

## Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre ([www.eclydre.fr](http://www.eclydre.fr)).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](https://cnum.cnam.fr))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment possible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

## NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Auteur collectif - Revue
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1949-2003
Collation	167 vol.
Nombre de volumes	167
Cote	INDNAT
Sujet(s)	Industrie
Note	Numérisation effectuée grâce au prêt de la collection complète accordé par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (S.E.I.N.)
Notice complète	<a href="https://www.sudoc.fr/039224155">https://www.sudoc.fr/039224155</a>
Permalien	<a href="https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT">https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT</a>
LISTE DES VOLUMES	
	<a href="#">1949, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1949, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1949, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1949, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1949, n° 4 bis</a>
	<a href="#">1950, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1950, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1950, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1950, n° 4 bis</a>
	<a href="#">1951, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1951, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1951, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1951, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1952, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1952, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1952, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1952, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1952, n° spécial</a>
	<a href="#">1953, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1953, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1953, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1953, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1953, n° spécial</a>
	<a href="#">1954, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1954, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1954, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1954, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1955, n° 1 (janv.-mars)</a>

	<a href="#">1955, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1955, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1955, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1956, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1956, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1956, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1956, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1957, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1957, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1957, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1957, n° spécial (1956-1957)</a>
	<a href="#">1958, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1958, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1958 n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1958, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1959, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1959, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1959 n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1959, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1960, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1960, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1960, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1960, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1961, n° 1 (janv.-mars)</a>
<b>VOLUME TÉLÉCHARGÉ</b>	<a href="#">1961, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1961, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1961, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1962, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1962, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1962, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1962, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1963, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1963, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1963, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1963, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1964, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1964, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1964, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1964, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1965, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1965, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1965, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1965, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1966, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1966, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1966, n° 3 (juil.-sept.)</a>
	<a href="#">1966, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1967, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1967, n° 2 (avril-juin)</a>
	<a href="#">1967, n° 3 (juil.-sept.)</a>

	<a href="#">1967, n° 4 (oct.-déc.)</a>
	<a href="#">1968, n° 1</a>
	<a href="#">1968, n° 2</a>
	<a href="#">1968, n° 3</a>
	<a href="#">1968, n° 4</a>
	<a href="#">1969, n° 1 (janv.-mars)</a>
	<a href="#">1969, n° 2</a>
	<a href="#">1969, n° 3</a>
	<a href="#">1969, n° 4</a>
	<a href="#">1970, n° 1</a>
	<a href="#">1970, n° 2</a>
	<a href="#">1970, n° 3</a>
	<a href="#">1970, n° 4</a>
	<a href="#">1971, n° 1</a>
	<a href="#">1971, n° 2</a>
	<a href="#">1971, n° 4</a>
	<a href="#">1972, n° 1</a>
	<a href="#">1972, n° 2</a>
	<a href="#">1972, n° 3</a>
	<a href="#">1972, n° 4</a>
	<a href="#">1973, n° 1</a>
	<a href="#">1973, n° 2</a>
	<a href="#">1973, n° 3</a>
	<a href="#">1973, n° 4</a>
	<a href="#">1974, n° 1</a>
	<a href="#">1974, n° 2</a>
	<a href="#">1974, n° 3</a>
	<a href="#">1974, n° 4</a>
	<a href="#">1975, n° 1</a>
	<a href="#">1975, n° 2</a>
	<a href="#">1975, n° 3</a>
	<a href="#">1975, n° 4</a>
	<a href="#">1976, n° 1</a>
	<a href="#">1976, n° 2</a>
	<a href="#">1976, n° 3</a>
	<a href="#">1976, n° 4</a>
	<a href="#">1977, n° 1</a>
	<a href="#">1977, n° 2</a>
	<a href="#">1977, n° 3</a>
	<a href="#">1977, n° 4</a>
	<a href="#">1978, n° 1</a>
	<a href="#">1978, n° 2</a>
	<a href="#">1978, n° 3</a>
	<a href="#">1978, n° 4</a>
	<a href="#">1979, n° 1</a>
	<a href="#">1979, n° 2</a>
	<a href="#">1979, n° 3</a>
	<a href="#">1979, n° 4</a>
	<a href="#">1980, n° 1</a>
	<a href="#">1982, n° spécial</a>

	<a href="#">1983, n° 1</a>
	<a href="#">1983, n° 3-4</a>
	<a href="#">1983, n° 3-4</a>
	<a href="#">1984, n° 1 (1er semestre)</a>
	<a href="#">1984, n° 2</a>
	<a href="#">1985, n° 1</a>
	<a href="#">1985, n° 2</a>
	<a href="#">1986, n° 1</a>
	<a href="#">1986, n° 2</a>
	<a href="#">1987, n° 1</a>
	<a href="#">1987, n° 2</a>
	<a href="#">1988, n° 1</a>
	<a href="#">1988, n° 2</a>
	<a href="#">1989</a>
	<a href="#">1990</a>
	<a href="#">1991</a>
	<a href="#">1992</a>
	<a href="#">1993, n° 1 (1er semestre)</a>
	<a href="#">1993, n° 2 (2eme semestre)</a>
	<a href="#">1994, n° 1 (1er semestre)</a>
	<a href="#">1994, n° 2 (2eme semestre)</a>
	<a href="#">1995, n° 1 (1er semestre)</a>
	<a href="#">1995, n° 2 (2eme semestre)</a>
	<a href="#">1996, n° 1 (1er semestre)</a>
	<a href="#">1997, n° 1 (1er semestre)</a>
	<a href="#">1997, n°2 (2e semestre) + 1998, n°1 (1er semestre)</a>
	<a href="#">1998, n° 4 (4e trimestre)</a>
	<a href="#">1999, n° 2 (2e trimestre)</a>
	<a href="#">1999, n° 3 (3e trimestre)</a>
	<a href="#">1999, n° 4 (4e trimestre)</a>
	<a href="#">2000, n° 1 (1er trimestre)</a>
	<a href="#">2000, n° 2 (2e trimestre)</a>
	<a href="#">2000, n° 3 (3e trimestre)</a>
	<a href="#">2000, n° 4 (4e trimestre)</a>
	<a href="#">2001, n° 1 (1er trimestre)</a>
	<a href="#">2001, n° 2-3 (2e et 3e trimestres)</a>
	<a href="#">2001, n°4 (4e trimestre) et 2002, n°1 (1er trimestre)</a>
	<a href="#">2002, n° 2 (décembre)</a>
	<a href="#">2003 (décembre)</a>

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Volume	<a href="#">1961, n° 2 (avril-juin)</a>
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1961

<b>Collation</b>	1 vol. (p. [25]-49-[4] p. de pl.) : ill. ; 27 cm
<b>Nombre de vues</b>	46
<b>Cote</b>	INDNAT (55)
<b>Sujet(s)</b>	Industrie
<b>Thématique(s)</b>	Généralités scientifiques et vulgarisation
<b>Typologie</b>	Revue
<b>Langue</b>	Français
<b>Date de mise en ligne</b>	03/09/2025
<b>Date de génération du PDF</b>	08/09/2025
<b>Recherche plein texte</b>	Non disponible
<b>Permalien</b>	<a href="https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT.55">https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT.55</a>

## Note d'introduction à [l'Industrie nationale \(1947-2003\)](#)

---

[L'Industrie nationale](#) prend, de 1947 à 2003, la suite du [Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publié de 1802 à 1943 et que l'on trouve également numérisé sur le CNUM. Cette notice est destinée à donner un éclairage sur sa création et son évolution ; pour la présentation générale de la Société d'encouragement, on se reporterà à la [notice publiée en 2012 : « Pour en savoir plus »](#)

### [Une publication indispensable pour une société savante](#)

La Société, aux lendemains du conflit, fait paraître dans un premier temps, en 1948, des [Comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publication trimestrielle de petit format résumant ses activités durant l'année sociale 1947-1948. À partir du premier trimestre 1949, elle lance une publication plus complète sous le titre de [L'Industrie nationale. Mémoires et comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#).

Cette publication est différente de l'ancien [Bulletin](#) par son format, sa disposition et sa périodicité, trimestrielle là où ce dernier était publié en cahiers mensuels (sauf dans ses dernières années). Elle est surtout moins diversifiée, se limitant à des textes de conférences et à des rapports plus ou moins développés sur les remises de récompenses de la Société.

### [Une publication qui reflète les ambitions comme les aléas de la Société d'encouragement](#)

À partir de sa création et jusqu'au début des années 1980, [L'Industrie nationale](#) ambitionne d'être une revue de référence abondant, dans une sélection des conférences qu'elle organise — entre 8 et 10 publiées annuellement —, des thèmes extrêmement divers, allant de la mécanique à la biologie et aux questions commerciales, en passant par la chimie, les différents domaines de la physique ou l'agriculture, mettant l'accent sur de grandes avancées ou de grandes réalisations. Elle bénéficie d'ailleurs entre 1954 et 1966 d'une subvention du CNRS qui témoigne de son importance.

À partir du début des années 1980, pour diverses raisons associées, problèmes financiers, perte de son rayonnement, fin des conférences, remise en question du modèle industriel sur lequel se fondait l'activité de la Société, [L'Industrie nationale](#) devient un organe de communication interne, rendant compte des réunions, publient les rapports sur les récompenses ainsi que quelques articles à caractère rétrospectif ou historique.

La publication disparaît logiquement en 2003 pour être remplacée par un site Internet de même nom, complété par la suite par une lettre d'information.

Commission d'histoire de la Société d'Encouragement,

Juillet 2025.

### *Bibliographie*

Daniel Blouin, Gérard Emtoz, [« 220 ans de la Société d'encouragement »](#), Histoire et Innovation, le carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement, en ligne le 25 octobre 2023.

Gérard EMTOZ, [« Les parcours des présidents de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale des années 1920 à nos jours. Deuxième partie : de la Libération à nos jours »](#), Histoire et Innovation, carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, en ligne le 26 octobre 2024.

S.E.I.N.  
Bibliothèque

# L'INDUSTRIE NATIONALE

COMPTES RENDUS ET CONFÉRENCES  
DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT  
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

PUBLIÉS AVEC LE CONCOURS  
DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

1961  
N° 2

Revue trimestrielle

N° 2 : AVRIL - JUIN 1961

SOMMAIRE ET RÉSUMÉS DES ARTICLES

QUELQUES ASPECTS DE L'EXAMEN NON DESTRUCTIF DES PRODUITS SIDÉRURGIQUES,

par M. L. BEAUJARD 25

Les examens non destructifs sont de plus en plus utilisés dans l'industrie, car ils permettent de connaître rapidement certaines propriétés des produits étudiés qui, généralement, peuvent définir leur qualité. Cette connaissance est utile, à la fois pour le client et pour le producteur, car elle conduit à une mise au point plus facile de la fabrication.

L'emploi des examens non destructifs dans les industries à grosse production n'est possible que par leur adaptation précise. Il convient, notamment, d'opérer rapidement pour suivre la marche de la fabrication, avec un faible prix de revient du contrôle. Les solutions proposées mettent en œuvre les techniques récentes de l'électronique.

Quelques exemples sont donnés, concernant plus particulièrement l'examen ultrasonore des tôles minces laminées à froid, des billettes laminées à chaud, ainsi que l'examen électromagnétique de ces mêmes billettes.

RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DES TECHNIQUES DU VIDE EN MÉTALLURGIE,

par M. Léon MOREAU 36

Le développement rapide des techniques modernes, telles que l'utilisation de l'énergie atomique, l'aviation ou l'astronautique, a montré le rôle capital des matériaux de construction. La fabrication des métaux et alliages indispensables à la réalisation de ces techniques a posé en particulier des problèmes qui n'ont pu être résolus d'une manière satisfaisante que par la mise en œuvre de procédés d'élaboration sous vide ou en atmosphère rigoureusement contrôlée.

Les progrès réalisés ces dernières années dans ce domaine sont dus particulièrement à la mise au point d'ensembles importants d'enceintes à vide et groupes de pompage permettant d'obtenir de très basses pressions malgré les volumes gazeux élevés à extraire. Les principales réalisations dans le domaine de la fusion et de la coulée sous vide sont passées en revue.

publication sous la direction de **M. Georges CHAUDRON**, Membre de l'Institut, Président,  
avec le concours du Secrétariat de la Société.

Les textes paraissant dans *L'Industrie Nationale* n'engagent pas la responsabilité de la Société d'Encouragement quant aux opinions exprimées par leurs auteurs.

44, rue de Rennes, PARIS 6<sup>e</sup> (LIT 55-61)

Le n° 7,50 NF

C. C. P. Paris n° 618-48

## QUELQUES ASPECTS DE L'EXAMEN NON DESTRUCTIF DES PRODUITS SIDÉRURGIQUES<sup>(1)</sup>

par

M. L. BEAUPARD

Chef du Service Micrographie-Méthodes non destructives de l'I.R.S.I.D.

### 1<sup>o</sup> DÉFINITION ET ÉTENDUE DES PROCÉDÉS D'EXAMENS NON DESTRUCTIFS.

La notion d'essai non destructif est relativement vague. Suivant les pays elle est plus ou moins étendue. Par exemple, contrairement à ce que l'on pense habituellement en France, les Anglais semblent admettre que le procédé d'examen non destructif s'étend au cas où l'éprouvette essayée n'est pas détruite. La spectrographie peut alors être un examen non destructif. En France, l'application en est beaucoup plus restreinte. Le procédé sera non destructif lorsque la pièce examinée n'aura pas sa forme modifiée, ce qui exclut tout prélèvement d'éprouvette. Il faut donc faire appel à des techniques particulières qui consistent à soumettre la pièce à un champ, qu'il soit, par exemple, hertzien, magnétique, électrique ou ultrasonore. On constatera la modification de ce champ par la pièce, à l'aide de moyens appropriés. Comme en électronique, l'information sera contenue dans la modulation du champ.

La modification du champ sera fonction des propriétés physiques, chimiques et dimensionnelles de la pièce. Il conviendra de rechercher le procédé le plus sensible et le plus sélectif pour la découverte de la propriété que l'on veut déceler. On peut citer en exemple les procédés électromagnétiques d'examen qui, sensibles à de multiples propriétés des aciers, conduisent souvent à des déceptions lorsqu'ils sont imparfaitement mis en œuvre, car leur réponse ambiguë est la superposition des réponses partielles des propriétés physiques, chimiques et dimensionnelles. Les champs physiques utilisés doivent être produits par des générateurs réglables (postes de rayons X, traducteurs ultrasonores, aimants et électro-aimants) pour en modifier facilement les paramètres (intensité, fréquence). Il faut ensuite que le champ soit modifié par la pièce. Il n'y a pas de difficulté pour les champs électromagnétiques. Les champs magnétiques produits par électro-aimants pénètrent dans la pièce avec la plus grande intensité possible, lorsque les pièces polaires y sont en contact. Par ailleurs, le

(1) Conférence faite le 15 décembre 1960 à la Sté d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

*L'Industrie nationale. — Avril-Juin 1961.*

champ produit par un solénoïde convient bien. Une difficulté plus grande se rencontre dans l'usage des champs ultrasonores. Si l'on désire que la pièce reste dans l'air, il faut y appliquer le traducteur pour y faire pénétrer le champ ultrasonore; autrement, ce champ produit dans l'eau entre bien mieux dans une pièce immergée. Les moyens de détection des modifications du champ seront fonction de sa nature physique. La méthode de zéro sera certainement la plus précise. On peut y rattacher l'usage des étalons qui permettent d'apprécier de faibles différences.

La difficulté d'usage et d'interprétation des examens non destructifs réside dans le fait que la propriété que l'on veut déceler ne peut l'être que par son action sur une autre propriété physique qui, elle, altérera le champ. Il est en effet bien connu que l'interprétation des réponses des appareils est souvent difficile, ce qui explique qu'un procédé non destructif, pour être utile, doit avoir été étalonné par un grand nombre d'essais destructifs. Il ne convient pas, ici, de se préoccuper de la relation qui doit exister entre la propriété mise en évidence par l'essai non destructif et la valeur d'emploi de la pièce. L'expérience montre qu'il est souvent très difficile de l'établir.

En sidérurgie lourde, les procédés d'exams non destructifs seront généralement utilisés pour la détection d'hétérogénéités du métal, internes ou superficielles, et non pas pour en connaître une propriété moyenne telle que sa composition.

Les nuances élaborées sont moins nombreuses qu'en sidérurgie fine. D'autre part, la connaissance d'une propriété massique est très bien obtenue par l'examen de prélèvements tels que lingots de coulée ou éprouvettes de traction.

Les hétérogénéités, par contre, sont disséminées dans le produit suivant des lois généralement connues, mais dont la dispersion peut être importante. On conçoit donc que l'échantillonnage soit peu représentatif. Il faut tendre vers l'examen de toutes les pièces produites. Ce but idéal ne peut actuellement être réalisé que pour quelques produits où les méthodes d'examen ont été suffisamment étudiées. Les renseignements obtenus sont très précieux. Ils permettent, d'une part d'éliminer les pièces défectueuses et surtout ils conduisent à des mises au point de fabri-

cation bénéfiques. On ne peut, en effet, agir sur un procédé de fabrication que lorsqu'on connaît l'incidence d'une modification sur la qualité du produit.

On peut même soutenir, sans crainte de paradoxe, que le respect de certaines caractéristiques définies par des cahiers de charge peu réalistes conduit à ne pas pouvoir maintenir au niveau maximum d'autres caractéristiques qui, elles, sont importantes pour la tenue en service. Il convient, toutefois, de souligner que cette opinion n'est permise que par l'usage de méthodes d'examen très fines et une connaissance plus approfondie de l'élaboration et des propriétés d'emploi.

#### 2<sup>e</sup> EXIGENCES PARTICULIÈRES DES PROCÉDÉS D'EXAMEN NON DESTRUCTIFS EN SIDÉRURGIE LOURDE.

Il est concevable que la production importante en tonnage des usines sidérurgiques impose certaines conditions d'examen. Les unes sont favorables. On peut dire, par exemple, que la dimension des défauts à découvrir pourra être supérieure à la dimension des défauts qui préoccupent la sidérurgie fine. Ce fait est, croyons-nous, en rapport avec la dimension des demi-produits et l'usage auxquels ils sont destinés. La dimension plus grande des défauts à découvrir est pratiquement un facteur nécessaire à leur détection. En effet, il convient de considérer non pas la valeur absolue du signal donné par la modification du champ, mais le rapport signal sur bruit de fond. Le bruit de fond pourra être provoqué, par exemple, par une variation dimensionnelle aléatoire dans un examen gammascopique ou radioscopique, une rugosité superficielle ou un calaminage important dans un examen électromagnétique, une hétérogénéité de grosseur de grain dans un examen ultrasonore. Il apparaît à l'expérience, que ce bruit de fond est plus important lors de l'examen des demi-produits sidérurgiques courants que lors de l'examen de produits de la sidérurgie fine, de dimensions précises et constantes, d'état de surface fin, tant physique, mécanique que chimique, obtenu par usinage soigné. Un autre facteur favorable aux conditions d'examen est la quasi constance dimensionnelle, physique et chimique des produits qui y sont soumis. Ceci

est une conséquence des méthodes modernes de production en grande série. L'adaptation précise des appareils de sondage pourra être faite sans prévoir de réglages importants autres que ceux qui sont nécessaires pour encadrer les variations normales des propriétés du produit. Les solutions trouvées pourront conduire à des réalisations complètes et poussées, dont le prix sera facilement amorti par l'exploitation intensive qu'elles permettent.

D'autres conditions sont impératives et obligent à trouver des solutions appropriées. En tout premier lieu, l'examen doit être rapide et peu coûteux. Il doit être rapide pour pouvoir suivre la fabrication très importante. Il doit être peu coûteux pour ne pas grever le prix de revient de produits dont le prix de vente est relativement peu élevé. Le prix de la main-d'œuvre étant la part principale d'un coût d'exploitation, le problème est résolu par l'emploi d'une mécanisation extrêmement poussée du chantier de sondage. La manutention des produits est connue des usines et n'exige pas d'études particulières. Par contre, l'introduction du champ pourra soulever de grandes difficultés. Par exemple, le champ ultrasonore qui exige un contact entre la pièce mobile et un traducteur fixe, ne sera introduit convenablement dans la pièce que par des moyens bien étudiés. Il n'est en effet pas possible de songer à la technique d'immersion, largement utilisée aux États-Unis pour les pièces de sécurité. La cadence d'examen et le calaminage des produits s'y opposent. Les particules de calamine qui se décollent de la surface se mettent en suspension dans la cuve et troublient la réponse des appareils.

L'indication des hétérogénéités devra être faite par des moyens bien adaptés. L'enregistrement sur papier est inadéquat par la dépense qu'il occasionne et la fragilité des appareils inscripteurs. On ne peut non plus exiger d'un ouvrier l'observation constante de la trace lumineuse d'un oscilloscophe cathodique. Le voudrait-on, qu'il serait incapable de réagir à un signal de durée égale à un centième de seconde. Il faut donc avoir recours à des dispositifs à mémoire. Celui qui vient en premier à l'esprit est le marquage du produit. Lorsque ce n'est pas possible, il faut utiliser des moyens électroniques connus mais adaptés au cas particulier considéré.

**3<sup>e</sup> EXEMPLES : a) Examen électromagnétique de billettes d'acier doux.**

Le but qui nous a été proposé est le suivant ; La fabrication du fil machine, laminé à chaud sur train continu, exige l'emploi de billettes parfaitement saines intérieurement et extérieurement. Les défauts superficiels (criques, pailles), et internes (creux) subsistent en partie sur le fil et nuisent à sa qualité. De plus, les pailles peuvent être arrachées par les guides d'entrées du laminoir où elles s'accumulent. Il en résulte un bourrage qui peut faire que le fil échappe à l'engagement provoquant un arrêt du train. Le remède actuel consiste à visiter la surface de toutes les billettes et à écriquer au burin pneumatique les pailles qu'on y découvre. Le procédé est lent et coûteux. Il convenait donc de remplacer l'examen humain par un examen automatique à grande vitesse.

Le choix du champ a été fixé par la position des défauts à découvrir. Leur situation en surface suggérait le choix de la méthode électromagnétique, où les courants de Foucault, circulant en effet de peau, pouvaient laisser espérer une grande sensibilité. La vitesse de défilement des billettes était fixée à 1 m/sec. Cette valeur moyenne est assez rapide pour satisfaire les exigences de la production et assez lente pour permettre le fonctionnement des dispositifs électromécaniques nécessaires.

Nous avons utilisé tout d'abord un appareil du commerce fonctionnant par autocompensation. Un générateur de courant alternatif, de fréquence moyenne = (environ 10 000 Hertz) alimente deux bobines en opposition dans les bras d'un pont de mesure équilibré. La billette se déplace suivant l'axe des deux bobines accolées (figure 1). Lorsqu'une paille com-

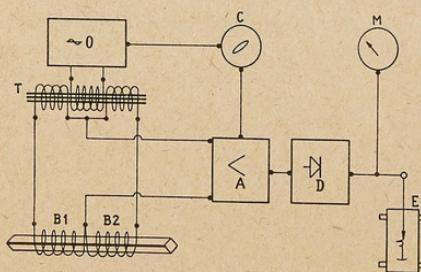


Fig. 1.  
Schéma synoptique de l'appareil d'origine.

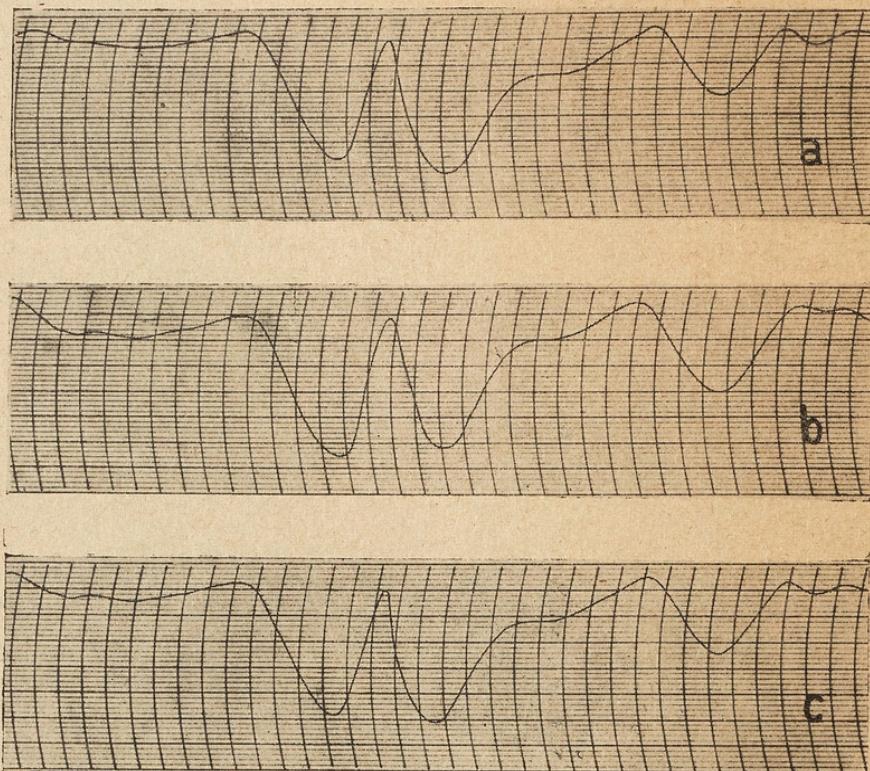


Fig. 2.

Essais comparatifs entre défaut naturel et défaut artificiel :  
a) défaut naturel; b) défaut naturel buriné et remplacé; c) défaut artificiel.

mence à entrer dans la zone d'influence de la première bobine, l'impédance de celle-ci varie et provoque le déséquilibre du pont. Lorsque le défaut parvient à l'aplomb du plan d'accrolement des bobines, l'équilibre est de nouveau rétabli. Le déséquilibre se reproduit ensuite par la variation de l'impédance de la deuxième bobine, lorsque la paille la traverse. Le défaut s'éloignant, l'équilibre des deux bobines se rétablit.

Un montage électronique délivre une tension proportionnelle à la valeur absolue du déséquilibre, et alimente un enregistreur à style dont le papier se déroule à une vitesse proportionnelle à celle de défilement de la billette. Le passage d'une paille est donc marqué par un signal à deux bosses (figure 2a). Outre le fait que cette forme est assez peu propice à une identification précise en présence d'un bruit de fond non négligeable, l'expérience montre que le pouvoir séparateur de l'appareil, suivant l'axe de la billette, est relativement faible. De plus, les variations lentes des propriétés physiques et chimiques de la billette provoquent, malgré le système d'autocomparaison employé, une dérive lente du zéro. Ce phénomène, peu gênant pour l'observation directe où l'œil sait distinguer une variation lente d'une variation rapide, est très néfaste à une commande automatique d'indicateur. Ces appareils fonctionnant en général par tout ou rien, se déclenchent lorsque le signal de commande dépasse un certain seuil. Si une dérive de zéro s'y superpose, le déclenchement manquera de fidélité dans le cas le plus favorable. Il pourra être même rendu impossible. Une autre observation pratique montre que l'introduction de la billette dans les bobines, ou son départ, donnent un signal extrêmement puissant et long, puisque le déséquilibre passe au maximum. Ce signal gêne la détection des signaux des pailles situées aux extrémités de la billette.

Partant de ces observations, nous avons dû étudier le principe de l'appareil pour en améliorer le fonctionnement. Nous n'avons pas voulu remonter aux phénomènes physiques fondamentaux mis en œuvre, car ils sont nombreux et complexes. Par ailleurs, l'expérience montre que les tentatives de ce genre n'ont eu qu'un demi succès. Il nous a semblé plus opportun de raisonner de la manière suivante : soit un courant alternatif défini par sa fréquence et son amplitude,

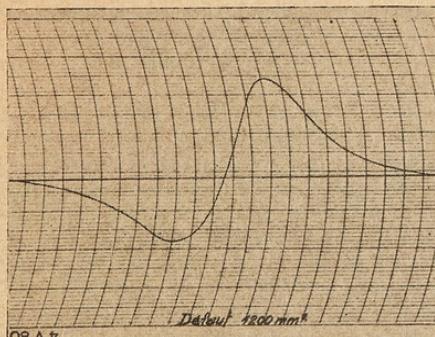


Fig. 3.  
Courbe d'un défaut à la sortie du démodulateur.

introduit dans un modulateur constitué des bobines et de la billette, avec ou sans pailles, quelles sont les caractéristiques dont la modification permettra la découverte avantageuse des défauts? Nous avons vu que la présence seule du courant de déséquilibre peut indiquer la présence d'un défaut, de la même manière qu'un message Morse contient une information par la présence ou l'absence de signal. Il nous a semblé que le déphasage provoqué par la variation d'impédance des bobines, pouvait être utilement mis à profit. Un démodulateur de phase nous donne à tout moment le déphasage qui existe entre le courant de déséquilibre et le courant fourni aux bobines. Dans ces conditions, l'expérience montre que lorsqu'une paille est située au centre de la première bobine, le déphasage est maximum. Ensuite, il s'annule puis redouble maximum mais de sens opposé au premier, lorsque le défaut se trouve dans la deuxième bobine. Il redouble nul lorsque le défaut s'éloigne (figure 3).

Une observation intéressante a facilité l'étude. Lorsqu'une paille est détachée de la surface de la billette, il ne se produit aucun déphasage lorsque son empreinte passe dans les bobines. De plus, lorsque la paille ôtée est remplacée par un morceau de tôle mince de surface approximativement égale, le signal donné par la paille est retrouvé (figures 2b et 2c). Nous nous sommes assurés que la forme (ronde ou carrée) du morceau de tôle, ainsi que son épaisseur n'avaient qu'une faible influence sur l'amplitude du signal. Nous avions donc à notre disposition la possibilité

de créer des pailles artificielles, de dimensions variables, et disposées à notre gré. Ceci nous a permis d'étudier la sensibilité et le pouvoir séparateur de l'appareil.

Nous avons fait suivre le démodulateur de phase d'un circuit de différentiation électronique, en fonction du temps. Ce dispositif a le double avantage d'être insensible aux variations lentes des propriétés physiques et chimiques de la billette et de faciliter l'identification du signal de déphasage, car celui-ci possède en son milieu une pente très raide, lorsqu'il traverse l'axe des abscisses. Dans ces conditions, le pouvoir séparateur le long de la billette est très amélioré. Par exemple, il passe de 100 à 20 mm, pour un défaut de 900 mm<sup>2</sup>. De même, l'effet d'extrémité de la billette est réduit de 250 à 100 mm (figures 4 et 5).

Le dispositif de mémoire utilisé est simplement formé par le marquage de la billette à l'aplomb du défaut découvert. Parmi plusieurs solutions envisagées, la projection de peinture par pistolet a été seule retenue. Le signal issu du différentiateur entre dans un montage électronique à seuil, qui ne le laisse passer que s'il est supérieur à un certain niveau. Le bruit de fond est supprimé, et seuls, les défauts dont la surface est supérieure à une valeur donnée agissent sur le pistolet de peinture (figure 6). Pour l'actionner, le signal est mis en forme par des circuits électroniques qui en délivrent des impulsions de courant identiques. Un choix judicieux du pistolet est nécessaire pour obtenir un temps de réponse suffisamment bref. La peinture est constamment sous pression et l'air de pulvérisation débite en permanence. Le signal électrique agit sur une électrovanne, alimentée en air comprimé, qui ouvre ou ferme le pointeau d'éjection de la peinture. Celle-ci doit posséder plusieurs qualités contradictoires. Elle doit être chargée en pigment pour avoir un bon pouvoir couvrant. Elle doit être fluide, pour se vaporiser instantanément. Elle doit sécher en quelques secondes pour que les taches qui marquent les défauts ne coulent pas en venant souiller les autres billettes lors du stockage après examen. Elle ne doit pas encrasser la buse et le pointeau du pistolet. Elle ne doit pas contenir de solvants toxiques. La collaboration d'un fabricant de peinture a été nécessaire pour mettre au point sa composition.

Dans ces conditions, le temps de réponse

du marquage est de 0,01 seconde, ce qui est bien suffisant.

L'appareil installé dans une ligne de sondage a déjà permis d'examiner environ 1 000 tonnes de billettes, pendant les essais d'adaptation. Une comparaison avec l'examen visuel a été faite (figure 7). L'appareil a marqué 90 p. 100 de pailles se trouvant sur les billettes. Cette proportion pourra être augmentée dans l'avenir avec un seuil de déetectabilité plus faible. 2 p. 100 des indications de l'appareil ne correspondaient pas à des pailles. Actuellement, il est procédé à des essais systématiques, avec des seuils différents, pour connaître exactement la dimension des pailles nuisibles qui doivent être éliminées.

b) *Examen ultrasonore des billettes d'acier doux.*

Cet examen a pour but de déceler le creux des billettes provenant de la tête du lingot. Ce défaut, lorsqu'il est important, provoque des incidents sérieux de laminage qui diminuent la production du train. Lorsqu'il est plus faible, le laminage en fil est correctement effectué, mais la qualité du produit ne permet pas son tréfilage en fil de très petit diamètre.

Le sondage ultrasonore est effectué sur la même ligne que l'examen électromagnétique, toujours à la vitesse de 1 m/sec. L'étude se poursuit encore car les difficultés sont grandes. La tête d'examen a été modifiée de nombreuses fois. Elle est du type à arrosage, où une chambre d'eau est interposée entre le traducteur piézoélectrique et la surface de la billette. Tout d'abord, construite avec deux traducteurs envoyant leur pinceau ultrasonore perpendiculairement à deux faces adjacentes de la billette carrée, elle n'en comporte plus qu'un seul. Les essais ont permis de se rendre compte qu'un seul traducteur suffit à découvrir les défauts importants, ce qui simplifie l'examen. La tête de sondage doit remplir deux fonctions un peu contradictoires. Elle doit être mobile suivant un grand nombre de degrés de liberté pour pouvoir appliquer le traducteur à la surface de la billette quelle que soit sa forme géométriquement mal définie. La tête de sondage doit aussi maintenir l'angle d'incidence du pinceau ultrasonore aussi constant que possible, car l'expérience montre que cet angle du pinceau

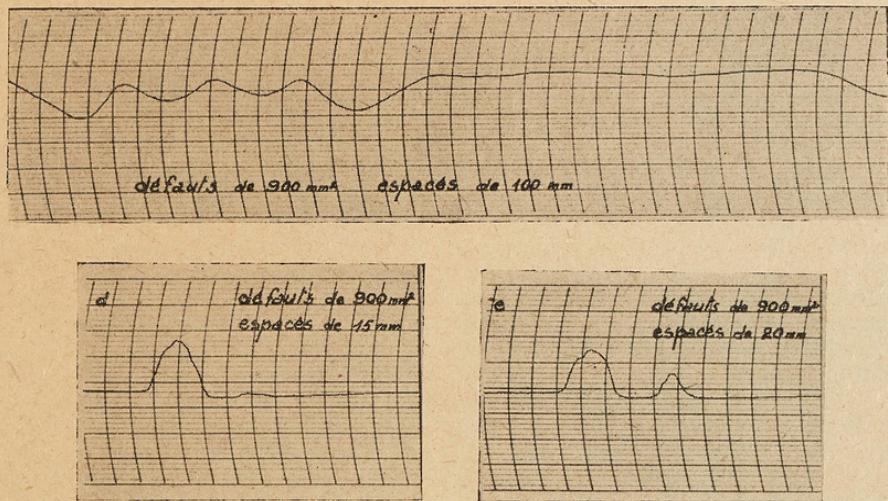


Fig. 4.  
Pouvoir séparateur avec l'ancien montage; d — e avec le montage actuel.

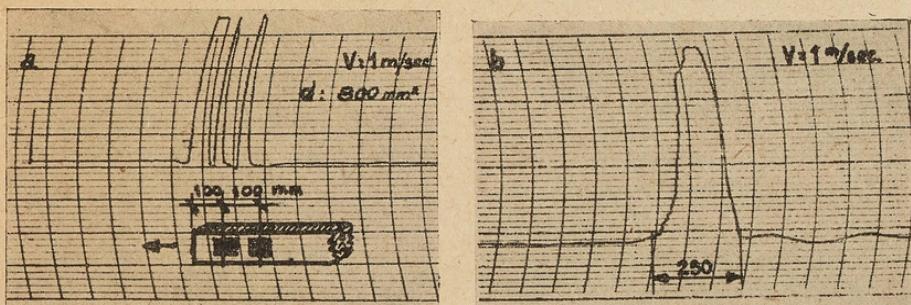


Fig. 5.  
Effet d'extrémité : a) montage actuel; b) ancien montage.

ultrasonore venant de la chambre d'eau et entrant dans la billette, ne doit pas s'écartez de  $\pm 1 d$  de la normale sous peine d'un affaiblissement très sensible. Les essais d'exploitation industrielle qui ont permis d'examiner plus de 20 000 tonnes de billettes, nous ont conduit à réaliser une tête de sondage souple où une suspension genre cardan est obtenue par une feuille de caoutchouc épaisse. Elle va être essayée très bientôt.

Le système d'indication envisagé au début consistait à partager la billette en longueurs de 50 cm. Chaque longueur était représentée par trois lampes, sur une rampe lumineuse, chacune correspondant à l'indication : absence de défaut, défaut inférieur à un seuil déterminé, défaut supérieur à ce même seuil. L'expérience tirée des essais a montré que cette présentation n'était pas la meilleure. Il semble, en effet, qu'il soit important de connaître le nombre de zones défectueuses et surtout la somme de leur longueur. Des dispositifs électroniques simples vont permettre de connaître ces valeurs. Il faudra ensuite fixer le seuil d'acceptabilité ou de rejet. Ceci ne pourra être fait qu'après de nombreux essais car il faut suivre la billette dans toutes ses transformations jusqu'après le tréfilage, pour apprécier la qualité du fil qu'elle donne.

La mécanisation du chantier des examens ultrasonore et électromagnétique comprend un stockage des billettes à sonder, une grille d'aménée, une ligne de rouleaux automoteurs de défilement et des dispositifs d'éjection à commande pneumatique pour diriger la billette suivant sa qualité vers des ranchers d'attente.

#### c) Examen ultrasonore des tôles minces.

L'examen ultrasonore des tôles minces à l'aide des techniques habituelles est malaisé. Si le traducteur droit est appliqué sur la surface de la tôle le signal obtenu est difficilement interprétable. En effet, diverses limitations des appareils courants s'additionnent pour fausser les indications. La fréquence d'examen est généralement trop faible même à 10 MHz, puisqu'elle conduit à une longueur d'onde qui est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la tôle; la durée de l'impulsion ultrasonore est trop importante : elle couvre plusieurs parcours aller et retour dans l'épaisseur de la tôle. Le temps d'éblouissement de

l'amplificateur correspond aussi au parcours ultrasonore de plusieurs épaisseurs. De plus, l'anisotropie de la tôle et la proximité des rives donnent lieu à des phénomènes d'interférence qui modulent la courbe enveloppe des échos multiples. Un appareil du commerce, délivrant une impulsion ultrasonore extrêmement brève, permet la détection des dédoublements dans les tôles minces. Cependant, la surface examinée est limitée à tout instant à celle qui est située immédiatement sous le traducteur. Une exploration de toute la surface de la tôle est impensable en contrôle industriel. Il convient donc de recourir à une autre technique.

Ayant étudié les ondes de Lamb depuis plusieurs années, nous avons pensé que ce mode particulier de propagation d'ébranlements élastiques pouvait être mis à profit pour l'examen des tôles minces. Les ondes de Lamb sont des ondes élastiques qui se propagent dans un milieu plan, dont l'épaisseur est de l'ordre de grandeur de leur longueur d'onde. Lamb a étudié leurs propriétés d'un point de vue purement mathématique. M. Collette, ingénieur au département Physique de l'IRSID, a repris le mémoire de Lamb en refaisant tous les calculs. Ce travail a permis de préciser les hypothèses simplificatrices avancées par Lamb, ainsi que les calculs intermédiaires fort longs. Le résultat pratique est résumé par un graphique qui donne en fonction du produit : fréquence  $\times$  épaisseur de la tôle, la vitesse de groupe des premiers modes de propagation symétriques et anti-symétriques. Il apparaît, dans ces conditions, que cette vitesse de groupe est dispersive, c'est-à-dire que pour une épaisseur donnée de la tôle, elle dépend de la fréquence dans une mesure qui est fonction de la pente des courbes (figure 8).

L'excitation de ces modes de vibration est simplement réalisée par l'usage d'un traducteur à angle que l'on pose à la surface de la tôle. Une hypothèse simple permet de calculer l'angle d'incidence dans le matériau de couplage. Ces angles peuvent être reportés sur les courbes précédentes. Il existe donc une relation étroite entre l'angle d'incidence, la fréquence de sondage, l'épaisseur de la tôle et la vitesse de propagation. L'expérience a montré qu'un choix supplémentaire doit être fait pour se trouver dans les meilleures conditions possibles d'examen. Les impulsions

ultrasonores à haute fréquence utilisées sont brèves. Leur spectre de fréquence s'étendra donc assez loin autour de la fréquence centrale nominale (figure 9). Si les conditions de sondage sont telles que le point représentatif de cette fréquence centrale, dans le diagramme précédent, se trouve sur une partie fortement inclinée d'une courbe, les diverses fréquences composant le spectre de l'impulsion vont se propager à des vitesses différentes. Leur temps de parcours sera ainsi différent. Revenant au traducteur après réflexion sur une hétérogénéité ou sur une rive, elles vont donner un écho extrêmement large, qui affectera sensiblement le pouvoir séparateur de l'examen. Il faut donc choisir une condition de sondage, dont le point représentatif (figure 10) soit situé sur une partie peu inclinée des courbes, où la dispersion est faible (figure 11). Il serait tentant de travailler sur un maximum où la vitesse de groupe est quasi constante en fonction de la fréquence. L'expérience montre et le raisonnement confirme que c'est malheureusement impossible dans les conditions décrites. Ces maxima sont obtenus pour un angle d'incidence dans le plexiglas, par exemple, qui correspond, dans l'acier, à l'angle de réflexion totale des ondes longitudinales (ou de compression). On se trouve dans la situation paradoxale de bénéficier d'un mode de propagation excellent que l'on ne peut pas exciter avec un coin. La difficulté peut être tournée en appliquant un traducteur droit sur la rive de la tôle. Il excite le mode de propagation recherché. Pour l'instant, ce montage de laboratoire ne peut pas s'appliquer à un examen industriel.

L'examen de la tôle se fera au mieux après avoir fait le choix de la fréquence et de l'angle d'incidence dans le milieu de couplage, en posant le traducteur près d'une rive, envoyant son pinceau ultrasonore perpendiculairement au sens du laminage. L'impulsion ultrasonore se réfléchit sur les hétérogénéités et sur la rive opposée de la tôle, en donnant les échos bien connus dans ce procédé de sondage. Les conditions physiques de réflexion sont encore mal connues. On peut penser que la tôle se comporte comme un guide d'onde, dont l'impédance caractéristique est fonction de sa géométrie. Si une dédoublure partage la tôle en deux épaisseurs, il ne semble pas absurde de concevoir que l'impédance caractéristique va être localement modifiée, ce qui

provoquera la naissance d'un pouvoir de réflexion. Une expérience de laboratoire va dans le sens de cette hypothèse. L'application d'un doigt huilé à la surface de la tôle donne un écho. Par tâtonnement, on peut superposer l'écho du doigt à l'écho d'un défaut, ce qui permet de préciser exactement son emplacement. Il peut aussi se faire que si l'on pose sur la tôle, à l'aplomb d'un défaut, une petite épaisseur de métal convenablement choisie, l'écho de défaut disparaît. On peut penser que l'impédance de la tôle est rétablie par la présence de la petite pièce métallique, ce qui annule le pouvoir de réflexion local.

Pour diminuer considérablement l'influence néfaste de l'absorption de l'onde ultrasonore par la tôle, nous avons été amenés à réaliser un amplificateur correcteur, dont le gain croît en fonction du temps. Si l'on place le traducteur près d'une rive, et qu'on l'en éloigne, on constate que l'enveloppe de la crête de l'écho de rive décroît avec la distance d'examen suivant une courbe grossièrement exponentielle. Un défaut donnera donc un écho dont la hauteur sera, entre autres, fonction de sa distance au traducteur. Pour éviter cet inconvénient, le gain de l'amplificateur est commandé par une tension électrique auxiliaire, dont la forme est déterminée pour qu'à chaque instant, le gain compense l'absorption due à la tôle (figures 12, 13, 14). Ainsi, un défaut donnera un écho de hauteur quasi constante, quelle que soit sa distance du traducteur.

La vitesse de défilement de la tôle étant de 2 m/sec. il est impossible à un observateur de noter l'apparition d'échos fugaces dus à des défauts ponctuels. La mise en mémoire nécessaire est obtenue par l'emploi d'un oscilloscope dont l'écran possède une rémanence infinie et effaçable à volonté, le Mémotron. On peut le décrire très schématiquement en précisant qu'il comporte, immédiatement devant l'écran fluorescent, une grille à mailles très fines, recouverte d'un diélectrique. Le pinceau d'électrons inscripteur y extrait, en son impact, des électrons secondaires; il naît donc des charges positives sur la grille. Un canon d'électrons lents éclaire toute la surface de la grille. Un choix judicieux de son potentiel électrique permet à ces électrons lents de ne traverser la grille qu'à l'aplomb des charges positives. Un processus d'autogénération des charges permet le maintien

du phénomène au cours du temps. Un interrupteur agissant sur une tension de polarisation efface la trace mise en mémoire et permet de recommencer une nouvelle inscription.

Pour pouvoir tirer parti de toute la surface de l'écran, nous nous sommes inspirés du balayage radial tournant du radar PPI (position-indication) avec modulation de la grille du tube Mémotron par les échos provenant de la tôle. Le balayage part du centre de l'écran suivant un rayon. On trouve d'abord une tache lumineuse, donnée par l'impulsion d'émission. Ensuite, viennent les taches données par les échos éventuels de défauts. Enfin, vers la périphérie de l'écran se trouve la tache permanente donnée par l'écho de rive. La tôle défile sous le traducteur en actionnant une synchromachine qui fait tourner le rayon d'inscription d'un angle proportionnel à son déplacement. Dans ces conditions, l'écran du tube donnera une sorte de représentation de la tôle, déformée circulairement, limitée par les échos permanents du top de départ et de l'écho de rive, figurant les deux rives de la tôle. L'amplificateur à gain croissant, en fonction du temps, permet d'obtenir une sensibilité quasi constante sur toute la largeur de la tôle (figures 15a et 15b).

Le mode d'examen décrit permet donc de sonder une tôle entière avec un seul traducteur.

Il est ainsi possible de mettre en évidence les inclusions non métalliques isolées (figure 15d) ou des dédoubleures caractérisées par leur forme très longue qui peut s'étendre sur toute la longueur de la tôle (figure 15c).

#### 4<sup>e</sup> Conclusions.

Nous pensons que la description de ces quelques exemples montre bien les exigences particulières de l'examen non destructif automatique des produits sidérurgiques, décrites dans la première partie de cet exposé. La difficulté n'est pas d'imaginer des méthodes de sondage. Elles sont très nombreuses. Le choix en est généralement facile. Par contre, le travail d'adaptation de la méthode au but précis recherché est délicat et difficile. L'expérience montre que, pour être utile, il doit être étudié dans ses moindres détails. Ceci explique le délai parfois long nécessaire à la mise au point de la chaîne de sondage. Elle ne peut être menée à bien que par une collaboration étroite avec le service intéressé de l'Usine. Nous devons nous féliciter à l'IRSID que, dans ce domaine particulier, cette collaboration ait toujours été effective. Je me dois d'en remercier la Direction de l'IRSID et la Direction des Usines qui nous ont donné toute l'aide souhaitable.

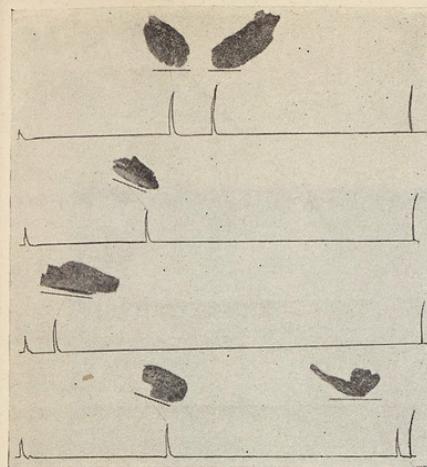


Fig. 6.

Relation entre l'impulsion reçue et le défaut correspondant après amélioration des circuits électroniques par rapport au diagramme de la figure 7.

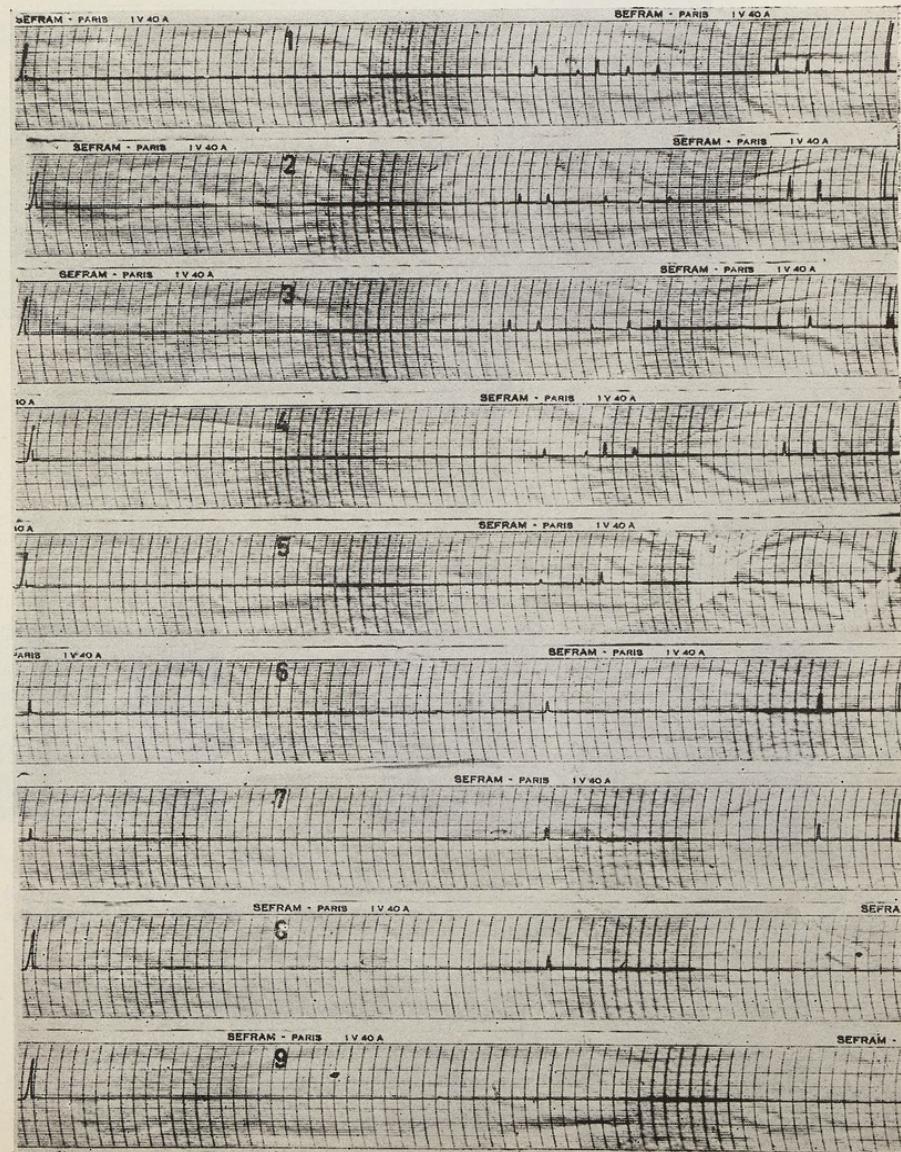


Fig. 7.

Sondages successifs d'une billette après identification et burinage de chaque paille.

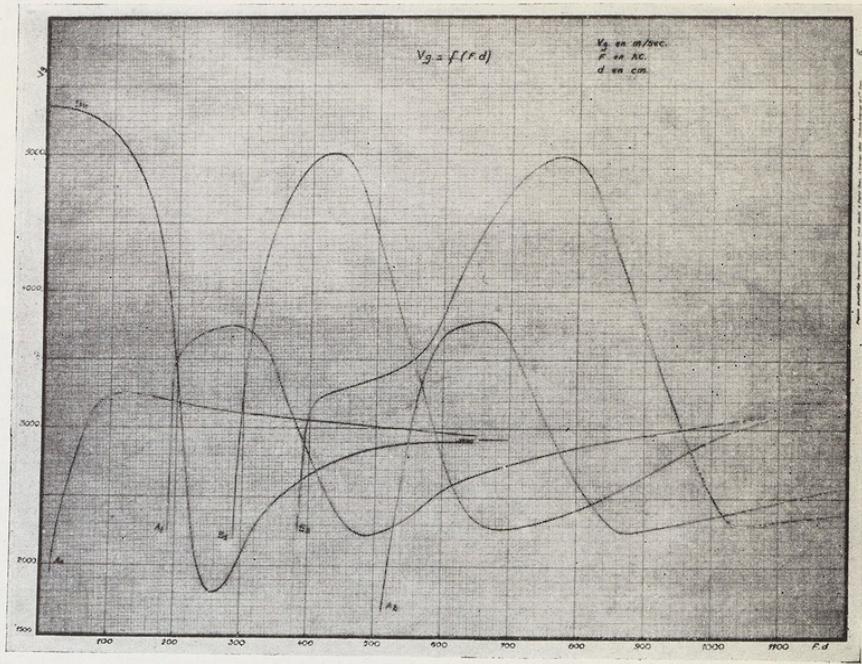


Fig. 8.

Vitesse de groupe des ondes de LAMB (m/sec.) en fonction du produit « fréquence » (kilohertz)  $\times$  épaisseur (cm).

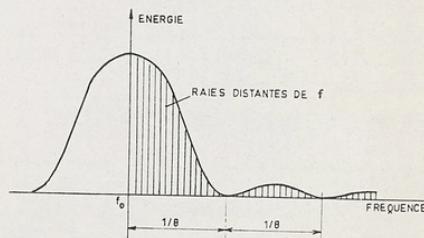


Fig. 9.

Spectre de fréquence :

- $f$  = fréquence de récurrence;
- $\theta$  = durée en  $\mu s$ . de l'impulsion.

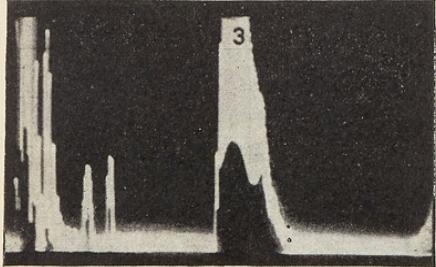


Fig. 10.

Épaisseur de la tôle : 1 mm — Fréquence : 2 MHz.  
Écho large avec dispersion — Mode So.

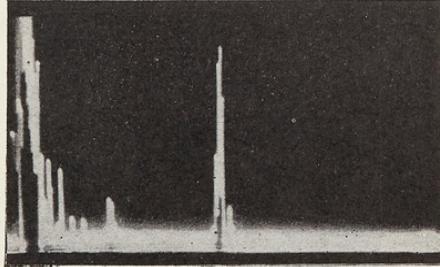


Fig. 11.

Épaisseur de la tôle : 1 mm — Fréquence : 1 MHz.  
Écho étroit sans dispersion — Mode So.

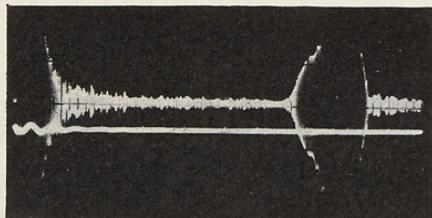


Fig. 12.

Gain pratiquement constant en fonction du temps.  
Oscillogramme habituel.

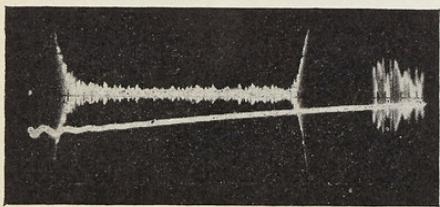


Fig. 13.

Gain croissant en fonction du temps.  
Correction correcte de l'affaiblissement.

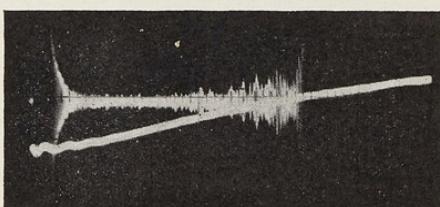
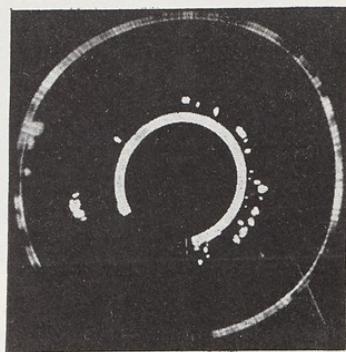
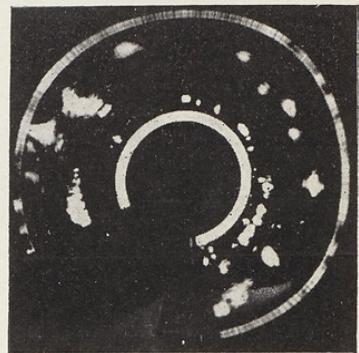


Fig. 14.

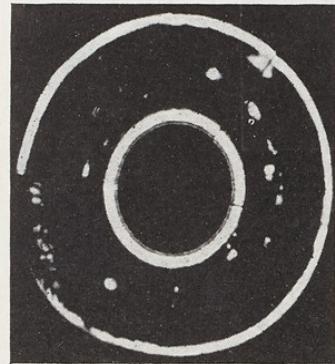
Gain croissant en fonction du temps.  
Surcorrection.



a



b



c



d

Fig. 15.

Présentation panoramique des défauts des tôles minces

- a) gain constant en fonction du temps;
- b) correction de l'affaiblissement;
- c) tôle 1 m × 1 m : grande dédoubleure;
- d) tôle 1 m × 2 m : défauts isolés.

## RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DES TECHNIQUES DU VIDE EN MÉTALLURGIE<sup>(1)</sup>

par M. Léon MOREAU,  
*Directeur adjoint du Centre d'Études de Chimie Métallurgique.*

Nul ne peut contester à l'heure actuelle toute l'importance que la technique du vide a prise dans de nombreux domaines.

Du seul point de vue métallurgique il est particulièrement intéressant d'effectuer sous basse pression un certain nombre d'opérations chimiques ou de traitements thermiques. Tout d'abord, pour mettre les métaux que l'on désire obtenir à l'abri des attaques possibles par l'oxygène, l'azote, voir l'humidité atmosphérique, mais également pour obtenir l'évolution rapide de réactions chimiques dans un sens favorable ou pour réaliser un abaissement important de la température de réaction.

Les techniques de la métallurgie sous vide ne sont pas entièrement nouvelles mais les progrès incessants dans ce domaine font qu'il n'est pas inutile d'effectuer périodiquement le point de cette importante question.

### RÔLE DU VIDE DANS LES OPÉRATIONS MÉTALLURGIQUES

L'élaboration des métaux consiste, le plus souvent, en la réduction d'un oxyde MO par le carbone, l'oxyde de carbone ou l'hydrogène. Ces réductions, généralement endothermiques, s'effectuent à des températures relativement élevées, favorisant la réaction du métal élaboré avec les constituants gazeux de l'atmosphère environnante et également avec les matériaux réfractaires constitutifs des revêtements des fours ou des creusets. C'est le cas rencontré dans de nombreuses techniques d'élaborations métallurgiques telles que celles du titane, du zirconium et également de l'acier.

#### I. — LA TECHNIQUE DU VIDE EN ACIÉRIE.

Nous ne traiterons dans cette première partie de notre exposé que l'application du vide à l'acier élaboré par des procédés classiques à des tonnages importants : 50 à 100 tonnes et plus.

Nous passerons en revue successivement l'action du vide sur les diverses impuretés : oxygène et carbone; hydrogène, azote contenues dans l'acier.

##### 1<sup>o</sup> Cas de l'oxygène et du carbone.

L'oxygène est un élément essentiel de l'élaboration de l'acier puisqu'il permet l'oxy-

(1) Conférence faite le 9 mars 1961 à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale. (20<sup>e</sup> Conférence Bardy.)  
*L'Industrie nationale. — Avril-Juin 1961.*

dation des impuretés contenues dans les charges des fours.

Au moment de la coulée, le métal contient donc une quantité appréciable de cet élément qui peut se trouver à l'état dissous ou bien combiné sous forme de solides ou liquides séparés, disséminés dans le bain (inclusions imparfaitement décantées).

Seul, comme l'ont montré de nombreux travaux, l'oxygène dissous est susceptible de contribuer à la formation du gaz lors du refroidissement de l'acier.

En effet, le carbone et l'oxygène dissous dans le métal liquide se combinent au moment de la solidification en donnant un important dégagement d'oxyde de carbone.

Dans un acier liquide, le fer, le carbone et l'oxygène dissous sont en effet en équilibre avec la phase gazeuse d'oxyde de carbone ( $+ \epsilon \text{CO}_2$ ).

Le produit des teneurs en carbone et en oxygène dissous à saturation dans le métal reste invariable quelle que soit la température envisagée à condition que la pression partielle de l'oxyde de carbone surmontant le bain soit elle-même constante ce qui s'écrit d'après la loi d'action de masse :

$$\frac{[\text{C}] \times [\text{O}]}{(\text{CO})} = K_t$$

de sorte que le produit des concentrations en carbone et oxygène est directement proportionnel à la pression partielle de l'oxyde de carbone dans la phase gazeuse.

Cette relation linéaire suggère qu'il devrait être possible d'atteindre, même avec un vide médiocre des teneurs en oxygène et en carbone particulièrement basses.

Si on admet à la suite des travaux de nombreux auteurs qu'à la pression normale le produit :  $[\text{C}] \times [\text{O}] = 25 \cdot 10^{-4}$ , le calcul montre que, pour un vide de 10 torr, des teneurs finales de 0,010 p. 100 de carbone et 0,003 p. 100 d'oxygène dans l'acier peuvent être espérées (1).

#### 2<sup>e</sup> Cas de l'hydrogène.

L'hydrogène peut être absorbé par le fer et les aciers dans lesquels il entre en solution solide d'insertion.

Le diagramme de solubilité de l'hydrogène dans le fer, en fonction de la température, a été établi il y a une cinquantaine d'années

par Sievert. Mais il a depuis été complété et confirmé par de nombreux auteurs.

La solubilité de l'hydrogène dans le fer liquide varie en fonction de la température et de la racine carrée de la pression partielle de ce gaz. Sievert a énoncé la loi générale donnant la teneur en hydrogène pour une pression  $p$  et une température  $t^{\circ}\text{C}$ .

$$H_2 (\text{cm}^3/100 \text{ g}) = 0,04 t^{\circ}\text{C} - 36\sqrt{P_{H_2}}$$

Théoriquement, pour une valeur de  $P_{H_2}$  tendant vers 0, la teneur en hydrogène devrait tendre vers 0.

Des mesures récentes sur l'acier liquide industriel coulé à l'air montrent que sa teneur en hydrogène varie entre 4 et 8 cm<sup>3</sup>/100 g suivant le degré d'humidité de charges et de la chaux introduites dans les fours.

L'hydrogène est particulièrement néfaste car il est responsable des défauts connus sous le nom de flocons. La formation des flocons dans l'acier est due à la très forte pression développée, au cours du refroidissement du métal, par la diffusion de l'hydrogène atomique suivie de son rassemblement, sous forme moléculaire, dans les petites cavités et défauts du métal. En effet, lorsque l'acier s'est suffisamment refroidi pour interdire toute déformation plastique appréciable, la pression dans ces défauts peut devenir considérable et provoquer des ruptures fragiles et des fissurations dont la formation peut d'ailleurs être grandement favorisée par certaines contraintes d'origines mécaniques, thermiques ou par celles qui résultent des transformations allotropiques, par exemple : la transformation de l'austénite résiduelle en martensite au sein de la perlite.

Certains auteurs ont en effet montré que la pression d'équilibre de l'hydrogène à des teneurs de 0,00015 à 0,0002 p. 100 (2 à 2,5 cm<sup>3</sup>/100 g) était à 200 °C de l'ordre de grandeur de la résistance mécanique du métal (2) (3).

Il semble maintenant bien établi que la formation des flocons dans les grosses pièces de forge peut être considérée comme un cas particulier du problème général de la fragilisation des aciers par l'hydrogène.

Certes, il est possible par un refroidissement lent, parfois judicieusement conjugué à des cyclages thermiques plus ou moins complexes, de favoriser la diffusion de l'hydrogène dans le métal solide et de diminuer

ainsi les risques de rupture par formation de flocons. Toutefois, l'augmentation sans cesse croissante des dimensions et du poids des pièces fabriquées rendent ces temps de recuit, qui peuvent atteindre plusieurs semaines, particulièrement gênants et onéreux. On a donc pensé, à juste raison d'ailleurs, que le dégazage de l'acier liquide permettrait d'obtenir le résultat cherché avec des vitesses pouvant être plusieurs milliers de fois supérieures à celles réalisées par la simple diffusion dans l'état solide.

### 3<sup>e</sup> Cas de l'azote.

La solubilité de l'azote dans le fer ou l'acier, comme celle de l'hydrogène, varie avec la température et la racine carrée de la pression partielle du gaz au-dessus du métal fondu.

Au cours d'une élaboration d'acier les teneurs en azote correspondant à l'équilibre pour la pression atmosphérique ne sont généralement pas atteintes dans le bain, contrairement à ce qui se passe pour l'oxygène.

Dans le cas d'un abaissement de pression, la teneur en azote, tout au moins à la surface du bain, devient supérieure à celle d'équilibre et il se produit une nette dénituration de cette surface; au sein même du métal, au contraire, la pression ferrostatique s'oppose à la diffusion et ne permet qu'un cheminement extrêmement lent de l'azote vers l'extérieur.

Ces considérations, un peu hâtivement exposées, nous montrent toutefois le grand intérêt du dégazage de l'acier sous pression réduite.

Dans le traitement sous vide de gros tonnages d'acier, il faut en premier lieu considérer que le facteur temps est d'une importance capitale. Cette opération métallurgique qui doit s'insérer dans le cycle normal d'une aciéries doit être suffisamment courte pour ne pas amener un refroidissement trop grand du métal.

On peut estimer, d'après l'examen des comptes rendus de marche des installations existantes, qu'un temps moyen de 15 à 20 minutes est nécessaire pour le traitement sous vide de 70 à 100 tonnes d'acier. Pendant ce laps de temps, le refroidissement du métal varie de 35 à 80 °C suivant le type d'installation utilisée et le tonnage traité;

cette dernière valeur est déjà prohibitive et conduit à l'obligation de surchauffer le métal avant le traitement ou à utiliser des installations de dégazage munies de puissants dispositifs de chauffage.

La figure 1 montre les principales réalisations possibles de traitement de l'acier sous vide.

*Le schéma 1 (figure 1) a le privilège de représenter l'une des premières en date des réalisations industrielles.*

Les résultats obtenus par ce procédé de dégazage sont assez controversés; certains auteurs prétendant, comme nous l'avons signalé tout à l'heure au sujet de l'azote, que seules les régions voisines de la surface du bain se trouvent dégazées.

Dans le cas des aciers effervescents pourtant, la réaction de l'oxygène sur le carbone est si violente qu'elle produit un brassage du bain favorable au départ des gaz, mais provoque souvent le débordement du métal liquide dans la chambre à vide, ce qui rend plus délicate la récupération de la poche après le dégazage (4) (5).

Signalons toutefois qu'une amélioration très sensible du procédé a été réalisée (6) en injectant à la base de la poche de l'argon ou même de l'azote au travers de briques poreuses incorporées dans le fond de celle-ci.

*Le schéma 2 (figure 1) représente la technique dite de coulée en lingotière sous vide. De sérieux problèmes technologiques sont posés par la réalisation de l'étanchéité de la*

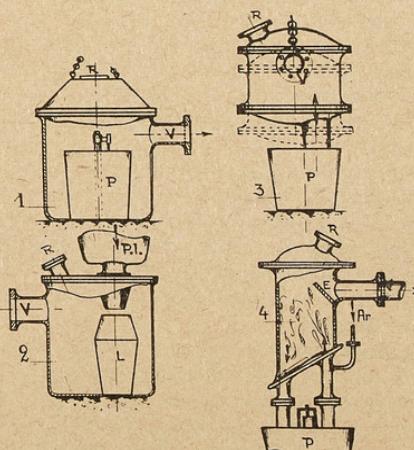


Fig. 1.

liaison entre la poche intermédiaire et la chambre à vide.

Il est en particulier nécessaire de mettre en place un obturateur (généralement constitué par un disque d'aluminium) pour pouvoir réaliser le vide dans la chambre de dégazage avant chaque coulée.

Dans ce dispositif, le jet de métal se trouve étalé, ce qui est particulièrement favorable à l'élimination des gaz.

Les essais effectués ont montré qu'au début de la coulée il était nécessaire de ne pas avoir une pression inférieure à 15 mm pour éviter un étalement exagéré du métal qui se figerait sur les parois de la lingotière ou de la masselote nuisant ainsi à la qualité du lingot. Ce n'est que lorsque le métal a atteint une certaine hauteur dans la lingotière que l'on peut continuer à abaisser progressivement la pression.

Dans la lingotière, le comportement de l'acier coulé sous vide est analogue à celui d'un acier effervescent. La réaction entre l'oxygène et le carbone se maintient en effet, car aux basses pressions, l'oxygène contenu dans le bain a une plus grande affinité pour le carbone que pour l'aluminium (6) (7).

Il est important d'obtenir dans la chambre à vide, quelle que soit sa capacité, une pression finale inférieure à 4 ou 5 torr si l'on veut être assuré d'une élimination suffisante de l'hydrogène pour éviter les flocons. La coulée du métal ne doit pas être trop rapide car le taux d'élimination de l'hydrogène augmente en fonction du temps de coulée et du maintien sous vide.

La coulée terminée, l'air est rapidement admis dans la chambre jusqu'à la pression atmosphérique afin de permettre l'enlèvement rapide du couvercle et le réchauffage de la tête du lingot.

*Le schéma 3 (figure 1)* représente une installation de dégazage dite de l'élévateur sous vide. La chambre à vide est suspendue à l'extrémité d'un levier basculant, actionné par un équipement hydraulique ou est solidaire d'une plate-forme suspendue à un pont roulant.

L'acier liquide peut être aspiré au moyen d'un tube qui plonge dans la poche de coulée. L'élévation et la descente de la chambre à vide provoque un passage alternatif d'une fraction de l'acier dans celle-ci, fraction qui se trouve soumise à l'action du vide.

Le rapport de la quantité d'acier à traiter, au poids du métal admis dans la chambre influe directement sur le nombre d'aspirations nécessaires et partant sur la durée totale du dégazage.

L'évolution de la pression au cours d'une des opérations de dégazage dépend principalement des caractéristiques du groupe de pompage utilisé ainsi que du volume de la chambre à vide (8) (9) (10).

Pour éviter le refroidissement du métal au contact du revêtement réfractaire de la chambre, il est nécessaire de la préchauffer avant l'admission du métal; il est même avantageux de maintenir ce chauffage pendant l'opération de dégazage tout entière.

La solution généralement adoptée consiste à l'emploi de résistors de graphite placés horizontalement à la partie supérieure de la chambre de dégazage.

De sérieuses difficultés technologiques sont à vaincre pour le montage de ces résistors, en particulier en ce qui concerne les entrées de courant qui doivent être parfaitement étanches.

Il semble d'autre part, dans l'état actuel de la technique, qu'il soit assez difficile de dissiper plus de 800 à 1 000 kW dans ces résistors sans en provoquer une rapide détérioration par éclatement. Il faut signaler enfin que l'on constate également des ruptures fréquentes du graphite par suite de son attaque par des projections d'acier.

La puissance de chauffe utilisée est un peu supérieure à celle nécessaire pour amener la chambre à vide à la température du bain d'acier.

Des essais ont été effectués pour tenter de substituer au chauffage par résistance un chauffage par arc, mais de multiples difficultés non encore entièrement résolues n'ont jusqu'ici pas permis l'exploitation industrielle de ce procédé.

*Le schéma 4 (figure 1)* représente le dispositif de dégazage par circulation sous vide. L'acier contenu dans une poche est aspiré d'une façon continue par un tube solidaire d'une chambre à vide et retourne dans la poche par un tube d'évacuation prévu à cet effet. La circulation est rendue possible grâce à l'expansion d'un gaz amené à la partie inférieure du tube d'aspiration. C'est en quelque sorte une remontée de Verneuil bien connue dans les laboratoires.

Le vide qui règne dans la chambre de dégazage provoque d'abord la montée de l'acier dans les deux tubulures, à une hauteur correspondant à la pression atmosphérique (1 450 mm d'acier pour une pression de 760 mm de mercure). Le gaz d'entraînement, généralement de l'argon, est injecté à un niveau très légèrement supérieur à celui du métal contenu dans la poche; au contact de l'acier liquide, le gaz subit une expansion importante qui provoque une accélération du courant métallique ascendant.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le débit du gaz d'entraînement est faible; les auteurs du procédé indiquent qu'il est compris entre 5 et 10 p. 100 du volume gazeux dégagé par l'acier lui-même.

A son entrée dans la chambre à vide, le métal est fortement divisé et projeté contre les parois réfractaires, ce qui favorise le départ des gaz.

L'acier dégazé se rassemble sur le fond incliné de la chambre et, si la hauteur de circulation a été bien choisie, retourne sans entraîner de gaz dans la poche.

Cette hauteur doit être telle que la colonne métallique atteigne juste le fond de la chambre côté conduit d'aspiration; dans ces conditions, la vitesse de circulation est la plus grande et le dégazage plus complet.

La baisse de température pendant le traitement est faible, 30 à 35 °C quand on traite 100 tonnes d'acier mais celle-ci s'accentue notablement si l'on diminue le tonnage traité.

Il est alors préconisé de compenser cette baisse de température par un dispositif de chauffage approprié (11).

L'appréciation de la vitesse d'écoulement du métal à travers la chambre de dégazage a pu être réalisée en introduisant au moyen d'une longue canne un peu d'or radioactif à l'entrée de la tubulure d'aspiration; un compteur placé sur l'autre tubulure permet d'apprécier la décroissance de la radioactivité jusqu'à niveau constant, c'est-à-dire en fait de mesurer la rapidité avec laquelle l'homogénéité du bain s'effectue (12).

Quel que soit le procédé adopté, parmi les quatre que je viens de présenter, la chambre de dégazage doit être connectée à un puissant groupe de pompage par l'intermédiaire d'un ensemble dépollueur (du type cyclone par exemple) et de condenseurs de façon à

abaisser la température des gaz admis dans les pompes. Les trois principaux types de pompes susceptibles d'être utilisés sont les éjecteurs de vapeur d'eau, les pompes à piston et les pompes roots.

Le principe de l'éjecteur de vapeur est bien connu. On laisse déborder de la vapeur à haute pression à travers une tuyère. Cette vapeur animée d'une grande vitesse traverse un diffuseur en entraînant les gaz.

La complexité des pompes à éjection de vapeur croît avec le vide limite que l'on désire obtenir. Avec deux étages en série et des convergents bien refroidis on possède un appareillage stable donnant un vide limite de l'ordre du torr avec une vitesse d'extraction de 10 000 à 15 000 m<sup>3</sup>/H à la pression atmosphérique. Un des gros avantages reconnus des éjecteurs à vapeur est évidemment le fait qu'ils ne comportent aucune partie rotative, ce qui les rend peu sensibles aux poussières abrasives.

Les pompes à piston sont en somme des compresseurs fonctionnant à l'envers. Elles sont particulièrement robustes mais leur capacité d'aspiration est assez limitée (2 500 à 5 000 m<sup>3</sup>/H à la pression atmosphérique). Ces pompes doivent être soigneusement protégées des poussières abrasives.

Les pompes roots furent, dès leur origine déjà fort ancienne, utilisées pour le transfert des liquides. Ce n'est que depuis quelques années qu'une étude scientifique des caractéristiques de ces pompes permit leur utilisation dans la technique du vide.

Les deux rotors de la pompe tournant en sens inverse ne se touchent pas et ne sont pas au contact des parois de l'enveloppe. Cette disposition en permet le fonctionnement en l'absence de toute lubrification intérieure et la rend beaucoup moins sensible aux poussières, qui ne peuvent colmater les surfaces mais sont au contraire éjectées avec les gaz. Les constructeurs se sont ingénier à créer des paliers et roulements ne laissant pénétrer aucune trace d'huile vers l'intérieur de la pompe.

En service normal, la température intérieure de cette pompe peut atteindre sans inconvénient 100 °C.

D'autre part, le parfait équilibrage des rotors leur permet une vitesse de rotation élevée et partant un débit important.

Du fait des jeux nécessaires au bon fonc-

tionnement, une telle pompe ne peut avoir une étanchéité absolue. Les pertes de charge par retour des gaz pompés deviennent d'ailleurs de plus en plus faibles au fur et à mesure que le vide s'améliore du fait, bien entendu, de l'augmentation non négligeable du libre parcours moyen des molécules. C'est principalement pour cette raison que la pompe roots a besoin d'être associée à une pompe d'amorçage, généralement une pompe rotative à anneau liquide. La figure 2 donne

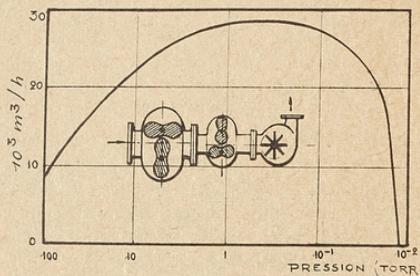


Fig. 2.

d'après le constructeur le schéma et la courbe caractéristique d'un groupe de deux pompes roots en série amorcées par une pompe centrifuge à anneau d'eau dont la vitesse de pompage est supérieure à  $25\ 000\ m^3/\text{heure}$  dans l'intervalle de pression 0,1 à 10 torr.

*Quelques améliorations constatées sur les aciers par leur coulée sous vide.*

Quel que soit le procédé employé et les avantages particuliers qu'y voient leurs promoteurs, on peut d'ores et déjà signaler quelques améliorations obtenues dans l'ensemble :

1<sup>o</sup> Élimination de 35 à 70 p. 100 de l'hydrogène contenu dans le métal suivant le mode de travail et sa durée. La figure 3 compare

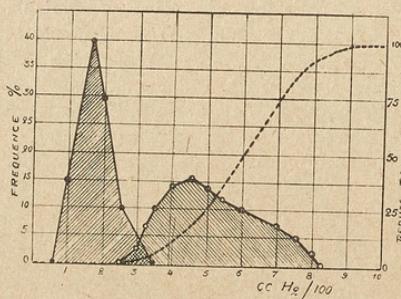


Fig. 3.

les teneurs en hydrogène obtenues par la méthode de dosage par fusion à l'étain dans le cas d'un acier Martin coulé ou non sous vide.

Sur ce diagramme figure également la courbe des pourcentages de rebut pour flocons des pièces de forge en fonction de la teneur en hydrogène. On voit que ce pourcentage est nul dans le cas du traitement de l'acier sous vide.

2<sup>o</sup> Élimination de l'oxygène.

Les procédés de traitement sous vide des aciers, en particulier la coulée en lingotière sous vide, permettent d'abaisser fortement la teneur en oxygène du métal.

La figure 4 montre ce phénomène observé

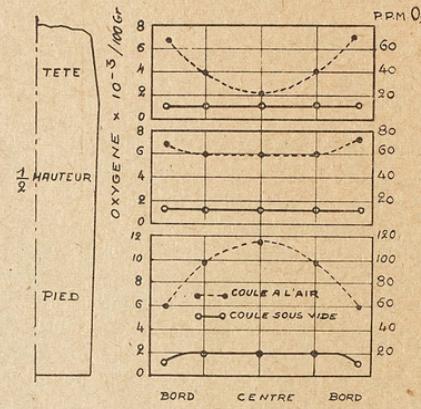


Fig. 4.

sur acier non allié. Les dosages d'oxygène ont été effectués par la méthode de fusion réductrice.

On remarque sur ce diagramme non seulement l'abaissement important de la teneur en oxygène, mais la parfaite homogénéité du métal obtenu par coulée sous vide.

Enfin, mentionnons la diminution importante des défauts superficiels dus aux points durs sur les tôles d'emboutissage profond obtenus avec des aciers traités sous vide puisqu'ils ne contiennent que peu ou pas d'aluminium à l'état d'alumine.

D'autre part, de nombreuses observations de cassures d'éprouvettes de traction ont permis de constater que la grosseur moyenne des inclusions d'un acier traité sous vide est sensiblement plus petite que dans le même métal coulé à l'air, ce qui explique sans

doute certaines améliorations signalées sur les caractéristiques mécaniques telles l'allongement de rupture et la striction.

## II. — LA TECHNIQUE DU VIDE DANS LA MÉTALLURGIE DES MÉTAUX PARTICULIÈREMENT RÉACTIFS (cas du titane et du zirconium).

La préparation et la refusion des métaux particulièrement réactifs avec l'oxygène et l'azote atmosphérique ainsi qu'avec la vapeur d'eau doit être réalisée dans des fours dont l'atmosphère soit suffisamment inerte (hydrogène, argon, hélium) ou encore plus simplement et plus efficacement dans le vide. Malheureusement les métaux comme le titane et le zirconium fondus sous vide réduisent à haute température tous les matériaux réfractaires constituant les creusets, en s'oxydant et mettant en liberté une certaine quantité de métal qui pourra se dissoudre et donner des alliages binaires dont les propriétés peuvent être fort différentes du métal pur que l'on tentait de fabriquer tandis qu'une autre partie, suivant la nature du matériau réfractaire utilisé, distillera ou se sublimera pour se retrouver finalement dans les zones les plus froides des fours. Les creusets de graphite réagiront également sur les métaux fondus avec formation plus ou moins rapide de carbures passant en solution dans le métal.

Dans le cas de quelques rares applications techniques on peut d'ailleurs accepter une certaine pollution à condition que la teneur en impuretés (métal provenant de la réduction du creuset, carbure, oxygène ou azote) n'excède pas une valeur compatible avec les propriétés envisagées.

Le zirconium par exemple peut être fondu ou coulé dans le graphite, ce métal ne dissolvant qu'une quantité de carbone n'excédant pas 0,35 p. 100, teneur encore très acceptable pour beaucoup d'applications. Une teneur en carbone de 0,2 p. 100 n'affecte pas sa malléabilité, il peut donc être laminé en feuilles minces sans difficultés particulières. Par contre, cette même teneur en carbone diminue considérablement la résistance à la corrosion du métal.

Le titane au contraire est beaucoup plus réactif vis-à-vis du carbone. Cependant, d'après W. J. Kroll, la dissolution du car-

bure de titane dans le bain est suffisamment lente pour qu'en opérant une fusion rapide et avec une température bien contrôlée on puisse arriver à produire un métal ne titrant pas plus de 0,6-0,8 p. 100 de carbone.

De nombreuses recherches entreprises dans le but de trouver un matériau réfractaire susceptible de convenir à la fabrication des creusets devant servir à la fusion du titane et du zirconium ne donnèrent aucun résultat satisfaisant. C'est pourquoi, toutes les opérations métallurgiques relatives à la préparation de ces deux métaux sont réalisées dans des récipients métalliques. La fusion en particulier est toujours réalisée par le procédé de fusion sans creuset imaginé par Von Bolton (13).

La préparation du titane et du zirconium se fait à partir d'éponges provenant de la réaction des chlorures de ces métaux sur le magnésium.



Ce sont les procédés imaginés par Kroll. L'opération s'effectue à une température comprise entre 900° et 1 000° C en atmosphère inerte (argon ou hélium). Il se forme une éponge de petits cristaux métalliques que l'on sépare par chauffage et coulée du chlorure de magnésium formé. Ces éponges ne peuvent pourtant pas être fondues sans une purification préalable qui se faisait, à l'origine du procédé, par lavage aux acides; les impuretés se trouvaient dissoutes et le métal restait inattaqué.

### Purification de l'éponge métallique sous vide.

Actuellement, la purification de l'éponge se fait par chauffage sous vide de l'éponge brute à une température de 950° C dans des fours cuves en acier réfractaire (Cr, Ni). Les impuretés volatiles (Mg, MgCl<sub>2</sub>) distillent et sont récupérées par un dispositif de condensation.

Le vide réalisé dans les installations actuelles de purification est de l'ordre du micron. Pour éviter l'écrasement du four de grandes dimensions sous l'effet de la pression atmosphérique, on maintient entre celui-ci et la cloche portant les éléments chauffants, un vide de quelques torr.

Les pompes généralement utilisées sont

soit des pompes à diffusion de vapeur d'huile dont les débits peuvent atteindre des valeurs assez considérables : 8 000, voire même 36 000 litres/seconde, soit des éjecteurs à vapeur d'huile (boosters) les unes ou les autres étant associées à des pompes rotatives à simple étage.

Une des principales difficultés de l'opération consiste à éviter qu'une trop grande quantité d'humidité soit absorbée par l'éponge, gorgée de  $MgCl_2$  hygroscopique, lors de son chargement dans le four. En effet, le chlorure de magnésium au cours du chauffage peut, en présence d'eau, être plus ou moins hydrolysé avec formation d'acide chlorhydrique qui, passant dans les pompes en provoque la détérioration rapide.

De nombreuses solutions ont été proposées pour éviter cet inconvénient et leur nombre indique bien qu'aucune d'elles n'a encore donné pleinement satisfaction. Parmi celles-ci, nous citerons : l'emploi d'huiles antiarides, ainsi que le cyclage de l'huile des pompes à travers des dispositifs de filtration et de neutralisation.

Notons à ce sujet que les pompes à lest d'air sont tout particulièrement indiquées dans ce cas, puisqu'elles diminuent les possibilités de condensations des vapeurs à l'intérieur des corps de pompes.

#### *Fusion de l'éponge purifiée.*

L'éponge de titane ou de zirconium purifiée sous vide ne contient que fort peu de matières volatiles. Les auteurs et utilisateurs du procédé indiquent une teneur en Mg et Cl inférieure à 0,1 p. 100. La teneur en hydrogène est de l'ordre de 0,001 p. 100 quant à l'oxygène et l'azote, leur teneur n'a pas varié au cours de l'opération de raffinage et est restée celle préexistante dans l'éponge brute.

Dans les premières installations de fusion industrielle l'éponge plus ou moins finement broyée était fondue dans un arc jaillissant dans une atmosphère d'argon entre le métal et des électrodes auxiliaires de carbone ou de tungstène refroidies à l'eau. On obtenait dans ces conditions un lingot peu homogène enrichi en oxygène par le broyage de l'éponge et en carbone ou tungstène par les électrodes auxiliaires au cours de la fusion.

D'autre part, l'atmosphère confinée gênait considérablement le départ des impuretés volatiles encore contenues dans le

métal et, fait plus grave, conférait à l'arc une instabilité gênante qui en rendait le réglage particulièrement délicat.

C'est pourquoi, depuis quelques années, la fusion de l'éponge est réalisée sous vide poussé par le procédé dit de l'électrode consommable.

Différentes techniques ont été utilisées pour préparer de telles électrodes. La plus courante consiste à comprimer l'éponge grossièrement concassée au moyen d'une presse puissante (4 à 5 tonnes au  $cm^2$ ) de façon à obtenir des barreaux qui pourront être assemblés par soudure à l'abri de l'air pour obtenir des électrodes de dimensions et de poids désiré (soudure par le procédé argonarc).

On a également réalisé des fours de fusion sur lesquels les barreaux d'éponge comprimée constituant l'électrode sont soudés les uns aux autres, au fur et à mesure de leur usure.

L'entraînement de l'électrode dans ce dernier cas est obtenu par un système de galets rotatifs placés dans l'enceinte à vide. Il semble toutefois, qu'en raison de la grande difficulté d'obtenir des électrodes de forme suffisamment régulière et aussi à cause de l'augmentation croissante du poids de celles-ci, ce système soit abandonné au profit de la suspension de l'électrode à un dispositif comprenant une tige refroidie coulissant au moyen de joints à vide appropriés à travers la partie supérieure du four. La commande de la descente se faisant de l'extérieur (14, 15, 16).

La tige de suspension sert d'aménée de courant à l'électrode. Le joint à travers la paroi doit donc à la fois, être parfaitement étanche au vide et constituer un bon isolant électrique. On emploie souvent avec succès des joints industriels d'étanchéité du type Wilson.

Les fours de fusion comportent donc une enceinte métallique parfaitement étanche au vide (figure 5). A l'intérieur de cette enceinte à vide se trouve placé le creuset de fusion très énergiquement refroidi par un rapide courant d'eau.

La majeure partie des fours de fusion sont équipés en courant continu. En effet, l'arc ainsi réalisé est plus stable qu'en courant alternatif. L'électrode fusible constitue le pôle négatif de l'arc, le creuset refroidi le pôle positif. Cette disposition permet l'ob-

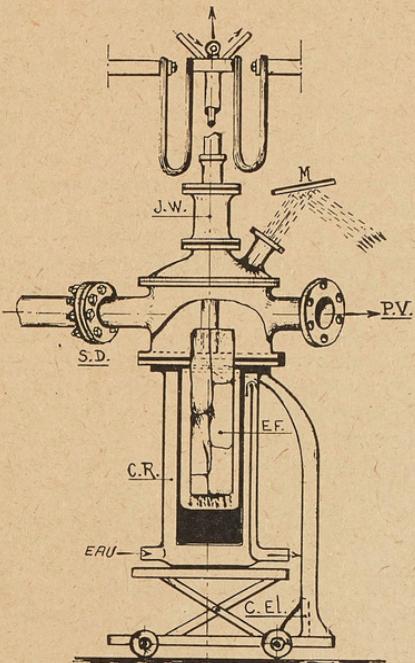


Fig. 5.

tention d'un lingot plus homogène par suite de la fusion un peu plus lente de l'électrode et le maintien du métal plus longtemps liquide au pôle positif.

Le courant continu est indifféremment obtenu par des dynamos ou des redresseurs statiques à vapeur de mercure ou au sélénium. Certaines unités pouvant fournir un courant de 10 à 12 000 ampères sous une tension réglable de 30 à 60 volts. Le réglage de la vitesse de descente de l'électrode fusible est un problème important. Le rendement de tels fours est en moyenne de 50 p. 100, la consommation d'énergie électrique s'établissant à environ 1 kW heure par kilogramme de métal élaboré.

Les lingots obtenus par une première fusion de l'éponge comprimée ne sont pas parfaits et l'on doit procéder à une seconde refusion en assemblant bout à bout deux ou trois lingots de façon à reformer une nouvelle électrode.

Les métaux de seconde fusion sont bien compacts et certaines unités actuelles peu-

vent fournir des lingots dont le poids atteint ou dépasse deux tonnes.

Contrairement à l'opinion généralement admise, il y a encore quelques années, il a pu être constaté que la fusion sous vide poussé du titane et du zirconium améliorait considérablement les qualités du métal obtenu. C'est un fait bien connu maintenant des spécialistes des métaux de haute pureté que la fusion à haute température sous vide permet non seulement le départ d'une grande quantité des gaz contenus dans le métal, mais également celui d'un grand nombre d'impuretés tant métalliques que métalloïdiques dont les tensions de vapeur s'accroissent considérablement avec la température. Cette purification s'effectue également par le processus maintenant bien connu sous le nom de purification par zone fondue.

La mise sous vide des fours est obtenue par des pompes identiques à celles utilisées pour la purification de l'éponge. La combinaison qui vient à l'esprit pour réaliser un tel pompage est la classique association de la pompe à vapeur d'huile donnant un vide limite compris entre  $10^{-5}$  et  $10^{-6}$  torr, et d'une pompe rotative à gros débit permettant l'amorçage correct de celle-ci.

Un tel ensemble, très souvent utilisé, a pourtant le grave inconvénient de ne pouvoir réagir d'une façon suffisamment rapide aux brutales remontées de pression dues aux dégagements subits et importants de gaz au cours de la fusion. Si nous examinons en effet le diagramme suivant (figure 6) groupant pour deux pompes modernes : l'une à condensation de vapeur d'huile, l'autre mécanique, les courbes de débit exprimé en  $m^3/\text{heure}$  en fonction de la

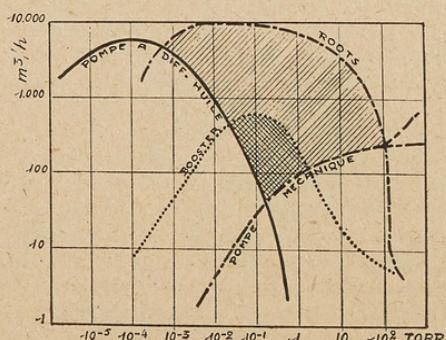


Fig. 6.

pression nous constatons entre ces deux courbes une discontinuité très nette correspondant à une baisse importante du rendement au voisinage  $10^{-1}$  torr. La difficulté peut être tournée en associant aux deux premières pompes une troisième qui sera soit un booster à éjection de vapeur d'huile ou, ce qui est préférable, une pompe roots dont le rendement est maximum dans la zone de pression entre  $10^{-1}$  et  $10^{-3}$  torr. Certaines installations de réalisation récente n'utilisent plus comme système de pompage que deux pompes roots associées en série et amorcées par une pompe rotative.

La mesure du vide sur les installations industrielles de fusion comme celles que nous venons de décrire a une très grande importance. Les jauge utilisées doivent posséder une bonne sensibilité dans l'étendue des pressions réalisées dans les fours soit :  $10^{-2}$  à  $5 \cdot 10^{-5}$  torr.

Les jauge à thermocouple sont tout à fait bien adaptées à ce genre de mesure puisque leur maximum de sensibilité se situe dans l'intervalle  $5 \cdot 10^{-2}$  à  $10^{-4}$  torr. Ces jauge sont assez peu sensibles aux rentrées d'air accidentelles et leurs indications ne sont pas influencées par les variations de température ambiante. Cependant, comme toutes les jauge possédant un fil chauffé, elles subissent dans le temps une dérive continue qui nécessite de fréquents étalonnages.

La jauge de Penning, dite à cathode froide, est d'excellente utilisation entre  $10^{-2}$  et  $10^{-5}$  torr. Les indications de cette jauge ne sont pas proportionnelles à la pression et sont influencées par un changement de composition des gaz. Insensible aux trépidations et donnant des mesures directes, sans manœuvres ni réglages compliqués, elle possède des qualités qui l'ont fait souvent adopter sur les fours de fusion industriels. Il faut pourtant signaler qu'elle est sujette au défaut commun à toutes les jauge à ionisation, à savoir l'adsorption des gaz sur les parois des électrodes, par suite du bombardement ionique, provoquant une certaine incertitude sur les indications fournies et partant la limitation de leur emploi dans le domaine des basses pressions. Les poussières inévitables dans les installations industrielles les mieux conduites sont également une cause de mise hors d'usage des

jauge, par défauts d'isolement ou courts circuits.

Notons enfin que la fusion à l'arc dans un creuset refroidi par circulation d'eau, malgré son élégance, n'en est pas moins une opération dangereuse. Si, en effet, une perforation du creuset se produit, l'eau entrant en contact avec le métal fondu provoque une explosion. Pour cette raison, les unités récentes sont pourvues de dispositifs de sécurité tels que diaphragme de surpression et sont en outre logées dans des massifs de béton destinés à protéger les opérateurs.

Le contrôle de la fusion se fait dans ce cas à distance au moyen de miroirs conjugués à la manière d'un télescope. L'emploi de la télévision ne semble pas devoir trouver de nombreux adeptes, tout au moins tant que les images transmises ne seront pas en couleur, ce qui ne saurait sans doute plus trop tarder (17). Certains auteurs indiquent que le danger d'explosion est grandement diminué en maintenant en activité les pompes à vide malgré le percement du creuset (18).

#### *Conséquences métallurgiques du procédé de fusion à l'arc sous vide.*

Le métal préparé par ce procédé est, de l'avis des utilisateurs, plus compact et est pratiquement exempt de toutes les impuretés dont la volatilisation est possible à haute température sous vide. La teneur en hydrogène est considérablement plus faible dans le cas de la fusion sous vide que dans celle sous pression d'argon. L'état de surface des lingots obtenus par ce procédé est particulièrement excellent, ce qui permet une économie de métal lors de l'écroûtement de ceux-ci. Il a même été constaté que dans de nombreux cas cette opération pouvait être supprimée.

Le procédé de fusion à l'arc sous vide au moyen d'électrodes consommables appliqué aux métaux tels que le titane, le zirconium, le molybdène a été étendu à la fabrication de certains alliages réfractaires en incorporant les éléments de l'alliage à l'éponge avant une première fusion qui a généralement lieu, pour des questions d'homogénéité faciles à comprendre, par les méthodes classiques. Seule la seconde fusion est effectuée par la technique de l'électrode consommable.

Les utilisateurs y trouvent entre autres avantages une diminution très nette de la ségrégation par suite du refroidissement rapide de l'alliage qui conduit à une amélioration très sensible de la ductilité et de la résistance à la fatigue.

*Fusion sous vide des métaux et alliages réfractaires par bombardement électronique.*

Depuis quelques années s'est développée une méthode de fusion sous vide des métaux ou alliages par bombardement électronique.

Le principe même de la méthode est bien connu : lorsque, dans une enceinte à vide, une cathode formée d'un fil réfractaire est portée à haute température, elle devient le siège d'une abondante émission électronique.

Les électrons émis par la cathode, sous l'action d'un champ électrique, sont guidés et accélérés par celui-ci en direction de l'anode qu'ils viennent frapper. Il en résulte une élévation extrêmement rapide et importante de la température de celle-ci. Si l'on veut éviter d'ailleurs qu'en raison de cet échauffement une action symétrique et réciproque ne se produise sur la cathode et la mette hors d'usage, il est nécessaire d'alimenter le four en courant continu ou tout au moins redressé.

La figure 7 donne le schéma d'une instal-

lation de fusion continue sur creuset refroidi d'une puissance de 250 kW. Une électrode consommable (E) formée par le métal à fondre forme l'anode du système; son extrémité inférieure subit un échauffement rapide et fond sous l'influence du bombardement électronique provenant d'une première cathode ( $C_1$  de forme torique). Les gouttes de métal fondu tombent, en subissant un parfait dégazage par suite de leur grande division et en perdant une grande partie de leurs impuretés métalliques volatiles, sur la partie supérieure du lingot (L) contenu dans le creuset refroidi (R) dont le fond mobile, supporté par la tige (T), peut descendre au fur et à mesure de la fusion de l'électrode (E). La partie supérieure du lingot (L) est constamment maintenue à l'état fondu par le bombardement électronique provenant d'une seconde cathode ( $C_2$ ).

La disposition des cathodes a une importance capitale car la fusion du métal sous vide, surtout lorsque sa teneur en gaz est très élevée, s'accompagne de projections pouvant les détériorer rapidement. Le système de pompage d'une telle installation, pour la même raison, est soigneusement étudié car toute élévation intempestive de la pression provoquerait la mise hors d'usage des cathodes. C'est pour pallier cet inconvénient que sur certaines installations ont été prévus des sas (S) permettant le changement des cathodes sans interrompre le pompage de l'appareil.

La chambre à vide, dont le volume atteint 3 m<sup>3</sup>, est connectée à un système de pompage à gros débit constitué par deux pompes à diffusion de vapeur d'huile d'une capacité de pompage unitaire de 18 000 litres/seconde susceptible de maintenir dans le four un vide qui ne doit en aucun cas descendre au-dessous de 10<sup>-4</sup> torr. Pour les raisons que nous avons déjà indiquées, ces pompes sont réunies aux pompes préliminaires rotatives par l'intermédiaire de boosters.

La tension d'accélération est réglable entre 3 000 et 12 000 volts. La vitesse de fusion est contrôlée en agissant sur la température du filament (cathode) ainsi que sur la position relative de l'extrémité de l'électrode consommable ou du lingot formé par rapport aux cathodes.

La température de celles-ci varie entre 2 000 et 2 200 °C. La vie d'une cathode est

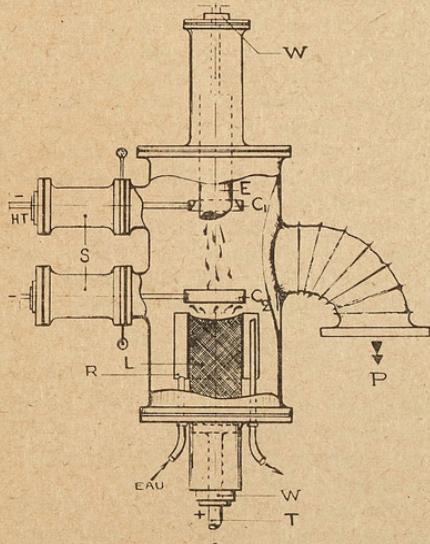


Fig. 7.

très variable, en moyenne de 8 à 24 heures. Pour des métaux peu gazeux et en l'absence de projections dangereuses on a même pu obtenir des durées de vie dépassant 100 heures. Dans le cas de métaux (ou d'alliages) dont la tension de vapeur par trop considérable risque de permettre une contamination et par suite une rapide mise hors service des filaments cathodiques, on peut tourner tout au moins en partie la difficulté en éloignant le canon à électrons de la zone de fusion en guidant et dirigeant le faisceau au moyen de champs électriques ou magnétiques.

En règle générale, on peut dire que la purification est d'autant meilleure que le vide réalisé dans le four est maintenu à un degré aussi élevé que possible pendant toute la durée de la fusion.

Les diagrammes (figure 8) montrent les

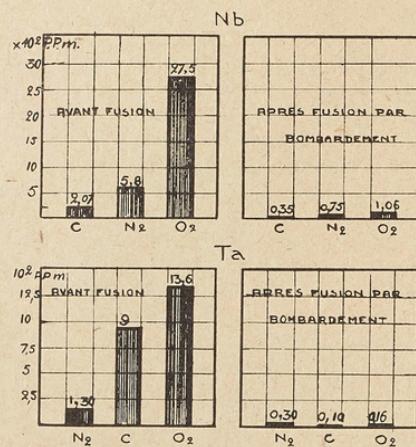


Fig. 8.

résultats obtenus sur le niobium et le tantale, ils sont si remarquables que les utilisateurs songent à créer des unités de fusion d'une puissance de 1 500 kW (18, 19).

*Application de la fusion par arc ou par bombardement électronique sous vide aux aciers.*

Nous ne voudrions pas terminer sans signaler que les techniques que nous venons de passer en revue dans la seconde partie de notre exposé ont été appliquées avec succès en sidérurgie pour la production d'acier de haute qualité.

L'appareillage utilisé est identique à celui

que nous venons de décrire, certaines unités de fusion à l'arc étant toutefois susceptibles de fournir des lingots de 10 et 20 tonnes. Les électrodes consommables peuvent être simplement des barres laminées ou forgées provenant d'une première élaboration du type classique. Lorsqu'il s'agit d'un alliage non forgeable elles sont alors exécutées par moulage ou par frittage après pressage.

La fusion à l'arc ou par bombardement électronique sous vide diminue sensiblement les inclusions oxydées et même sulfurées contenues dans l'acier, et, de plus, celles qui restent sont parfaitement dispersées dans le métal.

Beaucoup de nitrides sont dissociés par suite de la température élevée obtenue. Les nitrides et carbonitrides de titane en particulier, s'ils ne sont pas tous dissociés, se retrouvent presque en totalité dans la tête du lingot par suite de leur légèreté et également par l'intervention du processus de purification par zone fondue. C'est surtout le fait de l'absence totale de réfractaires au contact de l'acier au cours de l'élaboration qui conduit à l'obtention d'alliages d'une « propreté tout à fait remarquable ». Toutefois, il est bien certain que ces modes d'élaboration sont particulièrement coûteux et ne peuvent être utilisés que pour l'obtention d'acières spéciaux de très grande qualité tels que les aciers pour roulements ou à très haute résistance mécanique ou, encore, pour l'obtention d'alliages particulièrement réfractaires. Il résulte de nombreux essais comparatifs que la durée de vie moyenne des roulements obtenus par fusion sous vide est plus du double de celle des roulements obtenus avec du métal élaboré par les procédés traditionnels. Quant aux propriétés mécaniques des aciers à haute résistance, la fusion sous vide apporte des améliorations assez spectaculaires : tel acier spécial (SAE 4 340) très utilisé en aéronautique

C	Mn	Ni	Cr	Mo
0,4	0,7	1,8	0,8	0,25

traité pour obtenir une charge de rupture  $R = 180/200 \text{ kg/mm}^2$ , voit son allongement passer de 6 à 18 p. 100 suivant qu'il est élaboré à l'air ou sous vide.

Il est également remarquable de constater que dans les aciers fondus sous vide les caractéristiques en long et en travers sont sensiblement identiques.

#### CONCLUSION

Cet exposé, à n'en pas douter trop succinct, montre toute l'importance que prennent en métallurgie des techniques qui apparaissaient encore ces dernières années comme étant dévolues aux seuls laboratoires de recherches. Leur utilisation fait que certains métaux, considérés il n'y a même pas 10 ans comme de rares et curieux échantillons, peuvent être maintenant préparés industriellement par dizaines, centaines et

même milliers de kg. Il n'en reste pas moins vrai, malgré les résultats particulièrement prometteurs obtenus, qu'il y a encore beaucoup de difficultés à surmonter pour obtenir une production parfaitement régulière et dans certains cas, continue, permettant ainsi de satisfaire à toutes les demandes des utilisateurs chaque jour plus exigeants quant aux qualités des métaux devant leur être fournis.

## BIBLIOGRAPHIE

1. *Étude de la désoxydation de l'acier par fusion sous vide.*
- J. THOMAS et L. MOREAU : Revue de Métallurgie. T. XLIII, 1946, p. 204-207.
2. *Rôle de l'hydrogène et des ségrégations dans la formation des flocons.*
- T. E. SCOTT et A. R. TROIANO : Journal of Metals. Sept. 1959, 11, n° 9, 619-22.
3. *Influence de la teneur en hydrogène de la microstructure et de l'état de contrainte sur la formation des flocons dans l'acier.*
- A. W. DANA Jr. F. J. SHORTSLEEVE et A. R. TROIANO : Journal of Metals. Août 1955, 7, n° 8, 895-905.
4. *Applications industrielle du dégazage sous vide notamment pour les gros lingots de forge.*
- A. TIX : Stahl und Eisen. Janv. 1956, 76, n° 2, p. 61-68.
5. *Le dégazage sous vide des aciers en poche.*
- K. G. SPEITH, H. von ENDE et A. PFEIFFER : Stahl und Eisen, mai 1960, 80, n° 11, p. 737-744.
6. *Application du barbotage sous vide au dégazage des métaux en poche.*
- J. VERGE, J. DUFLOT, E. SPIRE, M. MICHAUD (A paraître Revue de Métallurgie, Paris, 2<sup>e</sup> semestre 1961).
7. *Expérience du dégazage de l'acier par coulée sous vide en poche ou en lingotière.*
- A. TIX, G. BANDEL, W. COUPETTE et A. SICKBERT : Stahl und Eisen. Avril 1959, 79, n° 8, p. 472-477.
8. *Le dégazage de l'acier par coulée sous vide pour la production de moussages et de pièces de forge.*
- V. SCALISE, A. de NEGRI et V. PICARDI : Metallurgica Italiana, Mai 1960, 52, n° 5, p. 237-244; Journal of the Iron and Steel Institute. Juillet 1960, n° 3, p. 260-266.
9. *Le traitement sous pression réduite des coulées d'acier à la Dortmund Hörder Hüttenunion.*
- F. HARDERS, H. KNUPPEL et K. BROTMANN : Stahl und Eisen. Décembre 1956, 76, 26, 1721-28; Stahl und Eisen. Mars 1959, 79, 5, 267-272.
10. *Le procédé de dégazage sous vide de la Dortmund Hörder Hüttenunion.*
- F. HARDERS, H. KNUPPEL et K. BROTMANN : Journal of Metals 1960, 12, n° 5, p. 398-404.
11. *Caractéristiques des aciers dégazés par le procédé de l'élévateur sous vide.*
- C. H. POTGIESSER, A. WICHER et E. KLEIN : Stahl und Eisen, Avril 1959, 79, n° 8, p. 468-472.
12. *Le dégazage de l'acier liquide par circulation sous vide à la Ruhrstahl. A. G. (Hattingen).*
- H. THIELMANN et H. MASS : Stahl und Eisen. Mars 1959, 79, n° 5, p. 276-282.
13. *Emploi des radiotraceurs pour l'étude de processus métallurgiques en acierie.*
- G. H. PROPSTL : Stahl und Eisen. Juin 1960, 80, n° 13, p. 863-877.

14. *La fusion des métaux sans creuset.*
- L. MOREAU : La chimie des hautes températures. Colloques Nationaux du C. N. R. S. Paris, 11, 12, 13 mai 1954, p. a1 à a13.
15. *Vacuum Metallurgy* (Materials Technology Series). ROINTAN, F. BUNSHAH : Reinhold Publishing Corporation. New York 1957.
16. *The Metallurgy of Zirconium.* Benjamin LUSTMAN et Frank KERZE Jr. Mc Graw Hill Book Cy Inc. 1955.
17. *The Theory and Practice of Vacuum Melting.*
- O. WINKLER : Metallurgical Reviews, published by the Institute of Metals 1960, Vol. 5, n° 17.
8. *Application de la métallurgie sous vide aux techniques de fabrication du titane et du zirconium.*
- J. P. GIVORD : Le Vide. Novembre-décembre 1957, n° 72, p. 447-456.
19. *Proceedings of first Symposium on electron-Beam Melting.* Mars 1959, Boston Massachusetts.
- Ed. Alloyd Research Corporation 202, Arsenal Street Watertown Massachusetts.
20. *Proceedings of second Symposium on electron-Beam Processes.* 24-25 mars 1960. Boston Massachusetts.
- Ed. Alloyd Corporation. 35 Cambridge Parkway. Cambridge Massachusetts.

Le Président de la Société, Directeur Gérant : G. CHAUDRON

D. P. n° 1080.

Imprimé en France par BRODARD ET TAUPIN, Imprimeur-Relieur, Coulommiers-Paris. — 6-61.

## ÉDITIONS DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

---

### I. — PUBLICATIONS PÉRIODIQUES

LE BULLETIN SIGNALÉTIQUE paraît mensuellement et présente, sous la forme de courts extraits classés par matière, tous les travaux scientifiques, techniques et philosophiques publiés dans le monde entier.

Des TIRAGES A PART sont mis, en outre, à la disposition des spécialistes.

Le CENTRE DE DOCUMENTATION DU C.N.R.S. fournit également la reproduction photographique sur microfilm ou sur papier des articles analysés dans le BULLETIN SIGNALÉTIQUE ou des articles dont la référence bibliographique précise lui est fournie.

Ainsi, expérimentateurs, ingénieurs et techniciens bénéficient, sans quitter leur laboratoire ou leur bureau, d'une documentation abondante et rapide.

ABONNEMENT ANNUEL (y compris la Table des Auteurs)

	FRANCE	ÉTRANGER
PREMIÈRE PARTIE. — Mathématiques; Physique; Chimie; Sciences de l'Ingénieur . . . . .	120 NF	150 NF

#### TIRAGES A PART

Section I. — Mathématiques pures et appliquées; Mécanique; Physique mathématique . . . . .	19 NF	24 NF
Section III. — Généralités sur la Physique; Acoustique; Thermodynamique; Chaleur; Optique; Électricité et Magnétisme. . . . .	34 NF	38 NF
Section IV. — Physique corpusculaire; Structure de la Matière. . . . .	17 NF	22 NF
Section VII. — Sciences de l'Ingénieur . . . . .	42 NF	47 NF
N. B. — Les abonnés aux tirages à part du Bulletin signalétique peuvent recevoir la TABLE GÉNÉRALE DES AUTEURS, aux conditions suivantes. . . . .	12 NF	16 NF

ABONNEMENT AU CENTRE DE DOCUMENTATION DU C.N.R.S.  
15, quai Anatole-France, Paris 7<sup>e</sup> C.C.P. PARIS 9131-62. Tél. : SOLférino 93-39.

JOURNAL DES RECHERCHES DU C.N.R.S., Revue trimestrielle publiant des articles de recherches faites dans les différents laboratoires du C.N.R.S.

ABONNEMENT ANNUEL (quatre numéros) . . . . .	25 NF
Prix du numéro. . . . .	8 NF

### II. — OUVRAGES

Claude ROCCHICCIOLI. — Notions de Mathématiques. . . . .	8 NF
LE FORMULAIRE DE MATHÉMATIQUES ET LES MONOGRAPHIES du Centre d'Études mathématiques en vue des applications :	

#### 1. — MONOGRAPHIES

PÉTIAU G. — La théorie des Fonctions de Bessel exposée en vue de ses applications à la physique mathématique. . . . .	25 NF
DUMAS M. — Les épreuves sur échantillon. . . . .	10 NF
COLOMBO S. — Les transformations de Mellin et de Hankel. (Applications à la Physique mathématique) . . . . .	10 NF
LAVOINE J. — Calcul symbolique. Distribution et pseudo-fonctions. . . . .	10 NF
DESTOUCHES J.-L. — Principes de la mécanique classique. . . . .	3,50 NF
VOGEL Th. — Les fonctions orthogonales dans les problèmes aux limites de la physique mathématique. . . . .	12 NF
	*

2. — LE FORMULAIRE DE MATHÉMATIQUES  
A L'USAGE DES PHYSICIENS ET DES INGÉNIEURS

Fascicule IV. — Algèbre et analyse tensorielle . . . . .	7	NF
Fascicule VII. — Équations aux dérivés partielles . . . . .	8	NF
Fascicule IX. — Fonctions de la Physique mathématique . . . . .	8	NF
Fascicule XII. — Calcul des probabilités (2 <sup>e</sup> édition) . . . . .	8	NF
A. DURIF et F. FORRAT. — Tables numériques adaptées à la Technique des diagrammes Debye-Scherrer . . . . .	2,50	NF

QUELQUES COLLOQUES INTERNATIONAUX DU C.N.R.S.

XXXVI. — Les méthodes formelles en axiomatique (logique mathématique) . . . . .	6	NF
LII. — Géométrie différentielle . . . . .	10	NF
LXX. — Le raisonnement en mathématiques et en sciences expérimentales . . . . .	14	NF
LXXI. — La théorie des équations aux dérivés partielles . . . . .	15	NF
LXXV. — Les problèmes mathématiques de la Théorie quantitative des champs . . . . .	20	NF
LXXXII. — Calcul des Fonctions d'Onde moléculaire . . . . .	34	NF
LXXXVII. — Le calcul des Probabilités et ses applications . . . . .	20	NF

LES CAHIERS DE PAUL VALÉRY (écrits de 1894 à 1945).

Paul Valéry était tout à la fois poète, littérateur, penseur, épris des Sciences et artiste. Les Cahiers écrits tout au long de sa vie permettent de la mieux connaître sous ces divers aspects. Ils sont le complément indispensable des œuvres de Paul Valéry publiées jusqu'à ce jour et intéresseront tous ceux qui les possèdent.

Ces Cahiers se présentent sous la forme d'une trentaine de volumes d'environ 1 000 pages, du format 21 × 27, contenant la reproduction photographique du manuscrit et d'environ 80 aquarelles de l'auteur.

Volumes reliés . . . . . 1 600 NF  
(640 NF payables à la commande et 30 NF à la parution de chacun des volumes).

Volumes sous étuis . . . . . 1 740 NF  
(780 NF payables à la commande et 30 NF à la parution de chacun des volumes).

LES PUBLICATIONS DU CENTRE D'ÉTUDES SOCIOLOGIQUES

1. — Sociologie comparée de la famille contemporaine . . . . .	10	NF
2. — A. TOURAIN. — L'Évolution du travail ouvrier aux Usines Renault . . . . .	12	NF
3. — CROZIER. — Petits fonctionnaires au travail . . . . .	6,40	NF
4. — CHOMBART de LAUWE. — La vie quotidienne des familles ouvrières . . . . .	15	NF
5. — GUILBERT et ISAMBERT. — Travail féminin et travail à domicile . . . . .	10	NF
6. — Andrée MICHEL. — Les travailleurs algériens en France . . . . .	12	NF
7. — MENDRAS. — Les paysans et la modernisation de l'Agriculture . . . . .	12	NF
8. — Ida BERGER. — Les Maternelles . . . . .	18	NF
9. — Andrée MICHEL. — Famille, industrialisation et logement . . . . .	21	NF
Visages et perspectives de l'Art Moderne (peinture, musique, poésie). Recueil des communications faites aux entretiens d'Arras . . . . .	12	NF
Influences étrangères dans l'œuvre de Mozart . . . . .	26	NF
Nicolas Poussin . . . . .	130	NF
Répertoire des Travaux publiés avec le concours du C.N.R.S. (1953-1954) . . . . .	15	NF
Le groupe des Laboratoires de Bellevue . . . . .	10	NF

Renseignements et vente au Service des Publications  
du CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
15, quai Anatole-France — PARIS 7<sup>e</sup> C. C. P. PARIS 9061-11 — Tél. SOLférino 93-39.

# PRODUITS CHIMIQUES

pour  
INDUSTRIE  
PHARMACIE  
PARFUMERIE  
CÉRAMIQUE  
AGRICULTURE

## MATIÈRES PLASTIQUES

"RHODOÏD" Acétate de Cellulose

"RHODOPAS" Résines vinyliques

"RHODORSIL" Silicones

"RHODESTER" Résines polyesters

"MANOLÈNE" Polyéthylène basse pression  
(FABRIQUÉ PAR LA MANUFACTURE NORMANDE DE POLYÉTHYLENES)

"ALAMASKS" Agents neutralisants des mauvaises odeurs

PIGMENTS MINÉRAUX pour matières plastiques

RHÔNE  
POULENC

21, RUE JEAN-GOUJON, PARIS VIII<sup>e</sup> - TÉLÉPHONE BAL. 22-94

\*\*

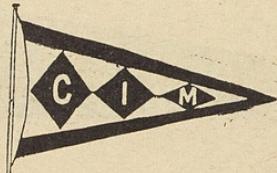
WD

# Compagnie Générale de Géophysique

50, rue Fabert  
PARIS - VII<sup>e</sup>

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL  
DE 7.560.000 NF

APPLICATION DES PROCÉDÉS SISMIQUES, TELLURIQUES,  
ÉLECTRIQUES, GRAVIMÉTRIQUES, MAGNÉTIQUES,  
AUX RECHERCHES PÉTROLIÈRES, MINIÈRES, HYDROLOGIQUES  
ET AUX ÉTUDES DE GÉNIE CIVIL



La C. I. M. assure au Havre le trafic des hydrocarbures à destination des Raffineries de la Basse-Seine et des Dépôts de la Région Parisienne.

Au Havre : Bassins accessibles aux plus grands navires pétroliers et capacité de stockage de 430.000 m<sup>3</sup>

A Gennevilliers : Dépôt spécialisé de 41.200 m<sup>3</sup>

## COMPAGNIE INDUSTRIELLE MARITIME

Concessionnaire du Port Autonome du Havre

36, rue de Liège

PARIS (VIII<sup>e</sup>)

EUROpe 44-30

PECHINEY, grâce à l'ampleur de ses moyens techniques et industriels, ne cesse de multiplier les produits indispensables aux industries de transformation les plus diverses.

Il n'est guère aujourd'hui de secteurs industriels qui n'utilisent une ou plusieurs de ses fabrications, qu'il s'agisse des alliages légers, des matières plastiques ou des produits chimiques.

Aluminium et Alliages d'Aluminium - Ferro-Alliages d'addition et de désoxydation - Cupro-Alliages - Métaux Spéciaux - Produits Réfractaires - Graphite Pur en particulier pour réacteurs nucléaires - Matières Plastiques - Produits Dérivés du Chlore - Produits Sodiques, Ammoniacaux, Sulfureux, Alumineux, Fluorés, Cupriques - Chlorates et Perchlorates.

# PECHINEY

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 403.147.250 NF

23, RUE BALZAC - PARIS 8<sup>e</sup> - CAR. 54-72



# Société Générale d'Entreprises

Société Anonyme au Capital de 36.160.000 NF

56, rue du Faubourg-St-Honoré, PARIS (8<sup>e</sup>)

## ENTREPRISES GÉNÉRALES

USINES HYDRO-ÉLECTRIQUES ET CENTRALES THERMIQUES

USINES, ATELIERS ET BATIMENTS INDUSTRIELS

TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

AÉROPORTS - OUVRAGES D'ART

ROUTES - CHEMINS DE FER

CITÉS OUVRIÈRES - ÉDIFICES PUBLICS ET PARTICULIERS

ASSAINISSEMENT DES VILLES - ADDUCTIONS D'EAU

ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES INDUSTRIELS ET POSTES DE TRANSFORMATION

RÉSEAUX DE TRANSPORT D'ÉNERGIE A HAUTE TENSION

ÉLECTRIFICATION DE CHEMINS DE FER

RÉSEAUX D'ÉLECTRIFICATION RURALE

## ENTREPRISES

# BOUSSIRON

10, Boulevard des Batignolles, PARIS-17<sup>e</sup>.

ALGER - CASABLANCA

S. E. T. A. O. à ABIDJAN (Côte d'Ivoire)

TRAVAUX PUBLICS  
BÉTON ARMÉ ET PRÉCONTRAINTE  
CONSTRUCTIONS INDUSTRIELLES

SOCIÉTÉ D'ÉLECTRO-CHIMIE  
D'ÉLECTRO-MÉTALLURGIE  
ET DES  
ACIÉRIES ÉLECTRIQUES D'UGINE

ACIERS  
PRODUITS CHIMIQUES  
ALUMINIUM  
MAGNÉSIUM  
FERRO-ALLIAGES  
ÉTAIN

SIÈGE SOCIAL : 10, RUE DU GÉNÉRAL-FOY - PARIS (8<sup>e</sup>)

TÉLÉPHONE : EUROPE 31-00

ADRESSE TÉLÉGRAPHIQUE : TROCHIM PARIS

# POMPEY

## ACIERS de HAUTE QUALITÉ

- pour constructions métalliques et mécaniques
- à haute limite élastique et soudables
- résistant à la corrosion et inoxydables
- fins au carbone et spéciaux alliés
- à outils et pour outillage



ACIERS THOMAS et MARTIN



Fontes - Ferro Manganèse



Laminés - Étirés et Comprimés

Moulés et Forgés

Fil machine

## Société des ACIERIES de POMPEY

61, Rue de Monceau - PARIS 8<sup>e</sup> -:- Tél. : LAB. 97-10 Ad. Télég. POMPEAC PARIS  
TELEX : 27-826

APPAREILS DE LABORATOIRE  
ET MACHINES INDUSTRIELLES

P. CHEVENARD

- pour l'analyse dilatométrique et thermomagnétique des matériaux;
- pour l'essai mécanique et micromécanique des métaux à froid et à chaud:  
    Essais de traction, de flexion, de compression, de dureté;  
    Essais de flUAGE (Traction-Relaxation) et de rupture;  
    Essais de torsion alternée;  
    Étude du frottement interne;
- pour l'étude des réactions chimiques par la méthode de la pesée continue;
- pour la mesure des températures et le réglage thermostatique des fours.

A. D. A. M. E. L.  
4-6, Passage Louis-Philippe  
PARIS (11<sup>e</sup>)

● Traitement de l'air et des mélanges gazeux industriels par liquéfaction et rectification.  
● Explosifs à oxygène liquide pour mines et carrières.  
● Soudage, oxycoupage, toutes techniques connexes.

PLUS DE 200 USINES DANS LE MONDE

L'AIR LIQUIDE

75, QUAI D'ORSAY PARIS 7<sup>e</sup> INV 44-30

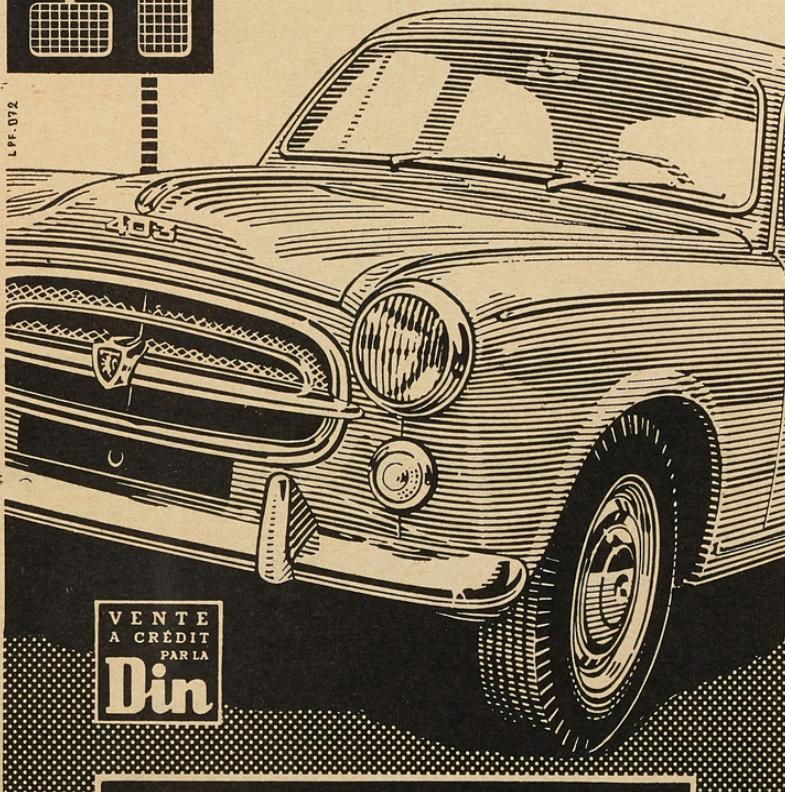
L. CHEVALIER

Pub. AL



L.P.F. 072

**LA BERLINE GRAND LUXE 403**  
est équipée en série du  
**Ventilateur débrayable automatique**  
et, avec supplément,  
**du Coupleur électro-magnétique JAEGER**  
qui supprime la pédale de débrayage.



VENTE  
A CRÉDIT  
PAR LA  
**Din**

**Peugeot**

## SOCIETE CHIMIQUE de la GRANDE PAROISSE

### AZOTE ET PRODUITS CHIMIQUES

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 13.997.000 NF

SIÈGE SOCIAL : 8, rue Cognacq-Jay - PARIS (VII<sup>e</sup>) ♦ Tél.: INV. 44-30 à 44-38

R. C. Seine n° 55 B 12665 Adr. Télégr. : GRANPARG-PARIS N° d'Entreprise 353.75.107.0053

### INSTALLATIONS D'USINES :

SYNTHESE DE L'AMMONIAQUE (Procédés Georges Claude) ENGRAIS AZOTÉS DISTILLATION A BASSE TEMPÉRATURE (des schistes, lignites, etc.)

SYNTHESE DE L'ALCOOL MÉTHYLIQUE HYDROGÈNE ET GAZ DE VILLE PAR CRACKING

ET CONVERSION DES HYDROCARBURES

RECUIT BRILLANT (Licence I. C. I.)

### PRODUITS FABRIQUÉS :

AMMONIAC ANHYDRE :—: ALCALI A TOUS DEGRÉS :—: ENGRAIS AZOTÉS

USINES OU ATELIERS: GRAND-QUEVILLY (Seine-Maritime) - WAZIERS (Nord) - FRAIS-MARAIS (Nord)-PARIS, 25 rue Vicq-d'Azir - AUBERVILLIERS (Seine), 65, rue du Landy

## C<sup>ie</sup> Française de Raffinage

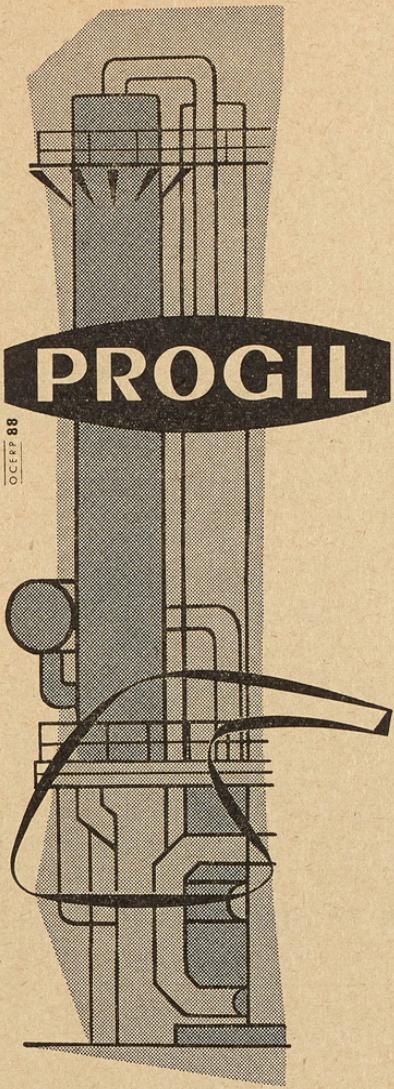
SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 130.000.000 DE NF — R. C. Seine n° 54 B 3492

### SIÈGE SOCIAL : 5, rue Michel-Ange, PARIS (16<sup>e</sup>)

La Compagnie Française de Raffinage dispose dans ses Raffineries de Gonfreville-l'Orcher (Seine-Maritime) et de La Mède (Bouches-du-Rhône) :

- de la plus grosse Unité de Cracking Catalytique de France,
- de la plus grosse Unité de Reforming Catalytique du continent Européen,
- de tout un ensemble de fabrication d'huiles de graissage mettant en œuvre les techniques les plus modernes par solvants sélectifs,
- d'une unité de production d'éthylène d'une capacité annuelle de 30 000 t.,
- des laboratoires de recherche et de contrôle les plus importants de l'industrie française.

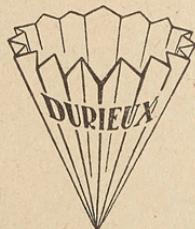
Elle est la plus importante des sociétés raffinant du pétrole brut en France et peut traiter 12 600 000 tonnes, chaque année.



Produits  
chimiques  
industriels

77-79, RUE DE MIROMESNIL, PARIS 8<sup>e</sup>  
LAB. 91-60

# LES FILTRES DURIEUX



## PAPIER A FILTRER

En disques, en filtres plissés, en feuilles 52×52

### SPÉCIALITÉS :

#### FILTRES SANS CENDRES

N° 111, 112 et Crêpé N° 113 extra-rapide

Filtres Durcis n° 128 & Durcis sans cendres n° 114

**Cartouches** pour extracteurs de tous systèmes

#### PAPIER "CRÊPÉ DURIEUX"

Toutes Dimensions, pour Filtres-Presses. (Envoi d'échantillons sur demande)

Registre du Comm. de la Seine N° 722.521-2-3      Téléphone : ARCHives 03-51

MÉDAILLE D'OR de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale (Juillet 1918)

**20, rue Malher, PARIS (4<sup>e</sup>)**

Demandez le Catalogue donnant toutes les explications sur les emplois de mes différentes sortes



*ETABLISSEMENTS*  
**KUHLMANN**

SOCIÉTÉ ANONYME au CAPITAL de 124.985.200 NF  
Siège Social : 25, Boul. de l'Amiral Bruix, PARIS (16<sup>e</sup>)

★

**PRODUITS CHIMIQUES**

DÉRIVÉS DU SOUFRE - DÉRIVÉS DU CHLORE - PRODUITS AZOTÉS - DÉRIVÉS DU BARYUM - DÉRIVÉS DU BROME DÉRIVÉS DU CHROME - DÉRIVÉS DU COBALT - DÉRIVÉS DU NICKEL - DÉRIVÉS DU CÉRIUM - DÉRIVÉS DU PHOSPHORE - LESSIVES - SILICATES - DÉRIVÉS DE L'ÉTHYLÈNE DÉRIVÉS DU PROPYLÈNE - ALCOOLS DE SYNTHÈSE HYDROCARBURES DE SYNTHÈSE

★

**PRODUITS POUR L'AGRICULTURE**

ENGRAIS PHOSPHATÉS - ENGRAIS AZOTÉS - ENGRAIS COMPLEXES - PRODUITS INSECTICIDES ET ANTICRYPTO-GAMIQUES - PRODUITS POUR L'ALIMENTATION DU BÉTAIL - AMENDEMENTS - HERBICIDES - DÉSINFECTANTS

★

**PRODUITS CHIMIQUES ORGANIQUES**

RÉSINES SYNTHÉTIQUES - COLLES SYNTHÉTIQUES MATIÈRES PLASTIQUES - TANINS SYNTHÉTIQUES PRODUITS INTERMÉDIAIRES - PRODUITS AUXILIAIRES INDUSTRIELS - PRODUITS R. A. L.

★

**TEXTILES CHIMIQUES**

RAYONNE VISCOSE - FIBRANNE VISCOSE - CRINODOZ

COMPAGNIE FRANÇAISE

# THOMSON-HOUSTON

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 78.446.400 N.F.

SIÈGE SOCIAL : 173, BOULEVARD HAUSSMANN, PARIS VIII<sup>e</sup>

TELEGR. ÉLIHU 42 PARIS



TELEPHONE : ÉLYSEES 83-70

**ÉLECTRONIQUE** Toutes applications professionnelles de *L'ÉLECTRONIQUE* et de *LA NUCLEONIQUE* - Radiodiffusion - Télévision  
Radiocommunications - Radars - Projets spéciaux - Tubes électroniques - Diodes  
Redresseurs - Transistors - Cristaux pour hyperfréquences - Etc...

**CABLES** Cuivre, Aluminium, Almelec en fils, Câbles, Méplats - Fils et  
Méplats émaillés - Fils guipés - Câbles incombustibles - Fils et  
Câbles électriques isolés pour toutes applications.

**RÉCEPTEURS DE RADIO ET DE TÉLÉVISION** Électrophones et  
"DUCRETET-THOMSON" Tourne-Disques

**APPAREILS MÉNAGERS** Rasoirs électriques - Fers à repasser - Appareillage  
Tubes isolateurs - Réfrigérateurs - Machines à laver - etc...

