane des lingots. Les parties de tête et de pied éliminées représentent respectivement 40 et 17% de ceux-ci.

Chaque lingot a donné naissance à 10 billettes. L'affectation des billettes provenant d'une même coulée et le choix des billettes provenant d'un même lingot ont été fixés d'après une table de nombres tirés au hasard.

Pour s'assurer de l'homogénéité et de la qualité des demi-produits obtenus, des prélèvements ont été faits à l'extrémité côté tête, en un point voisin du milieu du lingot et à l'extrémité côté pied.

Ces prélèvements ont été soumis à des essais micrographiques, à des essais d'attaque profonde à l'acide, enfin des copeaux ont été prélevés en 3 endroits (2 prélèvements côté tête pour exécuter des contre-essais, 1 prélèvement côté pied) sur toute la surface de la section pour analyse chimique.

Les essais micrographiques et les essais d'attaque profonde à l'acide étaient destinés à vérifier si la ségrégation dans une section perpendiculaire à l'axe du lingot d'origine était bien celle que l'on pouvait attendre d'un bon acier effervescent. Ces essais n'ont rien décelé d'anormal. Ils ont montré que pour toutes les coulées le processus d'effervescence avait été très régulier.

Les analyses chimiques ont permis de s'assurer qu'il n'existait pas, du fait de la ségrégation majeure, une différence trop grande entre les points des demi-produits provenant de régions différentes du lingot. Le prélèvement pour analyse a été fait avec beaucoup de soin, les copeaux étant obtenus par rabotage d'une couche mince d'épaisseur régulière sur toute la section du demi-produit. Les résultats des dosages ont été soumis à une analyse statistique. D'après cette analyse, pour les teneurs en manganèse et en azote, l'influence de la ségrégation donne des variations plus petites que celles existant entre les teneurs moyennes des diverses coulées choisies pour l'essai. Pour le carbone et le phosphore cette influence, quand elle est significative, donne des variations du même ordre de grandeur que celles que l'on peut constater entre les teneurs moyennes de chaque coulée. Enfin pour le soufre cette influence est plus importante, mais les écarts observés, n'ont pas paru être de nature à influencer de façon gênante les résultats des essais.

Toutefois, on a distingué les billettes provenant du côté tête du lingot (c'est-à-dire de la partie comprise entre 40 et 65% du lingot, à partir de la tête) et les billettes provenant du côté pied du lingot (c'est-à-dire de la portion comprise entre 65 et 85% à partir de la tête) et la méthode statistique utilisée, a permis d'éliminer l'effet de la ségrégation lors de l'interprétation des résultats.

#### LAMINAGE A CHAUD DES FILS

Il a été choisi pour réaliser les essais de laminage du fil machine, deux

trains de laminoirs de type ancien et deux de type moderne.

La différenciation de ces trains peut se faire d'après la vitesse de sortie du fil à la dernière cage. Celle-ci est de 7,50 m à 9m/sec. dans les trains anciens et de 22 à 24 m/sec. dans les trains modernes. Ajoutons que ces derniers comportent 19 cages alors que les trains anciens utilisés n'en comportent que 16.

La disposition des 4 trains ayant participé à la recherche est représentée aux figures 1 - 2 - 3 et 4.

Les températures de défournement des billettes choisies ont été respectivement de 1100° et de 1200° C.

Quant à la vitesse de refroidissement du fil à la sortie de la dernière cage, il n'a pas été possible de la chiffrer numériquement.

En principe, le grand écartement des cages, des boucles assez longues et la vitesse relativement faible de laminage des trains anciens, amène la température du fil à la sortie de la dernière cage, suffisamment basse (de 700 à 900°) pour que le fil puisse être bobiné directement sans l'intervention d'un refroidissement accéléré. Au contraire dans les trains modernes la température des barres à la sortie se situe entre 950 et 1100° C, ce qui oblige le lamineur à opérer un refroidissement plus ou moins violent avant le bobinage, afin d'éviter une formation trop forte de calamine. Ce refroidissement est obtenu par injection d'eau dans les *tuyaux guides* réunissant la dernière cage à la bobineuse.

Pour réaliser les deux vitesses de refroidissement prévues pour la recherche, les trains anciens, afin d'obtenir un refroidissement accéléré, ont créé une injection d'eau dans les *tuyaux d'amenée du fil* de la dernière cage à la bobineuse, tandis que les trains modernes, pour obtenir un niveau de refroidissement plus faible, ont ou bien diminué (train M1) ou même totalement supprimé (train M2) l'injection d'eau dans les tuyaux.

Afin de pouvoir juger sainement la valeur des résultats obtenus, il est nécessaire de se rendre compte de la façon exacte dont les différentes combinaisons de laminage ont été réalisées dans chacune des quatre usines. A cet effet, il est du plus haut intérêt d'examiner les températures relevées au cours des essais.

Les températures ont été relevées:

Pour T1 après la première cage, soit après la passe décalamineuse;

T2 avant la dernière cage;

T3 à l'entrée de la bobineuse.

Ces deux dernières températures ne peuvent être considérées qu'à titre indicatif, la section très petite du fil et le flottement de la barre en ayant rendu la lecture difficile.

Les moyennes des températures relevées sont reprises au tableau II.

On constate que les températures prévues pour le défournement n'ont pas été réalisées dans tous les cas (particulièrement au train A2).

On constate également que le refroidissement intense a été réalisé d'une manière particulièrement forte au train A 1.

Il faut remarquer que les chiffres reportés sur le tableau II, ainsi que les écarts indiqués, correspondent à des températures superficielles enregistrées au pyromètre. Il est possible que la température moyenne du produit et à fortiori la température à coeur s'écarte parfois de celle-ci.

Il faudrait en outre dans un examen complet, tenir compte du facteur "vitesse de refroidissement" qu'il a été impossible d'évaluer autrement que qualitativement d'un train à l'autre.

#### ESSAIS EFFECTUES SUR LES FILS LAMINES A CHAUD

Afin de pouvoir se rendre compte de la régularité des caractéristiques du fil sur toute sa longueur, des prélèvements ont été faits en tête, au milieu et en pied de chaque bobine, après toutefois un éboutage suffisant des deux extrémités (figure 5).

Sous la dénomination "tête", il faut entendre le premier bout passe au laminoir. (Dans les quatre usines, les billettes ont été laminées côté pied du lingot en avant).

Sur chacun des prélèvements, il a été fait une macrographie, 3 essais de traction, 2 essais de pliage alterné, un essai de torsion continue et un essai de torsion alternée (voir annexe 1).

Après prélèvements, les fils ont été tréfilés à froid et divers essais ont été effectués sur ces produits. Un tableau joint au présent rapport donne la nomenclature et le nombre des divers essais effectués. (voir annexe 1).

#### RESULTATS OBTENUS

##### a) *essais mécaniques.*

Un premier travail de l'exploitation statistique des résultats a consisté à comparer entre eux les résultats obtenus au cours des diverses séries d'essais effectués sur un même lot. On a constaté un certain décalage entre les trois séries d'essais de traction effectués sur les mêmes lots de prélèvements pour les valeurs de la limite élastique (environ  $1 \text{ kg/mm}^2$ ), de l'allongement (1%) et la striction (0,6%). Pour expliquer cette augmentation des limites élastiques accompagnée d'une perte de ductilité, on envisage l'hypothèse d'un vieillissement de l'acier à la suite du redressage des éprouvettes au maillet de bois.

Une étude statistique ultérieure a permis de déterminer l'écart existant entre les résultats obtenus aux essais effectués sur des prélèvements de la région voisine de la tête et de celle voisine du pied des lingots. Comme il fallait s'y attendre les prélèvements provenant de la tête des lingots donnent en moyenne des limites élastiques un peu plus fortes ( $0,52 \text{ kg/mm}^2$ ), des résistances à la traction également un peu plus fortes ( $0,74 \text{ kg/mm}^2$ ) et des allongements un peu

plus faibles (0,33%) que les prélèvements provenant de la région du lingot plus voisine du pied.

Ces différences sont faibles et comme nous l'avons déjà signalé plus haut leur effet a été éliminé par la méthode adoptée pour le dépouillement statistique des données.

Une comparaison a enfin été faite entre les résultats obtenus avec les trois nuances d'acier étudiées. On constate une différence significative du point de vue statistique entre les résultats obtenus avec ces diverses nuances d'acier. Mais comme elles réagissent toutes en général de la même façon aux conditions de laminage, on peut sans inconvénient se servir des résultats moyens donnés par les diverses séries d'essais sur les trois nuances d'acier pour déterminer la réponse aux questions faisant l'objet de la recherche: influence de la nature du train, de la température de laminage et de la vitesse de refroidissement sur la qualité des fils laminés à chaud. Ce sont ces chiffres moyens qui figurent dans les tableaux de ce rapport.

Les principaux résultats de la recherche sur fil machine sont résumés aux tableaux 3 et 4 et sont visualisés aux figures 6 à 9.

#### PRELEVEMENT

Les prélèvements des extrémités ont des propriétés nettement différentes des prélèvements médians. Dans le cas de l'essai de traction, les prélèvements médians sont les plus doux. Ces différences peuvent dépasser  $4 \text{ kg/mm}^2$  pour la limite élastique et la charge de rupture dans les trains anciens. Elles sont de l'ordre de  $2 \text{ kg/mm}^2$  dans le cas des trains modernes.

Pour les pliages alternés, les différences entre les résultats moyens des 3 prélèvements sont tantôt dans un sens tantôt dans l'autre, les écarts moyens varient de  $1/2$  à 1 pliage pour une moyenne de 24,4 pliages pour les trains modernes et de  $1/2$  à 2,2 pour les trains anciens pour une moyenne de 26 pliages.

Le nombre moyen de torsions du prélèvement médian (44 torsions) est plus élevé que celui des deux autres (42,6 pour le premier bout et 42,4 pour le dernier bout). Toutefois, dans les trains modernes, les valeurs moyennes des 3 prélèvements sont très voisines.

Le prélèvement médian présente une plus forte proportion d'échantillons sans fissures, particulièrement dans les trains anciens.

Pour les trains anciens, le premier bout contient toujours beaucoup plus de défauts (griffes et marquages de guides) que les deux autres prélèvements. Les fissures et les griffes décelées à la torsion continue montrent donc également un avantage très net aux trains modernes en ce qui concerne les écarts entre prélèvements.

Ces différences entre prélèvements extérieurs et moyens peuvent s'expliquer:

- par le serpentage (spécialement net pour les trains anciens où la tem-

- température du dernier bout au finissage est nettement moindre que le premier: environ 1000° C, valeur moyenne);
- par un auto-recuit moins accusé après bobinage aux extrémités;
- par un refroidissement plus ou moins bien réalisé aux extrémités.

#### INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE DEFURNEMENT

L'influence de la température de défournement est faible. En général, pour les trains modernes, le fil laminé à 1200° C est légèrement plus doux que celui laminé à 1100° C. L'écart maximum rencontré est de 1,7 kg/mm<sup>2</sup> pour la résistance et 2,1 kg/mm<sup>2</sup> pour la limite élastique.

Sur l'allongement et la striction, l'influence est pratiquement nulle. Elle n'atteint dans aucun cas 1 % pour l'allongement et 1,1 % pour la striction.

Pour les essais de pliage alterné, la température de 1100° C au début de laminage paraît plus favorable que celle de 1200° C mais la différence qui n'est que de 0,6 pliage n'est guère significative.

Quant à la torsion continue, les hautes températures sont favorables dans le cas du laminage sans refroidissement avant bobinage. Au contraire, dans le cas du refroidissement intense, ce sont les températures de 1100° C qui donnent les meilleurs résultats.

La température de défournement ne joue aucun rôle en ce qui concerne les défauts extérieurs.

#### INFLUENCE DU REFROIDISSEMENT

L'influence du degré de refroidissement est faible, si nous exceptons les résultats du train A 1 où les différences de refroidissement ont été très prononcées.

On a par exemple constaté dans les trois trains A 2, M 1, M 2 pour le refroidissement intense, une augmentation de la charge de rupture de 1,3 kg/mm<sup>2</sup>, de la limite élastique de 2,7 kg/mm<sup>2</sup>, de l'allongement de 0,9%, de la striction de 0,9% tandis que pour le train A 1 les différences maxima sont: augmentation de la charge de rupture de 9,2 kg/mm<sup>2</sup>, de la limite élastique de 12,6 kg/mm<sup>2</sup> et diminution de 7,6%, de la striction de 1,9%.

Pour le pliage alterné, le refroidissement intense est défavorable. L'effet se marque surtout pour les trains anciens et plus particulièrement si le laminage est terminé à basse température. Toutefois, dans les trains modernes, les résultats ne diffèrent que de 0,5 pliage et sont même de sens inverse dans les combinaisons à 1100° C pour le train M 1.

Enfin, pour l'essai de torsion continue, un refroidissement intensif paraît favorable dans les trains anciens et défavorable dans les trains modernes. On observe aussi que les 2 combinaisons avec refroidissement intense donnent plus de fils fissurés que les deux autres.

## INFLUENCE DU FACTEUR TRAIN

Nous avons déjà signalé au paragraphe étudiant le facteur prélèvement, des écarts plus faibles entre les propriétés moyennes des trois prélèvements, pour les trains modernes que pour les trains anciens.

Pour l'essai de traction on n'observe pas de différences systématiques et significatives pour les trains A2, M1, M2, seul le train A1 présente un acier légèrement plus dur dans le cas des combinaisons à refroidissement normal et nettement plus dur pour le refroidissement intense.

Si l'on compare les combinaisons normalement utilisées par chaque type de train (refroidissement modéré pour les trains anciens et intense pour les trains modernes) on ne constate pas non plus de différences systématiques entre les divers trains.

Les aciers du train A1, à refroidissement intense, donnent des résultats à l'essai de pliage alterné nettement inférieurs aux aciers des autres trains et des autres combinaisons.

Si on élimine ce cas, les différences extrêmes entre laminoirs sont inférieures à 0,6 pliages (sur une moyenne de 26 pliages).

Pour l'essai de torsion continue dans chaque combinaison, les trains anciens semblent donner des résultats légèrement supérieurs aux trains modernes, sauf aux hautes températures sans refroidissement. Si l'on ne considère que les combinaisons normalement utilisées les trains anciens conservent l'avantage avec 2,15 torsions en plus, aux températures de 1200° C, mais les trains modernes reprennent l'avantage avec 1,15 torsions en plus aux températures de 1100° C.

L'étude des résultats de torsion alternée a montré que les trains anciens possédaient la plus forte proportion d'éprouvettes sans lignes mais aussi la plus forte proportion d'éprouvettes avec fissures.

## EXAMENS MICROGRAPHIQUES

L'examen micrographique a porté sur une section droite de chacun des prélèvements de tête, du milieu, et de pied des bobines de fil de la recherche. Nous faisons abstraction dans ce rapport de ce qui concerne les inclusions dont la présence ne peut dépendre des conditions de laminage. Le dénombrement des divers types d'inclusions n'a été fait que pour le cas où l'on aurait eu besoin de s'y reporter pour trouver une explication à un écart anormal dans les caractéristiques mécaniques. Ce cas ne s'est pas présenté.

La forme de la perlite fut appréciée d'après la classification suivante:

1. prédominance de perlite lamellaire;
2. perlite lamellaire plus perlite dégénérée;
3. prédominance de perlite dégénérée;
4. perlite lamellaire non résolue optiquement.

Notons immédiatement l'absence de micrographies à perlite lamellaire non résolue optiquement.

L'aspect No. 2 est plus fréquent en peau qu'en coeur. Une influence de la combinaison de laminage n'est pas apparente: par contre le type de train paraît jouer un rôle important. Les trains modernes ont un pourcentage de micrographies avec prépondérance de perlite lamellaire plus élevé que les trains anciens.

En ce qui concerne l'aspect des joints, la différenciation porte sur la prédominance des joints purs ou des joints avec perlite ou cémentite. Le pourcentage de joints purs diminue fortement pour les combinaisons à refroidissement intense.

Les trains anciens donnent moins de joints purs que les trains modernes. Enfin, les trains anciens marquent une prépondérance de joints purs en peau par rapport au coeur, tandis que généralement l'inverse se produit pour les trains modernes.

Les grains sont généralement sans allongement. Seul 4% des prélèvements présentent un léger allongement. Les structures légèrement rubanées sont rares en peau (16 micrographies sur 1152). En coeur, environ 22% des prélèvements donnent une structure légèrement rubanée. Cette structure est plus fréquente pour les trains modernes ainsi que pour les combinaisons à 1100° C.

L'intensité de refroidissement est un facteur influençant fortement la grosseur du grain. Les combinaisons avec refroidissement intense présentent moins de gros grains que les 2 autres. Les trains modernes présentent par rapport aux trains anciens un grain ASTM (5 et 6) moins fréquent et un grain ASTM (7 et 8) plus fréquent.

## LE TREFILAGE

Dans le but de vérifier si les conditions de laminage à chaud des fils exerçaient une action sur les caractéristiques des fils tréfilés à froid, les bobines obtenues au cours des essais de laminage ont été tréfilées.

Les opérations successives du tréfilage ont été les suivantes:

- a. 1ère machine: tréfilage en 6 passes à 1,5 mm de diamètre;
- b. 2ème machine: tréfilage en 5 passes à 0,68 mm de diamètre;
- c. vieillissement;
- d. normalisation;
- e. recuit.

Des échantillons ont été prélevés sur les fils après chaque opération. Ils ont été soumis aux essais de traction et de pliage alterné.

On peut conclure des essais que, dès la 1ère dénaturation du fil, l'influence de la position de prélèvement est nulle.

Le refroidissement intense des fils après laminage entraîne une augmentation de la charge de rupture après 1ère et 2ème dénaturation ainsi qu'après vieillissement. Après normalisation et recuit, les écarts sont extrêmement réduits et varient de:

- 0,56 à + 0,06 kg/mm<sup>2</sup> pour la résistance (moyenne: 33,3 kg/mm<sup>2</sup>);
- 0,5 à + 0,7 % pour l'allongement (moyenne: 17,5 %);
- 0,3 à - 0,1 pour le nombre de pliages (moyenne: 16,2)

La température de défournement joue un rôle encore moindre que le refroidissement.

Après recuit, les écarts varient de:

- 0,21 à + 0,23 kg/mm<sup>2</sup> pour la résistance (moyenne: 36,4 kg/mm<sup>2</sup>);
- 0,2 à + 0,8 % pour l'allongement (moyenne: 21,3 %);
- 0,3 à + 0,3 pour le nombre de pliages (moyenne: 19,8).

Dans quelques cas, on a observé que les aciers des combinaisons à refroidissement intense se comportent mieux à l'essai de pliage.

Quant à la comparaison des trains, on n'observe pas de classement systématique.

Pour les combinaisons utilisées normalement par chaque type de laminoir, les moyennes des résultats après recuit sont les suivantes:

	Trains anciens	Trains modernes
Charge de rupture en kg/mm <sup>2</sup>	36,03	36,71
Allongement %	21,45	21,30
Nombre de pliages	20,00	19,60

#### CONCLUSIONS PRATIQUES

Le laminage à haute température donne dans l'ensemble des aciers plus doux, tandis que le refroidissement intense durcit le métal, mais les différences sont minimes sauf dans le cas d'un refroidissement très important comme ce fut le cas pour le train A1.

L'essai de pliage alterné possède envers les conditions de laminage des réactions tout à fait identiques à l'essai de traction, tandis que la torsion continue paraît obéir à des critères différents que cette étude n'a pas pu mettre en évidence.

On ne constate que des différences minimes entre les propriétés des aciers laminés sur les trains A2, M1, M2. Seul le train A1 présente des aciers plus durs.

Un fait caractéristique du laminage du fil machine est la dispersion entre

les valeurs des mesures exécutées sur les trois prélèvements, les différences étant cependant plus faibles pour les trains modernes que pour les trains anciens.

Au point de vue micrographies, les trains modernes présentent par rapport aux trains anciens:

1. un pourcentage plus élevé de micrographies à prépondérance de perlite lamellaire;
2. un aspect de joint plus pur;
3. un grain ASTM (5 - 6) moins fréquent;
4. un grain ASTM (7 - 8) plus fréquent.

Les combinaisons à refroidissement intense présentent moins de gros grains que les 2 autres.

Les propriétés mécaniques des fils tréfilés ne sont pratiquement pas influencées par la nature du train à chaud et par les conditions de laminage à chaud.

M. GOOSSE

Tableau 2

## TEMPERATURES RELEVÉES AU PYROMETRE (MOYENNES)

Combinaison de laminage	Train	Température après T 1			Température à la dernière passe T 2			Température à la bobineuse T 3		
		1er bout	milieu	dernier bout	1er bout	milieu	dernier bout	1er bout	milieu	dernier bout
1200° modéré	A 1	1 225	1 210	1 175	820	780	705	830	785	720
	A 2	1 165	1 125	1 125	905	860	810	590	800	765
	M 1	1 150	1 235	1 200	1 100	1 110	1 115	1 000	1 000	1 000
	M 2	1 200	1 210	1 220	1 025	1 035	1 045	1 000	1 000	1 000
1200° intense	A 1	1 200	1 200	1 175	805	775	725	600	605	510
	A 2	1 145	1 105	1 110	910	875	815	630	780	745
	M 1	1 155	1 220	1 195	1 100	1 100	1 115	985	?	890
	M 2	1 220	1 195	1 200	1 030	1 035	1 035	885	885	870
1100° modéré	A 1	1 105	1 095	1 040	810	765	705	800	755	710
	A 2	1 100	1 035	1 060	892	860	810	735	800	770
	M 1	1 070	1 075	1 095	1 030	1 020	1 063	990	915	950
	M 2	1 085	1 105	1 090	950	960	965	965	975	965
1100° intense	A 1	1 095	1 065	1 035	780	865	715	620	610	565
	A 2	1 125	1 065	1 090	890	860	810	635	780	755
	M 1	1 080	1 090	1 090	1 023	1 020	1 055	970	820	845
	M 2	1 100	1 100	1 110	935	940	945	840	860	845

*Remarque: La comparaison des températures entre trains ne peut se faire sans restriction, par suite des emplacements différents des pyromètres.*

Tableau 3

Train	Prélèvement	Allongement				Charge de rupture			
		1200° modéré	1200° intense	1100° modéré	1100° intense	1200° modéré	1200° intense	1100° modéré	1100° intense
A 1	premier bout	30,4	30,1	30,3	29,9	38,3	41,3	38,0	41,5
A 2		32,2	33,4	32,0	31,4	37,5	37,1	36,7	37,6
M 1		31,6	32,0	31,8	31,9	36,4	37,5	36,9	36,5
M 2		32,6	32,0	32,9	32,4	36,4	37,8	36,4	37,8
A 1	milieu	29,9	22,3	29,9	23,7	35,7	44,9	35,9	44,0
A 2		32,4	32,7	33,2	32,4	35,4	35,4	35,0	35,4
M 1		31,6	32,5	31,6	31,9	34,9	35,4	36,0	36,1
M 2		32,2	31,7	32,0	32,6	34,8	35,3	34,7	36,0
A 1	dernier bout	28,8	19,4	28,9	21,4	36,8	47,9	37,0	46,0
A 2		31,6	31,9	31,9	30,9	36,5	37,1	35,7	36,8
M 1		30,1	31,8	30,9	30,5	36,7	36,5	37,1	36,3
M 2		33,2	32,9	34,2	32,5	36,3	37,6	36,2	37,7
		Striction				Limite élastique			
A 1	premier bout	76,6	76,1	76,2	76,5	27,7	33,2	27,4	32,3
A 2		76,6	76,6	76,5	75,6	26,0	25,7	25,1	25,8
M 1		76,6	76,2	76,9	77,2	23,9	25,8	24,8	24,5
M 2		77,4	76,9	77,4	77,4	23,4	27,2	23,5	27,4
A 1	milieu	75,8	73,9	75,5	74,7	22,9	35,5	22,5	34,1
A 2		76,2	76,1	76,0	75,6	21,7	21,6	21,3	22,0
M 1		76,7	76,9	75,6	76,5	21,6	23,0	23,7	23,7
M 2		76,9	77,1	76,9	77,3	21,2	23,2	21,3	24,0
A 1	dernier bout	76,0	73,7	76,0	74,3	23,8	38,7	24,5	37,0
A 2		76,3	76,3	76,3	75,8	23,0	24,3	22,2	23,7
M 1		76,8	76,8	76,5	77,1	24,6	23,8	25,0	24,3
M 2		76,8	76,7	77,0	77,2	23,2	26,1	23,1	26,5

Tableau 4

Combinaison	Prélèvement	Essais de pliages alternés				Essais de torsion continue			
		Train A 1	Train A 2	Train M 1	Train M 2	Train A 1	Train A 2	Train M 1	Train M 2
1200° modéré	premier bout	26,6	25,8	26,7	27,8	42,2	41,3	42,3	45,3
	milieu	26,2	26,3	26,5	26,8	45,1	43,6	43,9	46,0
	dernier bout	25,5	25,9	26,1	27,5	44,0	41,0	43,0	46,0
1200° intense	premier bout	22,9	25,9	25,6	26,2	42,5	43,5	42,1	42,2
	milieu	18,8	26,0	26,0	26,4	44,4	47,5	41,7	42,7
	dernier bout	18,0	25,6	25,6	27,5	40,3	44,1	39,9	42,6
1100° modéré	premier bout	25,6	26,6	26,5	26,3	41,7	40,7	41,6	44,0
	milieu	26,2	27,5	26,5	26,9	43,9	42,2	40,0	44,6
	dernier bout	24,1	25,2	25,8	26,4	42,2	40,4	38,2	45,1
1100° intense	premier bout	24,2	26,0	26,8	28,5	43,3	41,9	44,0	43,3
	milieu	19,2	25,8	27,3	26,6	45,6	44,3	45,0	43,5
	dernier bout	17,5	26,0	26,7	28,7	42,3	42,3	40,2	42,9

FIL TREFILE

Tableau 5 a

	TRAIN A 1											TRAIN A 2											
	Prélèvement premier bout				Moy- enne	V 1	V 2	Ecart	T 1	T 2	Ecart	Prélèvement premier bout				Moy- enne	V 1	V 2	Ecart	T 1	T 2	Ecart	
	1	2	3	4								1	2	3	4								
<b>1e dénaturation</b>																							
A	100,7	105,7	101,6	106,3	103,6	101,1	106,0	-4,9	103,2	103,9	-0,7	96,3	96,9	96,0	95,3	96,1	96,1	96,1	0	96,6	95,6	1,0	
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0	0	1,0	1,0	0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0	1,0	1,0	0	
C	9,0	8,7	8,9	8,7	8,8	9,0	8,7	0,3	8,9	8,8	0,1	9,5	8,8	8,5	8,9	8,7	8,5	8,8	-0,3	8,6	8,7	-0,1	
<b>2e dénaturation</b>																							
A	124,5	127,5	124,6	126,7	125,8	124,5	127,1	-2,6	126,0	125,7	0,3	123,0	122,7	122,5	120,6	122,2	122,8	121,7	1,1	122,9	121,6	1,3	
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0	0	1,0	1,0	0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,1	-0,1	1,0	1,1	-0,1	
C	2,4	2,3	2,6	2,1	2,4	2,5	2,2	0,3	2,3	2,4	-0,1	2,2	2,1	2,1	2,7	2,3	2,1	2,4	-0,1	2,1	2,4	-0,3	
<b>Vieillissement</b>																							
A	122,3	125,3	122,7	125,2	123,9	122,5	125,3	-2,8	123,8	124,0	-0,2	118,1	117,4	117,7	115,5	117,2	117,9	116,5	1,4	117,7	116,6	1,1	
B	1,4	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	0	1,3	1,2	0,1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	-0,1	1,1	1,2	-0,1	
C	3,4	3,0	2,9	2,7	3,0	3,1	2,8	0,3	3,2	2,8	0,4	3,0	3,0	3,2	3,3	3,2	3,1	3,2	-0,1	3,0	3,3	-0,3	
<b>Normalisation</b>																							
A	35,0	35,36	34,57	34,71	34,91	34,79	35,03	-0,24	35,18	34,64	0,54	31,83	32,17	32,78	32,87	32,41	32,31	32,52	-0,21	32,00	32,83	-0,83	
B	19,0	19,5	18,3	17,5	18,6	18,7	18,5	0,20	19,3	17,9	1,4	15,0	16,6	16,2	16,5	16,1	15,6	16,6	-1,0	15,8	16,4	-0,6	
C	16,7	17,7	17,0	17,4	17,2	16,9	17,6	-0,7	17,2	17,2	0	15,3	15,7	14,7	15,8	15,4	15,0	15,8	-0,8	15,5	15,2	0,3	
<b>Recuit</b>																							
A	37,37	37,12	36,84	35,21	37,13	37,11	37,16	-0,05	37,25	37,02	0,23	35,01	34,97	34,89	35,17	35,01	34,95	35,07	-0,12	34,99	35,03	-0,04	
B	21,5	21,5	21,1	21,2	21,3	21,3	21,3	0	21,5	21,1	0,4	21,9	22,0	21,3	22,1	21,8	21,6	22,1	-0,5	22,0	21,7	0,3	
C	20,3	20,5	20,6	20,7	20,5	20,5	20,6	-0,1	20,4	20,7	0,3	19,6	19,8	19,5	19,9	19,7	19,5	19,8	-0,3	19,7	19,7	0	

A = Charge de rupture  
 B = Allongement  
 C = Pliage alterné

V 1 = refroidissement normal  
 V 2 = refroidissement intense  
 T 1 = 1200° C  
 T 2 = 1100° C

1 = 1200° C refroidissement normal  
 2 = 1200° C refroidissement intense  
 3 = 1200° C refroidissement normal  
 4 = 1100° C refroidissement intense

FIL TREFILE

Tableau 5b

	T R A I N M 1											T R A I N M 2											
	Prélèvement premier bout				Moy- enne	V 1	V 2	Ecart	T 1	T 2	Ecart	Prélèvement premier bout				Moy- enne	V 1	V 2	Ecart	T 1	T 2	Ecart	
	1	2	3	4								1	2	3	4								
<b>1e dénaturation</b>																							
A	94,3	98,5	97,8	97,1	96,9	96,0	97,8	-1,8	96,4	97,4	-1,0	94,9	97,6	96,4	100,5	97,2	95,7	98,8	-3,1	96,4	98,2	-1,8	
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0	1,0	1,0	0	1,6	1,8	2,0	1,5	1,7	1,8	1,7	0,1	1,7	1,8	-0,1	
C	9,2	8,8	8,8	9,5	9,1	9,0	9,1	-0,1	9,0	9,1	-0,1	10,2	9,5	9,7	9,3	9,6	9,9	9,4	0,5	9,8	9,5	0,3	
<b>2e dénaturation</b>																							
A	120,7	123,2	123,1	123,1	122,6	121,9	123,2	-1,3	122,0	123,1	-1,1	124,3	128,7	124,4	130,7	126,9	124,4	129,5	-5,1	126,7	127,1	-0,4	
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0	1,0	1,0	0	1,5	1,2	1,3	1,0	1,2	1,4	1,1	0,3	1,3	1,2	0,1	
C	2,8	2,5	2,7	2,6	2,6	2,7	2,6	0,1	2,7	2,7	-0,1	3,2	2,7	2,9	2,7	2,9	3,0	2,7	0,3	2,9	2,8	0,1	
<b>Vieillissement</b>																							
A	116,4	119,5	119,5	119,6	118,7	117,9	119,6	-1,7	118,0	119,5	-1,5												
B	1,5	1,3	1,6	1,4	1,4	1,5	1,3	0,2	1,4	1,5	-0,1												
C	3,5	3,1	3,3	3,2	3,3	3,4	3,1	0,3	3,3	3,3	0												
<b>Normalisation</b>																							
A	32,57	32,81	32,66	32,67	32,68	32,62	32,74	-0,12	32,69	32,66	0,03												
B	18,2	18,2	18,0	16,0	17,6	18,1	17,1	1,0	18,2	17,0	1,2												
C	15,4	15,9	16,2	16,3	15,9	15,8	16,1	-0,3	15,6	16,2	-0,6												
<b>Recuit</b>																							
A	35,27	35,57	35,56	35,70	35,52	35,41	35,63	-0,22	35,42	35,63	-0,21	38,08	37,32	37,49	38,33	37,75	37,77	37,72	0,05	37,66	37,85	-0,19	
B	22,4	22,3	21,9	21,8	22,1	22,1	22,1	0	22,3	21,8	0,5	21,2	20,5	20,0	20,1	20,5	20,6	20,3	0,3	20,8	20,1	0,7	
C	20,3	20,6	20,1	20,5	20,4	20,2	20,6	-0,4	20,5	20,3	0,2	18,5	19,0	18,7	19,5	18,9	18,6	19,2	-0,6	18,7	19,0	-0,3	

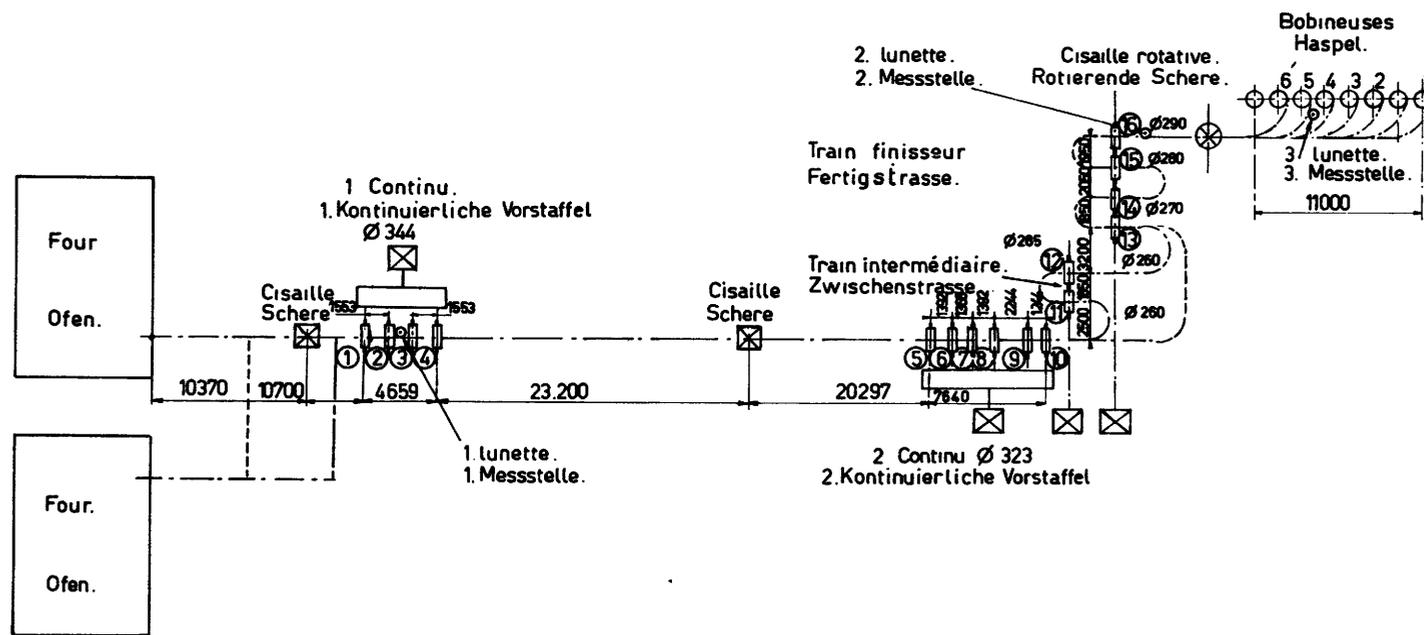
FIL TREFILE

Tableau 5 b

(suite)

	TRAIN M 2											TRAIN M 2											
	Prélèvement médian				Moyenne	V1	V2	Ecart	T1	T2	Ecart	Prélèvement dernier bout				Moyenne	V1	V2	Ecart	T1	T2	Ecart	
	1	2	3	4								1	2	3	4								
<b>1e dénaturation</b>																							
A	93,3	94,7	93,9	98,3	94,8	93,6	96,2	-2,6	94,0	95,8	-1,8	94,0	98,2	95,2	98,6	96,5	94,6	98,4	-3,8	96,1	96,9	-0,8	
B	1,6	1,8	2,0	1,5	1,7	1,8	1,7	0,1	1,7	1,8	-0,1	1,6	1,8	2,0	1,7	1,8	1,8	1,7	0,1	1,7	1,8	-0,1	
C	10,2	10,0	9,9	9,5	9,9	10,0	9,8	0,2	10,1	9,7	0,4	10,1	9,5	9,8	9,7	9,8	10,0	9,6	0,4	9,8	9,8	0	
<b>2e dénaturation</b>																							
A	121,3	125,5	126,9	128,5	125,4	124,2	126,7	-2,5	123,6	127,6	-4,0	123,4	128,0	124,1	129,0	126,1	123,8	128,5	-4,7	125,7	126,6	-0,9	
B	1,4	1,2	1,3	1,0	1,2	1,4	1,1	0,3	1,3	1,2	0,1	1,5	1,2	1,3	1,0	1,2	1,4	1,1	0,3	1,3	1,1	0,2	
C	3,2	2,7	3,0	2,8	2,9	3,1	2,8	0,3	3,0	2,9	0,1	3,1	2,7	3,0	2,9	2,9	3,1	2,8	0,3	2,9	3,0	-0,1	
<b>Vieillissement</b>																							
A												120,9	121,5	121,9	122,6	121,7	121,4	122,0	-0,6	121,2	122,2	-1,0	
B												2,7	2,5	2,5	2,3	2,5	2,6	2,4	0,2	2,6	2,4	0,2	
C												2,5	2,3	2,6	2,5	2,5	2,5	2,4	0,1	2,4	2,6	-0,2	
<b>Normalisation</b>																							
A												34,78	34,86	34,27	34,79	34,68	34,53	34,82	-0,29	34,82	34,53	0,29	
B												19,0	18,0	17,5	17,8	18,1	18,3	17,9	0,4	18,5	17,7	0,8	
C												17,2	17,5	17,6	17,3	17,4	17,4	17,4	0	17,4	17,5	-0,1	
<b>Recuit</b>																							
A	38,23	37,30	37,19	38,15	37,67	37,70	37,64	0,06	37,72	37,61	0,11	37,28	37,68	37,21	37,93	37,53	37,25	37,81	-0,56	37,48	37,57	-0,09	
B	21,3	20,6	20,6	19,6	20,5	20,9	20,2	0,7	20,9	20,1	0,8	20,8	20,5	20,4	20,7	20,6	20,6	20,6	0	20,7	20,5	0,2	
C	18,6	19,0	18,9	18,7	18,8	18,8	18,9	-0,1	18,8	18,8	0	19,0	19,4	19,4	19,4	19,3	19,2	19,4	-0,2	19,2	19,4	-0,2	

C.E.C.A. Laminage fils.  
Walzung von Draht.



Train de l'usine A1  
Strasse des Werkes A1

Fig. 1  
Bild

C.E.Ç.A Laminage fils.  
Walzung des Drahtes

Les cages sont désignées par les  $\oplus$   
des passes pour lesquelles elles ont  
servi.

Die benutzten Gerüste sind durch  
die entsprechenden Stichzahlen  $\oplus$   
bezeichnet.

Train de l'usine A2  
Strasse des Werkes A2

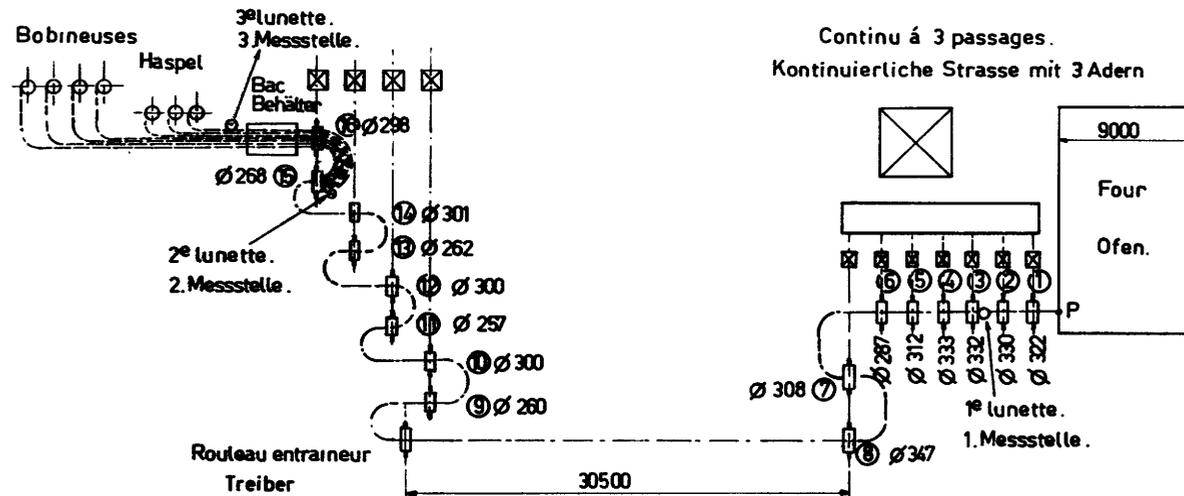


Fig. 2  
Bild

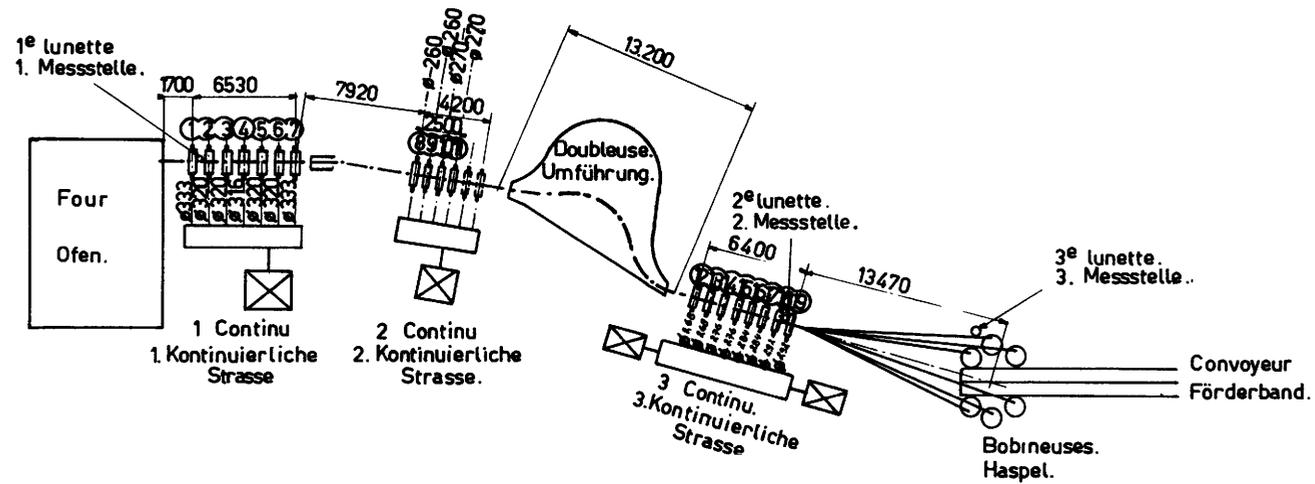
**C.E.C.A. Laminage fils.  
Walzung des Drahtes.**

Les cages ayant servi au laminage des fils pour l'essai sont numérotées.

Die für die Versuchswalzung benutzten Gerüste sind nummeriert.

Les 2 cages en pointillés servent pour laminier le fil de 5,5 mm  $\varnothing$ , à partir de la billette de  $\varnothing$  64 mm.

Die 2 punktierten Gerüste dienen zum Walzen von Drähten von 5,5 mm  $\varnothing$ . aus Knüppeln von  $\varnothing$  64 mm.

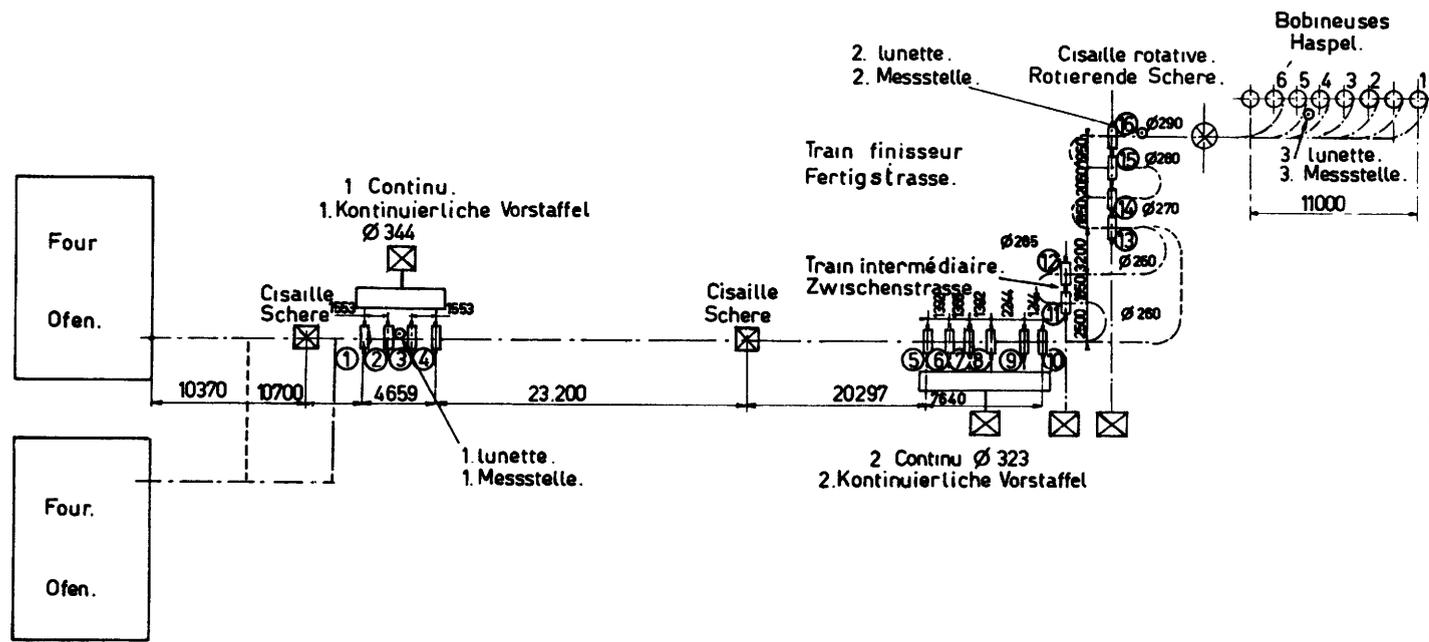


**Train de l'usine M1.  
Strasse des Werkes M1.**

**Fig. 3  
Bild**



C.E.C.A. Laminage fils.  
Walzung von Draht.



Train de l'usine A1  
Strasse des Werkes A1

Fig. 1  
Bild

C.E.C.A Laminage fils.  
Walzung des Drahtes

Les cages sont désignées par les ⑦  
des passes pour lesquelles elles ont  
servi.

Die benutzten Gerüste sind durch  
die entsprechenden Stichzahlen ⑦  
bezeichnet.

Train de l'usine A2  
Strasse des Werkes A2

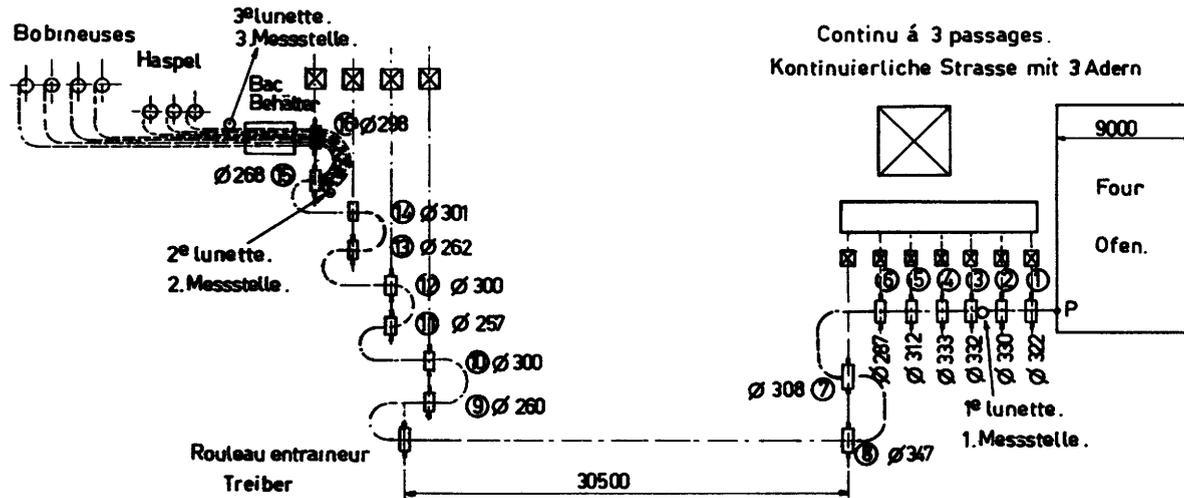


Fig. 2  
Bild

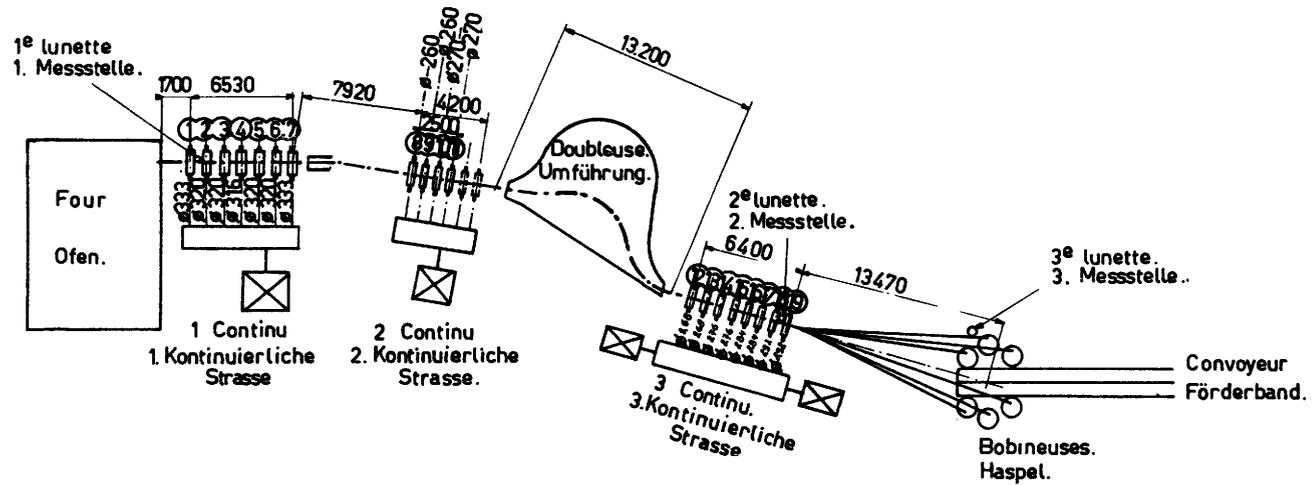
**C.E.C.A. Laminage fils.**  
**Walzung des Drahtes.**

Les cages ayant servi au laminage des fils pour l'essai sont numérotées.

Die für die Versuchswalzung benutzten Gerüste sind nummeriert.

Les 2 cages en pointillés servent pour laminier le fil de 5,5 mm Ø, à partir de la billette de Ø 64 mm.

Die 2 punktierten Gerüste dienen zum Walzen von Drähten von 5,5 mm Ø, aus Knüppeln von Ø 64 mm.



Train de l'usine M1.  
 Strasse des Werkes M1.

Fig. 3  
 Bild

C.E.C.A. Laminage fils  
Walzung des Drahtes.

Schéma du train équipé pour laminier du fil de  $\varnothing$  5,5 mm.  
Schema, der Drahtstrasse für  $\varnothing$  von 5,5 mm.

Train de l'usine M2  
Strasse des Werkes M2

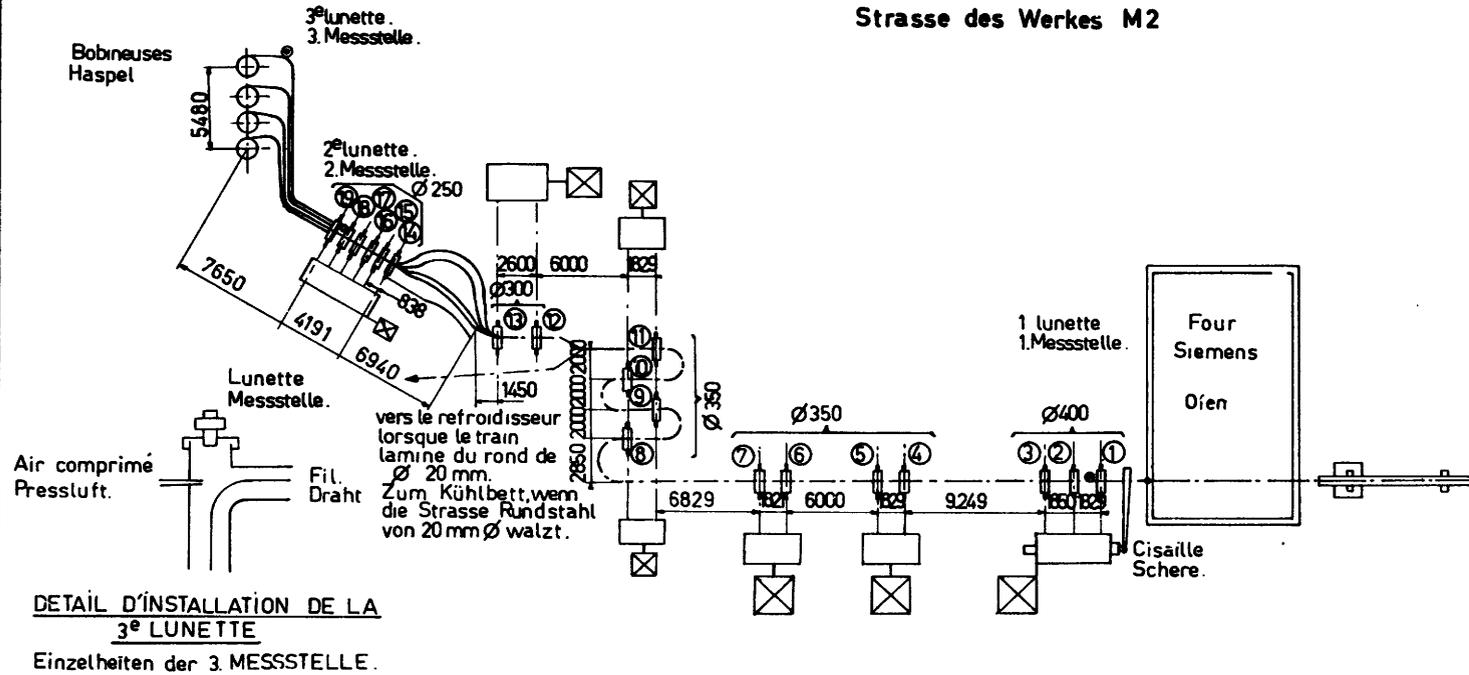
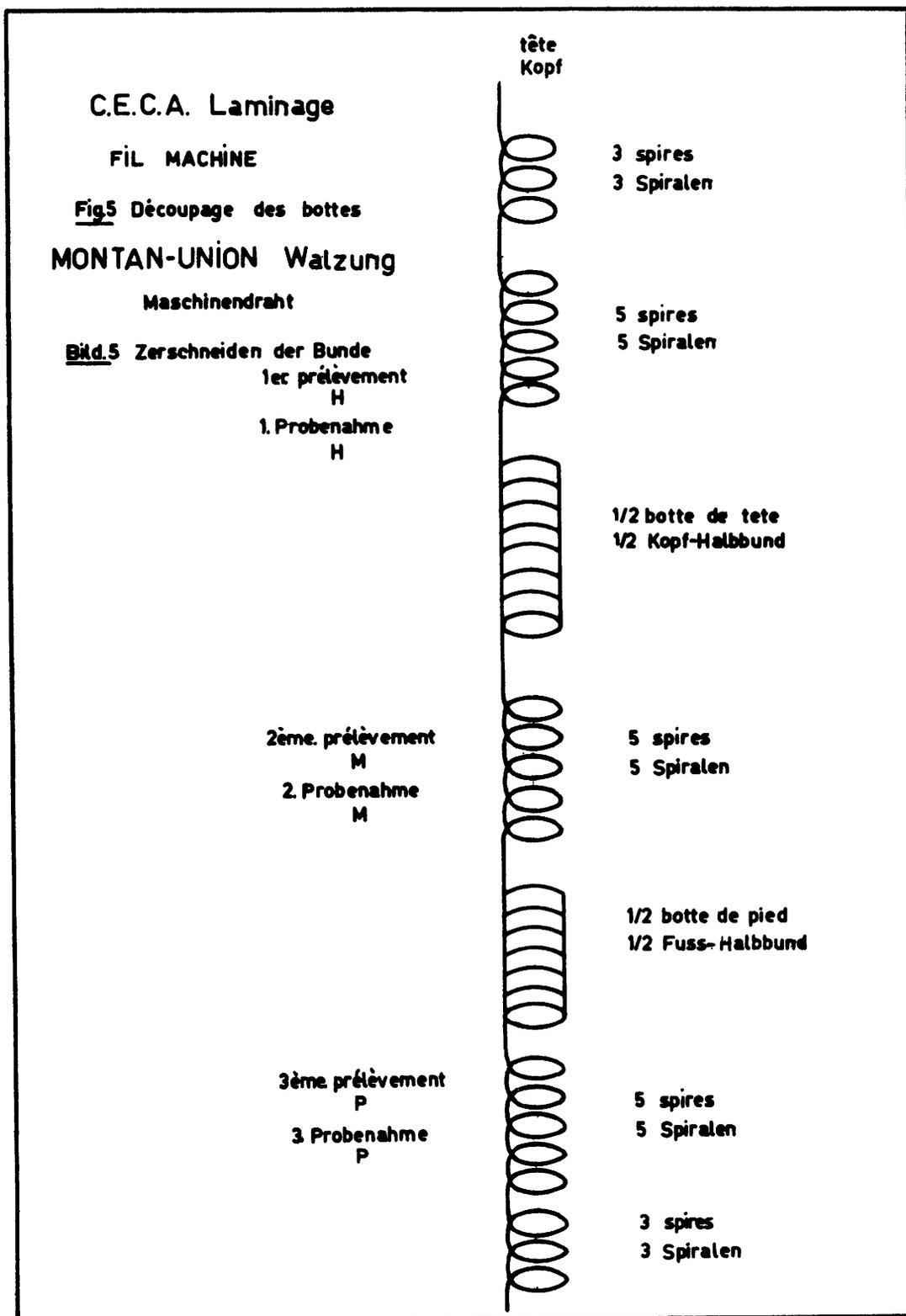


Fig. 4  
Bild



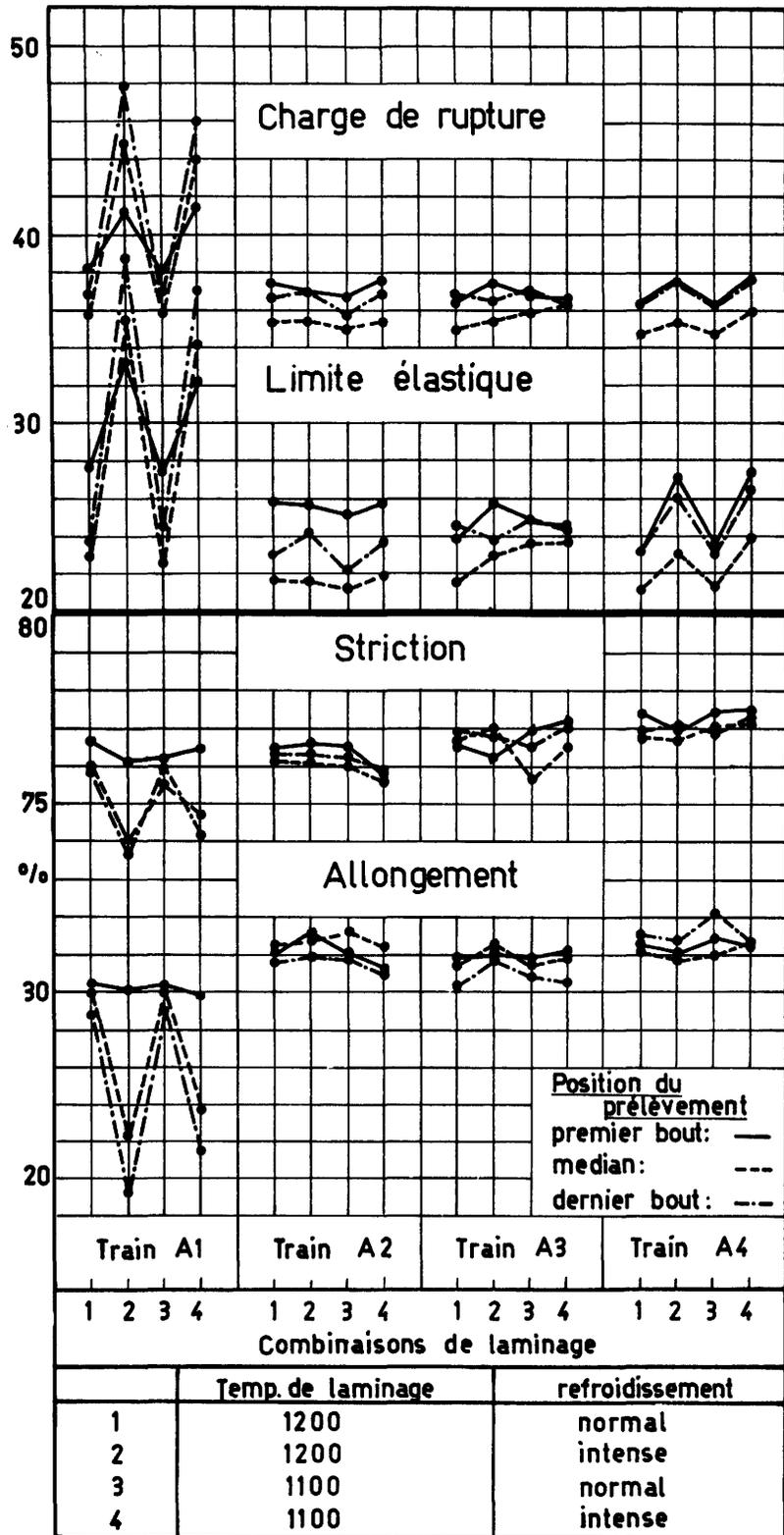


Fig 6

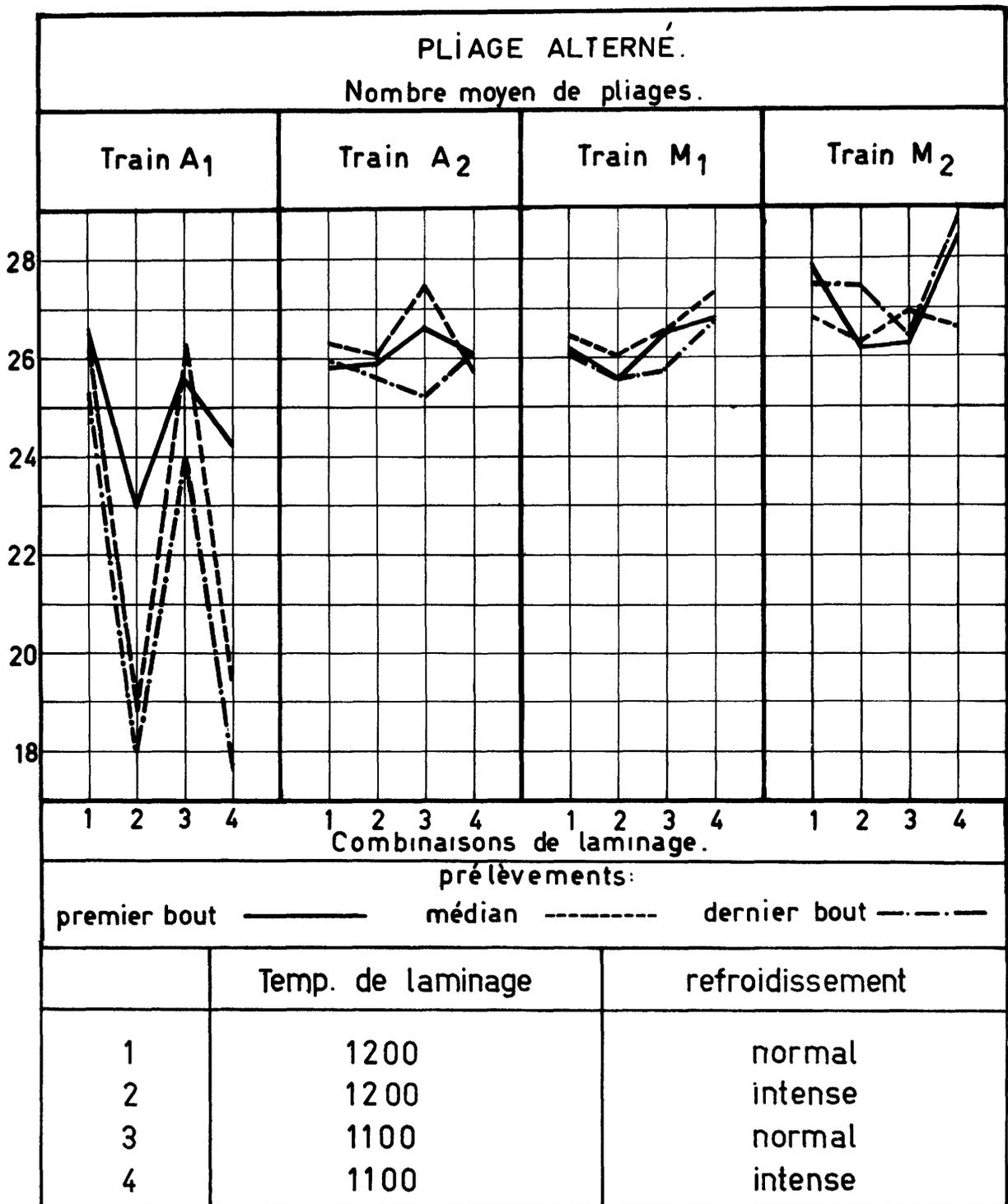


Fig.7

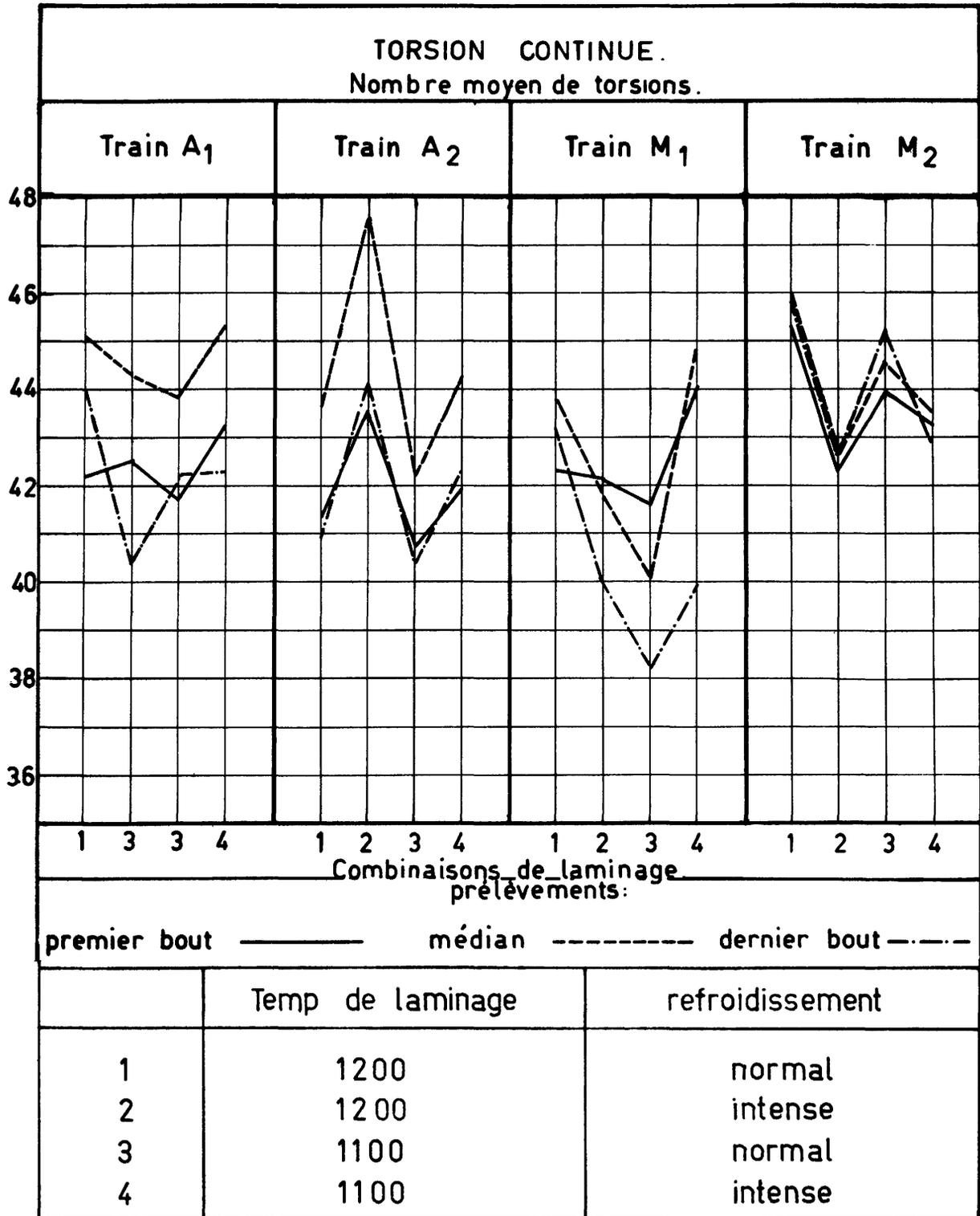


Fig.8

ETUDE DE LA CALAMINE  
RAPPORT SUCCINCT

Par MM. J. MOREAU, M. CAGNET et P. CHAUVÉAU

Dans le cadre des recherches organisées par la C.E.C.A., la Section Oxydation du Département Physique de l'IRSID a entrepris une étude systématique de la calamine formée sur trois nuances d'acier extra-doux aux différents stades de la fabrication: lingots, demi-produits et produits finis.

Ce travail a été effectué en examinant tout particulièrement divers aspects: conditions de formation, structure, composition, quantité ou épaisseur, adhérence, etc.... Il a été complété par des études de laboratoire ayant pour but de reproduire des calamines semblables en partant des mêmes aciers et en faisant varier les conditions de réchauffage.

Les méthodes utilisées: métallographie optique, analyse par diffraction des rayons X, microsonde électronique de Castaing-ONERA, réchauffage continu dans l'air avec enregistrement à la thermobalance Chevenard, réchauffage discontinu en atmosphère contrôlée; quoique classiques, ont du être adaptées aux conditions particulières de l'étude. On insistera sur le fait que d'une façon générale, la calamine surmontant un métal, forme un ensemble plus ou moins fragile et qu'il est nécessaire, pour obtenir des renseignements valables, d'éviter toute cause secondaire de perturbation. En particulier, l'examen métallographique comporte au préalable un *enrobage* spécial des échantillons dans une résine plastique *polymérisable à froid* et sans pression et un polissage soigné au moyen de poudres de diamant de façon à obtenir une surface plane n'arrondissant pas les *interfaces* d'éléments de duretés différentes.

I. CALAMINAGE DES LINGOTS

L'examen d'une peau de lingot d'acier extra-doux effervescent brut de coulée montre qu'elle est formée d'une couche non métallique (d'épaisseur maximum

2 à 3 mm) constituée d'une *matrice* de silicates et silicoaluminates dans laquelle se trouve dispersé du fer sous forme de *sphérules* de quelques dixièmes de mm de diamètre. Nous pensons que ces silicates se produisent dans la poche et pendant la coulée en lingotières par réaction entre le métal liquide et les réfractaires avec lesquels ils se trouvent en contact. Au cours de la montée du métal dans la lingotière, la *crasse* qui surnage est *repoussée* à tout moment vers les bords, mouille les parois et s'accroche aux aspérités. La peau se trouve ainsi emprisonnée entre la lingotière et le métal solidifié.

Cet ensemble subit de profondes transformations lors du réchauffage du lingot dans les pits: non seulement il se produit une attaque du métal par l'atmosphère oxydante donnant naissance à une couche de calamine dont la structure est maintenant classique - elle comporte de la face externe à la face interne trois couches  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  et  $\text{FeO}$  - mais encore, par suite de la présence des ions  $\text{Si}^{4+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$ , on rencontre à la base de la calamine et au contact du lingot massif, un composé particulier à bas point de fusion: la *fayalite*  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  en présence d'un grand excès de  $\text{FeO}$ . L'ensemble  $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{SiO}_4$  se présente généralement sous trois états distincts: *intergranulaire*, *eutectique* et *dendritique*.

La répartition de la fayalite sur la surface d'un lingot, est très irrégulière bien que la teneur moyenne varie peu lorsqu'on passe de la tête au pied sur une même face. D'une façon générale, là où elle est absente ou presque ( $\% \text{Fe}_2\text{SiO}_4 \leq 2\%$ ) la calamine constituée d'oxydes de fer est abondante ( $\% \text{Fe}_2\text{SiO}_4 > 5\%$ ) la calamine est boursouflée, poreuse avec des soufflures internes ou externes formées par dégagement de gaz provenant du lingot dans la fayalite du séjour aux pits.

La quantité de calamine peut être reliée aux caractéristiques du réchauffage: durée de séjour et température des pits, mais semble indépendante du mode d'élaboration de l'acier. Cette remarque permet donc d'établir une distinction dans la notion de perte au feu entre perte par calaminage aux pits (environ 1%) et perte par calaminage pendant la déformation au blooming (environ 2%)

## II. CALAMINAGE DES DEMI-PRODUITS

Les calamines obtenues après réchauffage des demi-produits: billettes et brames, présentent beaucoup d'analogie avec les calamines de lingots, seules diffèrent les épaisseurs et la proportion des constituants qui sont toujours:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  à la partie externe,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  et  $\text{FeO}$  à la partie interne. La couche de protoxyde de fer  $\text{FeO}$  est souvent divisée en deux zones, une zone de diffusion à cristaux basaltiques et une zone à cristaux polyédriques en contact avec l'acier, très fragmentée, où s'est produit un claquage ou décollement à haute température; c'est dans cette dernière zone que l'on rencontre généralement des granules de métal non oxydés, des inclusions d'oxydes mixtes et de silicates.

L'étude du métal immédiatement sous-jacent à la calamine a attiré notre attention sur la possibilité de formation d'une zone d'oxydation interne - zone de contamination - consécutive à la réaction d'oxydation superficielle normale

L'analyse à la *microsonde électronique* a permis de déterminer sa constitution: oxydes, silicates mixtes de fer et de manganèse, sulfures (dans le cas de réchauffage au mazout). Il apparaît enfin que la contamination du métal s'accompagne d'une décarburation notable.

L'influence sur le calaminage des différents facteurs entrant dans les conditions de réchauffage s'envisage de la façon suivante:

1. La durée de réchauffage agit sur l'épaisseur totale de la calamine, la profondeur de la zone contaminée et celle décarburee;
2. la température de réchauffage agit sur l'épaisseur totale de la calamine et sa compacité. La profondeur de la contamination, pratiquement nulle jusqu'à 1100° C, croît ensuite de façon accélérée;
3. l'atmosphère du four a une influence assez peu sensible ou tout au moins complexe sur l'épaisseur de la calamine et la contamination;
4. la qualité de l'acier qui détermine:
  - d'une part, la vitesse de calaminage: peu de différence pour les aciers extra-doux entre 800° C et 1200° C, par contre, l'acier mi-dur qui se calamine comme les extra-doux aux températures supérieures à 950° C, s'oxyde nettement moins vite au-dessous de cette température;
  - d'autre part, l'importance de la contamination due aux impuretés métalliques plus oxydables que le fer.

### III. CALAMINAGE DES PRODUITS FINIS

La méthode micrographique a permis d'établir les caractères généraux de formation des calamines sur les fils et les feuillards laminés à chaud dans quatre usines différentes. En effet, il est possible d'étudier des échantillons prélevés en tête, milieu et pied d'une même bobine, suivant l'axe ou la rive d'un même feuillard.

Au moyen de cette méthode, on a déterminé non seulement l'épaisseur de la calamine et sa constitution mais également on est conduit à estimer des caractéristiques telles que la compacité, l'adhérence de l'oxyde et l'allure de l'interface métal - oxyde. En ce qui concerne le facteur *compacité*, on a défini six classes par les qualificatifs suivants: *fragmentée*, *écaillée*, *craquelée*, *fissurée*, *poreuse* et *compacte*; l'adhérence a été caractérisée par des classes allant de l'adhérence nulle à excellente; de même, l'interface de très irrégulière à très régulière. Notons cependant que ce genre de classification ne représente pas une échelle de qualité absolue.

Au moyen de méthodes statistiques, on a étudié suivant un plan factoriel défini, l'influence des facteurs contrôlés tels que coulée et nuance de l'acier, l'usine où entrent les trains anciens et modernes, avec ou sans serpentage, la température de fin de laminage et la position du prélèvement de la bobine.

L'influence de ces facteurs peut se résumer de la façon suivante:

1. La nuance de l'acier et la coulée ont une action peu importante sur l'épaisseur moyenne de la calamine et sur ses caractéristiques;
2. l'épaisseur de la calamine et ses irrégularités varient beaucoup d'une usine à l'autre; il en est de même pour les variables qualitatives: compacité, adhérence, interface. Ainsi, sans être une règle générale, on peut dire par exemple que les calamines de feuillards laminés avec un train moderne ont une épaisseur plus régulière, elles sont plus compactes et ont une interface moins tourmentée que celles obtenues avec un train ancien;
3. la température de fin de laminage est très hautement significative vis-à-vis de l'épaisseur de la calamine et de son adhérence; son action s'étend également à la grosseur du grain de l'acier en surface;
4. enfin, si la position du prélèvement dans la bobine reste, elle aussi, hautement significative, il faut prendre de grandes précautions pour invoquer une différence axe - rive (cas des feuillards) par le fait que des variations existent d'une usine à l'autre et peuvent agir en sens inverse.

## ETUDE DE LA CALAMINE SUR LES ACIERS

par le Dr. Ing. W. LUEG

Dans le cadre des recherches communes sur le laminage à chaud des feuillards, des ronds, et du fil, le Max Planck Institut für Eisenforschung de Düsseldorf a entrepris d'étudier le calaminage de l'acier:

1. la résistance aux acides et la structure de la calamine des feuillards laminés à chaud (bande à chaud), et
2. la résistance aux acides et la structure de la calamine du fil machine.

Pour les deux recherches, des éprouvettes avaient été prélevées suivant un programme fixé préalablement, sur des feuillards laminés à chaud et sur les fils fournis en trois nuances d'acier, à savoir: acier Martin, acier Thomas normal, acier Thomas à l'oxygène.

Les résultats globaux des essais ont été dépouillés de manière que toutes les influences relatives à la résistance aux acides et à la structure de la calamine n'ont fait l'objet d'une étude critique que pour une seule nuance d'acier.

Les feuillards laminés à chaud et le fil machine, ont été, dans chaque cas, laminés sur deux trains anciens et deux trains modernes, afin de pouvoir déterminer l'influence de différents modes de laminage sur la structure de la calamine. Les conditions de température pouvant agir de façon déterminante sur la composition de la calamine et sur la résistance aux acides, il était en outre prescrit dans le programme d'essais deux températures de laminage pour les feuillards, et quatre combinaisons de laminage pour le fil machine (deux niveaux pour la température de laminage et deux intensités de refroidissement du fil machine avant bobinage).

Pour l'examen de la résistance aux acides de la calamine, un procédé a été mis au point, permettant de mesurer régulièrement, pendant l'attaque aux

acides, la perte de poids subie par une éprouvette de feuillard laminé à chaud ou de fil machine, son potentiel contre une électrode normale et la manière dont le courant passe entre l'éprouvette et l'électrode en platine.

Les valeurs caractéristiques de ces essais d'attaque à l'acide permettent de tirer certaines conclusions sur la structure de la calamine. En outre, la composition de la couche de calamine et sa structure métallographique ont été étudiées; à cet effet, les éprouvettes ont été polies transversalement après enrobage spécial préalable. Par l'attaque à l'acide chlorhydrique alcoolisé, il a été possible de distinguer exactement les trois oxydes de fer  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$  et  $FeO$ .

## 1. CALAMINE DES FEUILLARDS LAMINÉS A CHAUD

La calamine qui se forme sur les feuillards laminés à chaud peut contenir ces trois sortes d'oxydes de fer: la couche primaire de  $FeO$  (wustite) formée au moment du laminage se transforme partiellement ou presque totalement en  $Fe_3O_4$  (magnétite), selon le régime de température utilisé, après le laminage et pendant le refroidissement; le troisième oxyde (hématite) ne se rencontre que rarement et seulement en faibles quantités. Si le refroidissement de l'acier recouvert de calamine  $FeO$  s'effectue très rapidement, le domaine de transformation pour les oxydes  $FeO$  et  $Fe_3O_4$  est parcouru si rapidement que, dans bien des cas, il ne se forme qu'une couche extérieure mince constituée de  $Fe_3O_4$ . Si le refroidissement s'effectue plus lentement, la proportion de  $Fe_3O_4$  augmente considérablement. L'examen métallographique des couches de calamine a confirmé ces hypothèses: les trains de laminoir qui favorisent une transformation de  $FeO$  en  $Fe_3O_4$  présentent une couche plus ou moins épaisse de  $Fe_3O_4$  qui est séparée du fer lui-même par une couche résiduelle de  $FeO$ .

De plus, on a pu observer que les pores provoqués dans la couche primaire de calamine par des influences mécaniques favorisent la pénétration de l'oxygène atmosphérique. En conséquence, on a constaté que la couche de  $FeO$  était pénétrée par des ourlets de  $Fe_3O_4$  qui se formaient le long des pores. Un détachement mécanique de la calamine du métal lui-même, après le laminage, provoquait, en cas d'exposition à l'air et à des conditions favorables de température, la formation d'une couche de calamine composée successivement de  $Fe_3O_4$ ,  $FeO$ , puis à nouveau de  $Fe_3O_4$ .

Jusqu'ici, on considérait que seule la structure de la couche de calamine et sa composition quantitative en  $FeO$ ,  $Fe_3O_4$  et  $Fe_2O_3$ , déterminent la résistance aux acides de la calamine. Les essais d'attaque aux acides ont toutefois montré qu'un autre facteur peut considérablement activer ou retarder l'attaque: il s'agit du détachement mécanique de la couche de calamine dû à l'existence des pores et surtout aux décollements du métal. Aussi, il est difficile d'établir la relation qui existe entre la durée de l'attaque et la nature chimique de la calamine.

L'épaisseur totale de la couche de calamine dépend du régime de température pendant le laminage, de la durée absolue du laminage et des conditions de

refroidissement. Les trains de laminoirs modernes et rapides, munis d'un refroidisseur très efficace, donnent des couches de calamine très minces, tandis que les trains anciens favorisent le calaminage du matériel laminé.

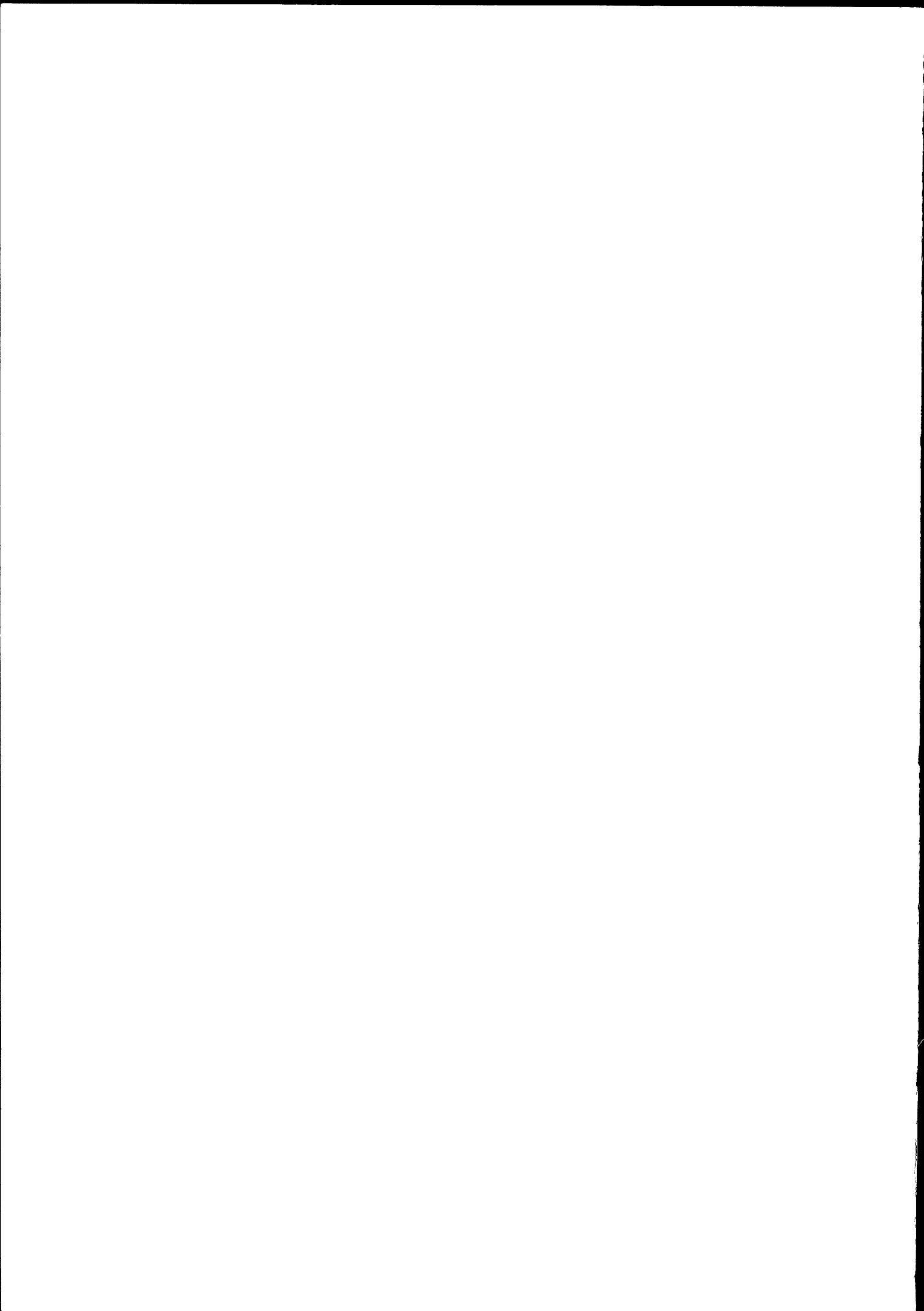
## 2. LA CALAMINE DU FIL MACHINE

La couche de calamine qui se forme sur le fil laminé à chaud ne se distingue pas essentiellement de celle que l'on trouve sur les feuillards laminés à chaud: ici encore on peut rencontrer, selon les conditions de température, les 3 sortes d'oxydes de fer. Une particularité de la couche de calamine recouvrant le fil machine est, surtout pour les trains anciens, le détachement mécanique très fort qui se produit par décollement et formation de pores, d'où il résulte une calamine à structure le plus souvent très irrégulière.

Comme résultats certains des examens du fil machine calaminé, on peut indiquer:

- a) que la couche de calamine se formant sur les trains anciens, composée la plupart du temps des trois oxydes, est faible et irrégulière;
- b) que la couche de calamine se formant sur les trains modernes est épaisse, régulière et dépourvue de pores, et qu'en outre elle contient une proportion relativement élevée de  $\text{FeO}$ .

Ces deux constatations coïncident avec le fait que, sur les trains anciens, la température du fil après la dernière cage de laminage est sensiblement plus basse que celle que l'on constate sur les trains modernes et rapides.



## CONCLUSIONS

par P. BLAIN

Une recherche de l'ampleur de celle qui vient d'être menée à son terme demandait la collaboration de très nombreux ingénieurs appartenant aux divers Etats membres de la Communauté.

L'élaboration du métal s'est faite dans deux aciéries, le laminage des demi-produits et des produits finis dans 13 laminoirs différents. La participation d'une usine de laminage à froid et d'une tréfilerie a été obtenue. Enfin les essais mécaniques et micrographiques ont été exécutés dans une quinzaine de laboratoires, d'instituts ou d'usines. Il faut remarquer que les séances de laminage demandaient une préparation minutieuse afin que les prescriptions du Bureau exécutif puissent être observées. De telles séances constituaient indiscutablement une grande gêne pour la production. On était donc en droit de se demander, avant la mise en oeuvre de ce vaste programme d'essais, s'il serait possible de parvenir à sa réalisation dans de bonnes conditions.

Nous sommes maintenant en mesure de dire, la démonstration en étant faite, que de telles recherches internationales, à condition qu'elles n'abordent pas des questions pouvant être exploitées, commercialement, sont parfaitement réalisables. Tous les ingénieurs, toutes les usines et tous les laboratoires participants ont fait preuve d'une extrême bonne volonté. Nous sommes heureux de pouvoir le dire en adressant nos remerciements à tous.

La question qui était posée était, nous le rappelons, de déterminer si la nature du matériel de laminage et si les conditions de température dans lesquelles il peut être utilisé avaient une influence sur la qualité des produits finis obtenus, étant entendu que l'on se limiterait à la nuance d'acier la plus courante, l'acier doux non calmé. Il n'eut pas été possible de répondre à une telle question si des essais méthodiques, de l'ampleur de ceux qui viennent d'être menés à bonne fin, n'avaient pas été faits.

La réponse à cette question, dans le cas du laminage de ronds de section moyenne, est que la nature du train et les écarts de température de laminage qui peuvent survenir normalement sont sans effet sur la qualité des produits. Il est important de savoir maintenant que, si des différences de qualité viennent à se manifester entre les produits livrés par certaines usines de la Communauté, la cause de ces différences doit être indiscutablement cherchée dans les conditions d'élaboration de l'acier. Seules des différences dans les défauts de surface peuvent être imputées aux laminaires.

Quelques écarts, généralement de peu d'importance, par rapport à la conclusion d'ensemble qui vient d'être formulée, se sont manifestés pour les fils et les feuillards, produits pouvant subir, du fait de leur très faible section, de rapides variations de température. Ceci appelle l'attention sur l'importance du cycle thermique auquel sont soumis ces produits non seulement au cours du laminage mais encore après la dernière passe de laminage. Pour les fils le refroidissement très rapide après laminage s'est traduit dans une des usines par une élévation très sensible de la limite élastique et de la résistance à la traction avec très forte diminution corrélative de l'allongement. L'absence de refroidissement artificiel après laminage se caractérise d'ailleurs par une légère déficience de l'allongement de sorte qu'en conclusion on peut dire qu'il existe des conditions optimum pour le refroidissement du fil machine après la dernière passe. Si ces conditions sont sensiblement réalisées la qualité du fil machine ne dépendra plus que des conditions d'élaboration de l'acier.

Une remarque liée aux considérations qui précèdent est l'importance des écarts des propriétés mécaniques entre les extrémités des bottes de fil et la partie centrale de la botte, écarts qui se manifestent sur une longueur de fil relativement importante à chaque extrémité de la botte. Heureusement ces hétérogénéités sont nettement plus réduites dans le cas des trains modernes.

Nos essais ont mis en évidence l'effet du grossissement du grain qui se manifeste avec l'acier doux lorsque la ou les dernières passes sont données à une température inférieure à 850 ou 875° C, c'est-à-dire après le début de la transformation ou refroidissement et lorsque le produit, après la dernière passe, est refroidi lentement. Ce grossissement du grain a été observé sur les fils et sur les feuillards et il s'accompagne d'une certaine détérioration des caractéristiques mécaniques des produits laminés à chaud. Il est à noter que ce défaut de qualité, qui se ferait sentir sur les caractéristiques des produits laminés à froid après le premier recuit, s'atténue après deux phases de laminage à froid. Nous n'avons retrouvé en effet aucune différence sensible entre les bandes laminées à haute température et celles laminées à trop basse température lors des essais effectués sur laminés à froid de 0,6 mm d'épaisseur, ces laminés à froid ayant subi deux cycles de réduction de 2,5 à 1,2 puis de 1,2 à 0,6 avec recuit à l'épaisseur de 1.2 mm.

Aussi bien en laminage à froid qu'en tréfilage les petits écarts de caractéristiques des laminés à chaud s'estompent de plus en plus au fur et à mesure de l'avancement de la dénaturation. On en vient donc ici aussi à cette conclusion que la qualité de ces produits de faible section dépend presque uniquement de la qualité de l'acier mis en oeuvre.

Enfin quelques observations intéressantes ont pu être faites au cours de la présente recherche sur l'influence de la calibration, ou de façon plus générale, des conditions de laminage sur la formation de défauts de surface.

Quant aux tolérances, il semble en première approximation que celles-ci ne soient pas effectuées par l'âge du train mais plutôt par des conditions d'utilisation.

Les dépenses occasionnées par la recherche ont été comptabilisées, après avoir été vérifiées de façon méticuleuse, par les Services Administratifs du CNRM à Liège. Grâce à l'extrême bonne volonté qui a été presque constamment rencontrée, le total des dépenses effectives a été nettement inférieur aux prévisions budgétaires. Nous tenons, en rendant hommage à l'esprit dans lequel ces conditions ont été traitées par la grande majorité des participants, à leur adresser nos sincères remerciements.

P. BLAIN

SERVICE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

5499/2/59/1