

MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES
ET DES CLASSES MOYENNES

ADMINISTRATION DES MINES

ANNALES DES MINES

DE BELGIQUE

[622.05]

ANNÉE 1940

TOME XLI - 4^e LIVRAISON

35364



BRUXELLES
IMPRIMERIE Robert LOUIS

37-39, rue Borrens

Téléph. 48.27.84

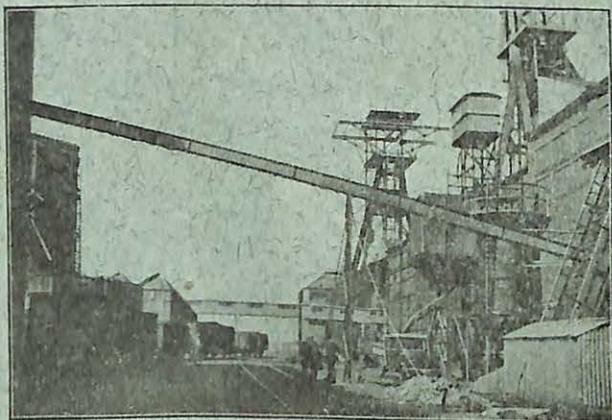
1940

LES TRANSPORTEURS BREVETES

REDLER

HORIZONTALS - INCLINES - VERTICAUX

pour
toutes distances,
toutes capacités (5-500 t./h.),
tous les



**CHARBONS
ET MATIERES
ANALOGUES**

«REDLER» installé
à la Société Anonyme
John Cockerill, Division
du Charbonnage des
Liégeois à Zwartberg,
pour le transport de
charbons et mixtes 0,10
et 0,30, mélangés de
schlamm.

Principaux avantages :

Encombrement très réduit, d'où montage plus simple, suppression de passerelles et de charpentes coûteuses.

Sécurité de marche de 100 %
suppression des engorgements, du graissage

Economie considérable de force.

Suppression du dégagement de poussières.

DEMANDEZ REFERENCES, CATALOGUES
ET VISITE D'INGENIEUR à

BUHLER FRERES

Tél. : 12.97.37 — BRUXELLES — 2a, rue Ant. Dansaert
Usines à UZWIL (Suisse)

MINISTERE DES AFFAIRES ECONOMIQUES
ET DES CLASSES MOYENNES

ADMINISTRATION DES MINES

ANNALES DES MINES

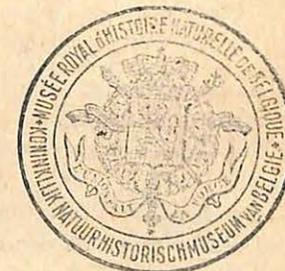
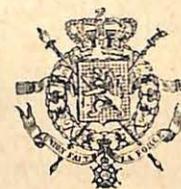
DE BELGIQUE

[622.05]

ANNÉE 1940

TOME XLI - 4^e LIVRAISON

35364



BRUXELLES

IMPRIMERIE Robert LOUIS

37-39, rue Borrens

Téléph. 48.27.84

1940

ANNALES DES MINES DE BELGIQUE

COMITÉ DIRECTEUR

- MM. G. RAVEN, Directeur Général des Mines, à Bruxelles, *Président*.
A. BREYRE, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Professeur à l'Université de Liège, Directeur de l'Institut National des Mines, à Bruxelles, *Vice-Président*.
G. PAQUES, Ingénieur principal des Mines, à Bruxelles, *Membre Secrétaire*.
J. BANNEUX, Directeur à l'Administration centrale des Mines, à Bruxelles, *Secrétaire-adjoint*.
E. LEGRAND, Inspecteur général des Mines, Professeur à l'Université de Liège, à Liège.
A. HALLEUX, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Professeur à l'École des Mines et Métallurgie (Faculté technique du Hainaut) et à l'Université de Bruxelles, à Bruxelles.
V. FIRKET, Inspecteur général honoraire des Mines, à Liège.
L. DENOËL, Inspecteur général des Mines, Professeur à l'Université de Liège, à Liège.
J. VRANCKEN, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, à Hasselt.
P. FOURMARIER, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Professeur à l'Université de Liège, Membre de l'Académie Royale des Sciences, Lettres et Beaux-Arts de Belgique, Membre du Conseil géologique de Belgique, à Liège.
A. RENIER, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Chef du service géologique de Belgique, Professeur à l'Université de Liège, Membre de l'Académie Royale des Sciences, Lettres et Beaux-Arts de Belgique, à Bruxelles.
G. DES ENFANS, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, à Charleroi.
A. DELMER, Ingénieur en chef-Directeur des Mines, Professeur à l'Université de Liège, Secrétaire général au Ministère des Travaux publics et de la Résorption du Chômage, à Bruxelles.
CH. DEMEURE, Ingénieur principal des Mines, Professeur à l'Université de Louvain, à Sirault.

La collaboration aux *Annales des Mines de Belgique* est accessible à toutes les personnes compétentes.

Les mémoires ne peuvent être insérés qu'après approbation du Comité Directeur.

En décidant l'insertion d'un mémoire, le Comité n'assume aucune responsabilité des opinions ou des appréciations émises par l'auteur.

Les mémoires doivent être inédits.

Les *Annales* paraissent en 4 livraisons respectivement dans le courant des premier, deuxième, troisième et quatrième trimestres de chaque année.

Pour tout ce qui regarde les abonnements, les annonces et l'administration en général, s'adresser à l'Éditeur, IMPRIMERIE ROBERT LOUIS, 37-39, rue Borrens, à Ixelles-Bruxelles.

Pour tout ce qui concerne la rédaction, s'adresser au Secrétaire du Comité Directeur, rue de l'Association, 28, à Bruxelles.

Ateliers J. HANREZ, s. a.

MONCEAU-sur-SAMBRE (Belgique)

INSTALLATIONS COMPLETES DE CHAUFFERIES MODERNES

CHAUFFAGE AU CHARBON PULVERISE

Appareils pulvérisateurs, système breveté ATRITOR
Dépoussiérage, désulfuration et épuration des fumées et gaz en général
Grilles mécaniques à poussée arrière, système breveté Martin

MATERIEL POUR CHARBONNAGES

Décantation - Floculation - Sécheurs centrifuges - Tamis vibrants
Installations complètes de fabriques d'agglomérés (briquettes et boulets)
Dépoussiéreurs électriques

MATERIEL POUR GLACERIES ET VERRERIES

Installations complètes de manufactures de glaces, de verreries mécaniques
Machines à bouteilles, entièrement automatiques, brevets Roïrant
Transporteurs à bouteilles

MATERIEL POUR BRIQUETERIES ET TULERIES

Installations complètes pour briqueteries, tuileries mécaniques et l'industrie
céramique
Matériel de fonderie — Machines à mouler — Mécanique générale
Pièces de Forge, de Fonte et de Chaudronnerie
Poêles à circulation d'air

Etablissements Simon WATTIEZ, s.p.r.l.

Successeurs de The American Equipment Co

23, Boulevard de Waterloo, BRUXELLES - Téléphone : 11.98.98



LES MASQUES
LES CASQUES
LES LUNETTES

A. E. C.

S'IMPOSENT

EFFICACITE SECURITE

Soudures auto-chimiques **Castolin**
Presses hydrauliques **Manley**
Foreuses électriques **Sioux**, etc, etc.

OUTILLAGE DE QUALITE — OUTILLAGE DE SECURITE

LA SABULITE BELGE

SOCIETE ANONYME

A MOUSTIER-SUR-SAMBRE

Téléphone : Moustier 15

Explosifs de sûreté à haute puissance (Brevetés dans tous les pays) pour Mines, Carrières, Travaux publics, Usages militaires, Explosifs de sécurité contre le grisou et les poussières de charbon, Explosifs spéciaux pour dessouchage. N'exsudent pas, insensibles à l'action de la chaleur et du froid. Détonateurs électriques et ordinaires. Mèches, explodeurs et tous accessoires pour minage.

INDUSTRIELS, n'employez que la

FERRILINE

pour la peinture de vos ouvrages métalliques

SEULS FABRICANTS :

Les Fils LEVY-FINGER, Bruxelles

S. MARCHAK - PARIS
SUCCURSALE DE BRUXELLES

15, Rue du Lombard

Téléphone : 11.70.79

LOCOMOTIVES DIESEL-DEUTZ

A HUILE LOURDE

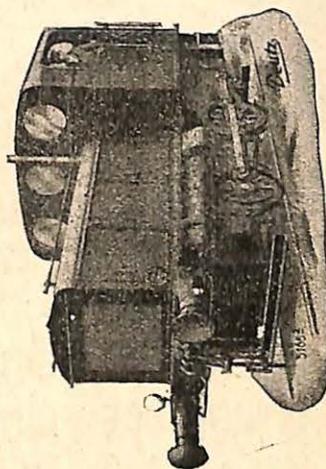
TYPE DE MINE DE 4-5-6-8 TONNES

TYPE EXTERIEUR, VOIE ETROITE DE 2 A 18 TONNES

VOIE NORMALE DE 10 A 40 TONNES



Type de mine.



Type extérieur pour voie normale.

FORAKY

SOCIÉTÉ ANONYME BELGE
D'ENTREPRISE DE FORAGE ET DE FONCAGE
SIÈGE SOCIAL : 13. PLACE DES BARRICADES, BRUXELLES

MATÉRIEL POUR SONDAGES ET FONCAGES

SONDEUSES POUR RECHERCHES DE PÉTROLE, CHARBON, SEL, MINÉRAIS,
MÉTAUX PRÉCIEUX, EAU.

SONDEUSES POUR EXPLOITATION DE CARRIÈRES
POUR CIMENTATION DE BARRAGES
POUR TRAVAUX EN GALERIES

MATÉRIEL DE SONDAGE : POMPES, TRÉPANS, COURONNES A
DIAMANTS ET A GRENAILLE, ETC..

MATÉRIEL DE FONCAGE : TREUILS, TRAPPES, PLANCHERS,
ATTELAGES, ETC..

ATELIERS DE CONSTRUCTION A ZONHOVEN (BELGIQUE)
ATELIERS ET DÉPÔT A COURCELLES - CHAUSSY (MOSELLE)

EXPLOSIFS DE HAUTE SECURITE POUR LES MINES

EXPLOSIFS BRISANTS A GRANDE PUISSANCE

DYNAMITES : Dynamite gomme, dynamites ingélives, dynamites diverses.

EXPLOSIFS DIFFICILEMENT INFLAMMABLES.

Brisant à grande puissance : **RUPTOL**. Sécurité-Grisou-Poussières : **FLAMMIVORE**.

Gaine brevetée de haute sécurité aux sels potassiques.

AMORCES A RETARD sans gaz, du système Eschbach : spécialistes diplômés sur demande.
ACCESSOIRES DE TIR.

SOCIÉTÉ ANONYME D'ARENDONK

Siège administratif : 34, rue Sainte-Marie, à Liège. Tél. Liège 111.60.
Usine à Arendonk : Téléph. Arendonk 26. DÉPÔTS DANS TOUS LES BASSINS.

COMMERCE DE BOIS (ANC. FIRME EUGENE BURM)

SOCIÉTÉ COOPÉRATIVE A ZELE

Importation directe de traverses de chemins de fer et de poteaux
pour télégraphes, téléphone et transport de force

CHANTIER D'IMPREGNATION

Concessionnaire exclusif du créosotage des poteaux télégraphiques de
l'Administration des Télégraphes au Système Rüpling

ATELIERS DE



CONSTRUCTION

DE

LA MEUSE

FONDÉS EN 1835

MATERIEL DE MINES

MACHINES D'EXTRACTION A VAPEUR OU ELECTRIQUES

TURBINES ET TURBO-COMPRESSEURS

VENTILATEURS — BROyeurs — LOCOMOTIVES

MOLETTES — POMPES — MOTEURS DIESEL

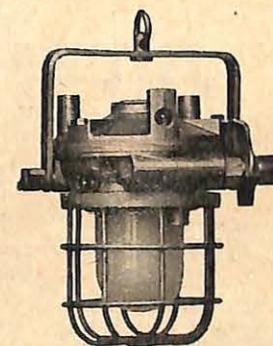
COMPAGNIE AUXILIAIRE DES MINES

SOCIÉTÉ ANONYME

26, RUE EGIDE VAN OPHEM

UGGLE - BRUXELLES

Reg. du Comm. de Brux. : n° 580



ECLAIRAGE ELECTRIQUE DES MINES

Lampes portatives de sûreté pour mineurs : Lampes au plomb et
alcalines. - Lampes électropneumatiques de sûreté. - Matériel
d'éclairage de sûreté en milieu déflagrant.

VENTE — ENTRETIEN A FORFAIT — LOCATION

100.000 LAMPES EN CIRCULATION EN BELGIQUE ET EN FRANCE

Premières installations en marche depuis quarante-quatre ans

Produits Réfractaires

Usines Louis ESCOYEZ

TERTRE (Belgique) et MORTAGNE-DU-NORD (France)

PRODUITS REFRACTAIRES ORDINAIRES ET SPECIAUX POUR TOUTES LES INDUSTRIES

Briques et pièces de toutes formes et dimensions pour fours de tous systèmes - fours à coke - chaudières - gazogènes - cheminées moteurs à gaz.

Ciments réfractaires ordinaires et spéciaux.

Dalles spéciales extra-dures pour usines.
Carreaux et pavés céramiques.

Administr. : Tertre — Tél. : St-Ghislain 35 — Télégr. : Escoyez-Tertre

ENTREPRISES DE FONÇAGE ET GUIDONNAGES DE PUIITS DE MINES

JULES VOTQUENNE

Bureau : 11, Rue de la Station, TRAZEGNIES Tél. : Courcelles 91

Spécialité de guidonnages de tous systèmes

BRIARD perfectionné : nouveau type 1924

Guidonnages frontaux métalliques et en bois, perfectionnés,
pour puits à grande section

ARMEMENTS COMPLETS DE PUIITS DE MINES

BOIS SPECIAUX D'AUSTRALIE

ENTREPRISES EN TOUS PAYS — GRANDE PRATIQUE

Nombreuses références : 10 puits à grande section
équipement de 50 puits à guidonnage BRIARD

Visites, Projets, Etudes et Devis sur demande

POUDRERIES REUNIES DE BELGIQUE S.A.

6, PLACE STEPHANIE

Téléphone : 11.43.94 (3 lignes).

Télégrammes : « Robur ».

DYNAMITES

Explosifs S.G.P. et gainés

pour mines grisouteuses

Explosifs brisants

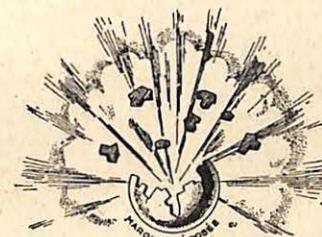
avec ou sans nitroglycérine

Explosifs pour abatages en masse

par mines profondes

Détonateurs

Exploseurs



Mèches

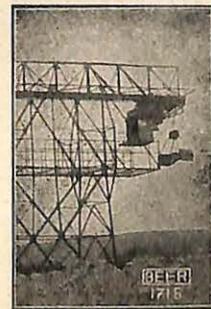
de sûreté

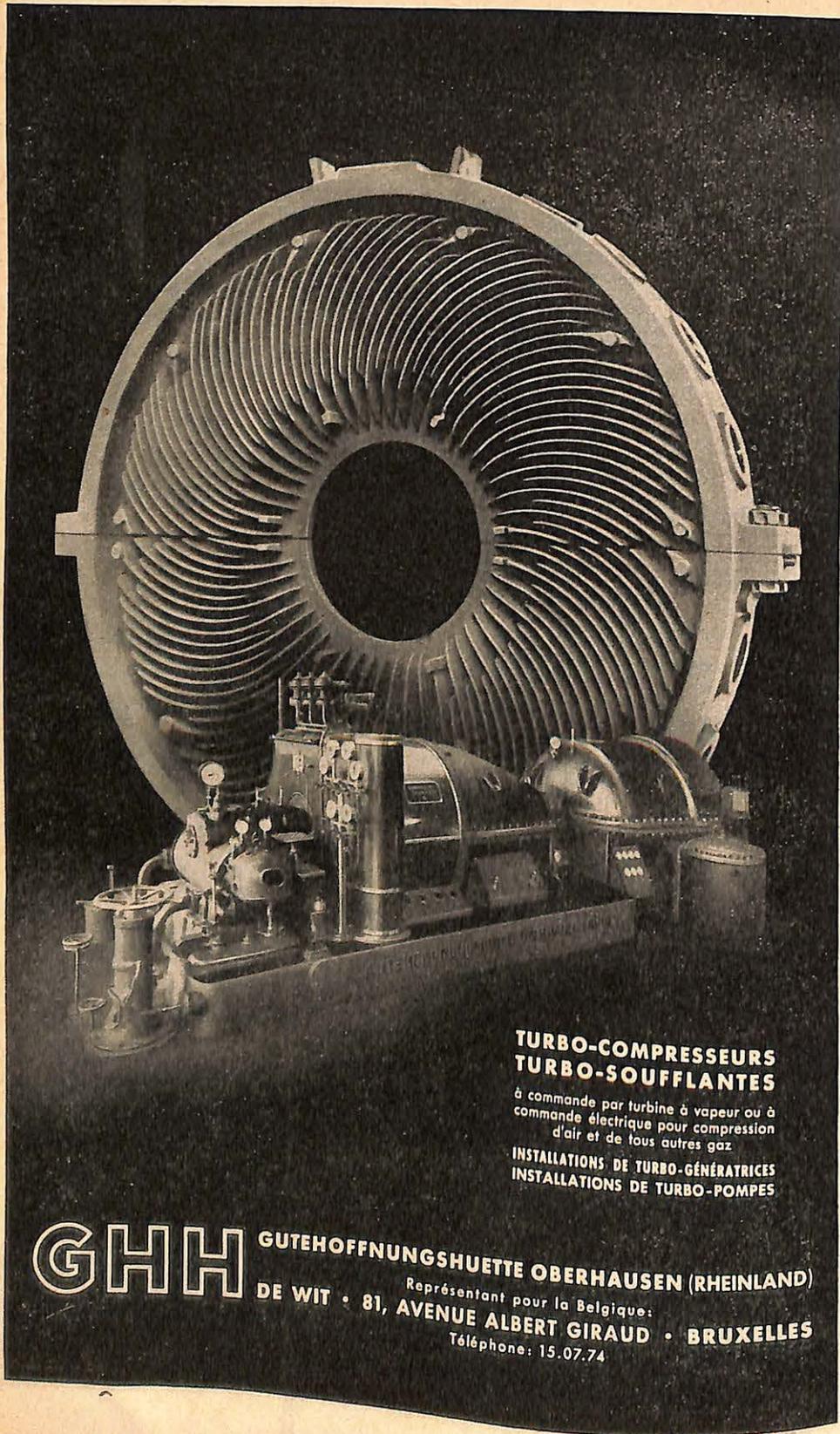
ATELIERS DE CONSTRUCTION

S^{té} A^{me} MAISON BEER

à JEMEPPE-lez-Liége

PRINCIPALES SPECIALITES : Transports aériens. - Bennes automotrices. -
Trainages mécaniques. - Mises à terril. - Grues à vapeur et électriques. -
Ponts roulants et élévateurs. - Triages et lavages de charbons. - Fabriques
d'agglomérés. - Concasseurs et broyeurs. - Appareils de déchargement. -
Convoyeurs et transporteurs. - Ventilateurs de mines.





**TURBO-COMPRESSEURS
TURBO-SOUFFLANTES**

à commande par turbine à vapeur ou à
commande électrique pour compression
d'air et de tous autres gaz

INSTALLATIONS DE TURBO-GÉNÉRATRICES
INSTALLATIONS DE TURBO-POMPES

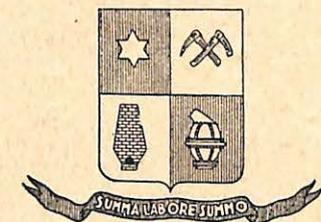
GHH GUTEHOFFNUNGSHUETTE OBERHAUSEN (RHEINLAND)
Représentant pour la Belgique:
DE WIT • 81, AVENUE ALBERT GIRAUD • BRUXELLES
Téléphone: 15.07.74

LA SOCIÉTÉ DES MINES ET Fonderies DE ZINC DE LA VIEILLE-MONTAGNE

(Société Anonyme) ANGLEUR (par Chênée)

LIVRE AU COMMERCE :

ZINCUIAL en lingots. Alliage à très haute teneur en zinc électrolytique pour coulage à l'air libre, sous pression et en coquille, ainsi que pour la fabrication des coussinets de machine et pièces de frottement en remplacement du bronze et des métaux antifriction. — ZINC électrolytique en lingots, laminé en longues bandes. — ZINC ordinaire en lingots (thermique); en feuilles pour toitures et autres usages; en feuilles minces pour emballages; en plaques (pour éviter l'incrustation des chaudières); en plaques et feuilles pour arts graphiques. — ELEMENTS pour piles électriques. — CHEVILLAGE. — FIL — CLOUS en zinc. — BARRES. — BAGUETTES et PROFILES divers en zinc. — TUBES EN ZINC SANS SOUDURE. — OXYDES de Zinc en poudre pour usages pharmaceutiques et industriels, en poudre et en pâte pour la peinture. — POUSSIÈRES de Zinc pour savonneries et teintureries. — PLOMB en lingots, feuilles, tuyaux, fil. — Siphons et coudes en plomb. — ETAIN; tuyaux en étain pur; soudure à l'étain, en baguettes et en fil. — CADMIUM coulé en lingots, plaques et baguettes; laminé en plaques — fil de cadmium. — ARGENT. — PRODUITS CHIMIQUES : Acide sulfurique ordinaire, concentré et oleum. Sulfate de cuivre. Sulfate de thallium. Arséniate de chaux.



OUGRÉE-MARIHAYÉ

vous offre quelques-unes de ses
SPECIALITES

CIMENTS à hautes résistances. - FIL MACHINE de toutes dimensions.
PALPLANCHES pour les grands travaux hydrauliques
TOLES GALVANISÉES planes et ondulées.

MONOPOLE DE VENTE :

Société Commerciale d'Ougrée, A OUGRÉE
Téléphone: Liège 308.30 Adresse télégr.: Marigrée-Ougrée

Ateliers de Constructions Mécaniques

ARMAND COLINET

Société Anonyme

LE RŒULX

Tél. : La Louvière 1290 - Rœulx 63

Télégr. : Colcroix-Rœulx

USINES A HOUDENG ET A RŒULX

MARTEAUX PNEUMATIQUES **La**

PIQUEURS - PERFORATEURS
BECHES - - BRISE-BETONS

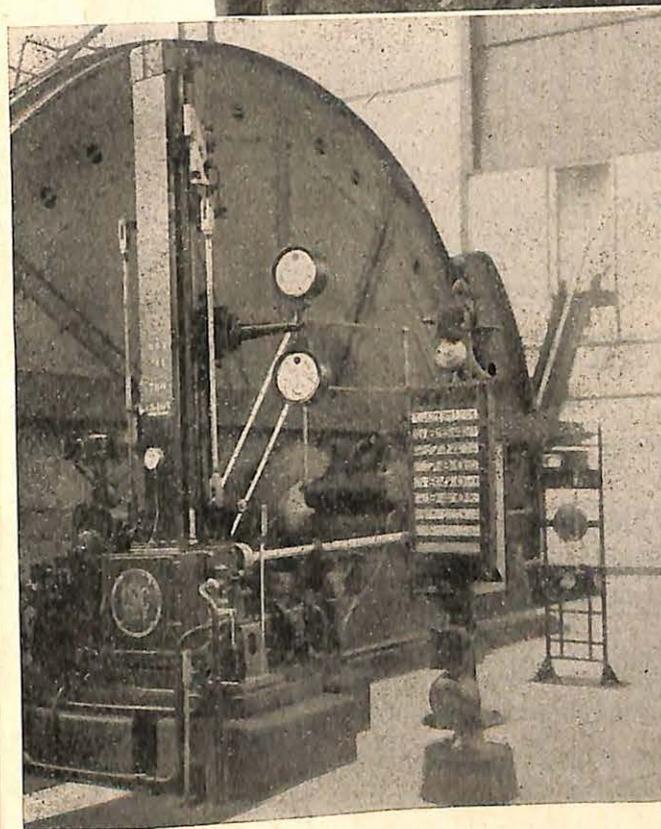
ACCESSOIRES POUR AIR COMPRIME :

Raccords rapides à rotule - Soupapes automatiques - Robinets -
Nipples - Busettes - Ecrous - Tuyauteries métalliques complètes.

ETANÇONS METALLIQUES RIGIDES A HAUTEUR REGLABLE.

ROULEAUX A BAIN D'HUILE AUTOGRAISSEURS :
pour transporteurs à courroie.

INSTALLATIONS COMPLETES de BANDES TRANSPORTEUSES.
CEMENTATION -- TREMPE -- RECTIFICATION



**Cadre
de soutènement
pour
charbonnages**

**Machine
d'extraction
à Poulie KOEPE**

COCKERILL

INDUSCHIMIE

Société de Construction pour l'Industrie Chimique

SOCIETE ANONYME

38a, Boulevard Bischoffsheim, BRUXELLES

Références de
premier ordre.
Devis et visites
d'ingénieurs
gratuits et
sans
engagement.

Notre activité comprend
l'installation d'usines pour :

Acide sulfurique faible, concentré et fumant.

Désarsénification d'acide sulfurique.

Grillage de minerais sulfurés.

Sulfates et bisulfates alcalins.

Acide chlorhydrique.

Sulfure de sodium.

Sulfure de carbone.

Tetrachlorure de carbone.

Superphosphate.



CORDERIES D'ANS

ET

Câbleries de Renory

S. A.

RENORY-ANGLEUR (BELGIQUE)

Adr. télégr. : Sococables-Kinkempois

Tél. : Liège 104.37 - 114.17

USINES FONDÉES DEPUIS PLUS DE DEUX SIÈCLES

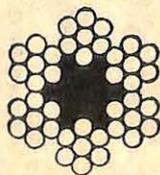
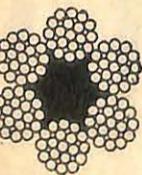
DIVISION ACIER : Câbles plats et ronds d'extraction pour mines.
Tous les câbles pour l'Industrie, Marine, Carrières, Aviation.

DIVISION TEXTILES : Câbles plats d'extraction en Aloes à section
décroissante et uniforme. - Câbles de transmission. - Ficelle lieuse.
Fils à chalumet. - Cordages en général.

CABLES SPECIAUX TRU LAY
sans tendance giratoire

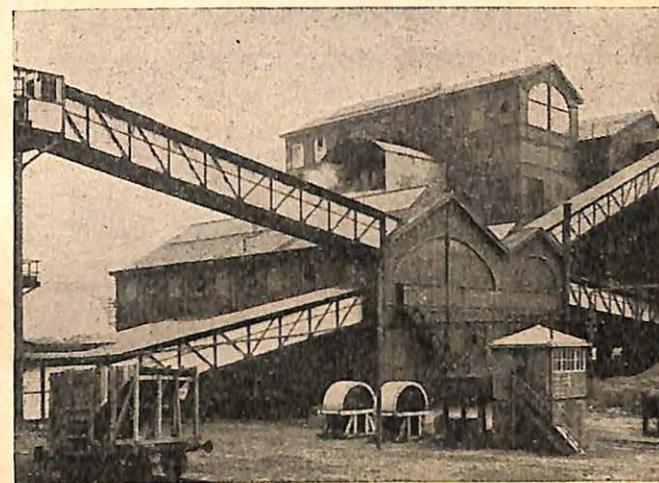
Brevets belge et étrangers

DEMANDEZ NOTICE



Société Anonyme ATELIERS de LA LOUVIERE-BOUVY à LA LOUVIERE (Belgique)

Téléphones : 86 et 186



Charbonnages d'Hensies-Pommerœul, à Hensies. — Intercalation
d'une tour à brut de 1,200 tonnes entre le triage et le lavoir, desservie
par des transporteurs à courroie de 200 à 400 tonnes-heure.

Matériel pour installations de
TRIAGES - LAVOIRS - CONCASSAGES

Châssis à molettes - Cages d'extraction

Wagons à trémies - Wagonnets

Installations de manutention de charbons

Matériel pour installation d'usines d'agglomérés

Couloirs ordinaires et émaillés

Soutènements métalliques

SPECIALITE DE TRAINAGES MECANIKES PAR CABLES
ET PAR CHAINES

TOUT POUR LA MINE

S^{té} A^{me} BAUME-MARPENT

HAINÉ-SAINT-PIERRE

MOTEURS ROTATIFS
A AIR COMPRIME
BREVETS R. MABILLE
TOUTE PUISSANCE
TOUTES APPLICATIONS

BERLAINES

TOUS ACIERS MOULES

CHARPENTES — RESERVOIRS — CHEVALEMENTS

WAGONS — WAGONNETS

USINES : Haine-St-Pierre, Morlanwelz (Belg.), Marpent (Fr.-N.)

Société des Mines d'Or de Kilo-Moto

Capital : 200,000,000 francs

Siège Administratif :

1, Place du Luxembourg, BRUXELLES

Siège d'Afrique :

Kilo-Moto (Congo Belge)

Exploitations par : sluicing ordinaire, laveries, dragues, draglines, pelles. — Traitement des minerais filoniens par broyage, amalgamation, overgrinding flottage, grillage.

EXERCICE 1937

PRODUCTION : 8,066 kg. 701 d'or brut. — Onze millions de m³ de minerai alluvionnaire extraits et lavés. — Un million trois cent cinquante mille tonnes de minerai filonien broyées et traitées.

EXERCICE 1938

PRODUCTION : 8,466 kg.

Réserves : 66,835 kg. d'or en gisement

Personnel Européen : 443.

Personnel de couleur : 38,000

SOCIÉTÉ D'ÉTUDES ET DE CONSTRUCTION

(Société Anonyme)

Capital : 4 millions de francs

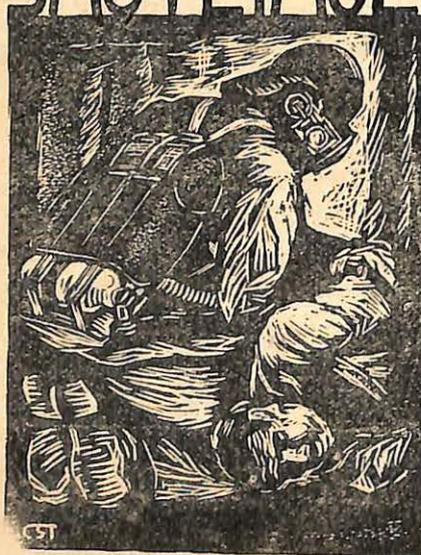
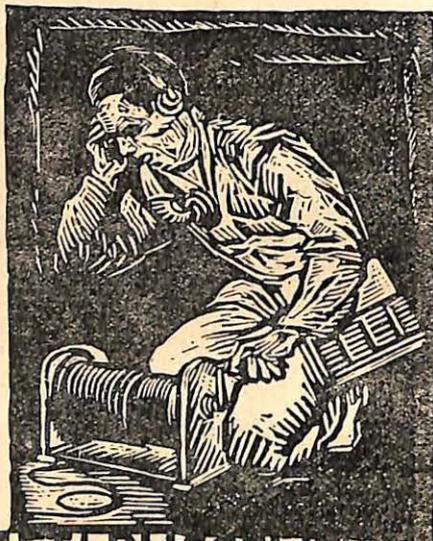
FILIALE DE LA
COMPAGNIE BELGE DE CHEMINS DE FER ET D'ENTREPRISES
33, RUE DE L'INDUSTRIE, 33 — BRUXELLES
Téléphone : 12.51.50

ÉTUDE ET CONSTRUCTION D'IMMEUBLES, BANQUES, USINES,
CENTRALES ÉLECTRIQUES, Etc. - TOUS TRAVAUX DE GENIE CIVIL

Nombreuses références : Société Générale de Belgique, Société de
Traction et d'Electricité, Charbonnages de Houthaelen, etc..., etc...

APPAREILS RESPIRATOIRES POUR TOUTES LES INDUSTRIES

APPAREILS DE SAUVETAGE



ETABLISSEMENTS OXYGENIUM S^TE. A. SCHIEDAM PAYS-BAS

Dép^t Oxygène

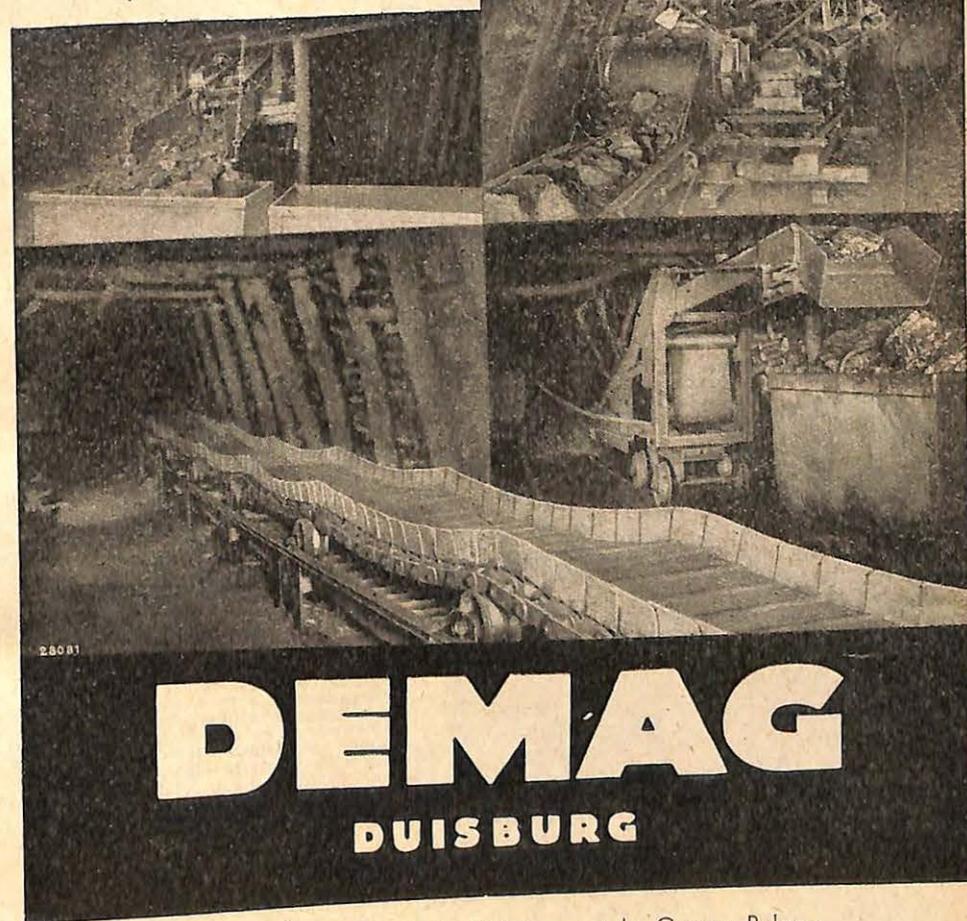
SPECIALISTES DE LA PROTECTION AERIENNE

Constructions d'abris.

(Plus de 3,000 installations)

MATERIEL DE MINES

Pour l'extraction et le transport de charbons, minerais et autres minéraux, nous fournissons : chevalements, machines et cages d'extraction, dispositifs de sécurité pour câbles, turbo-compresseurs, gros compresseurs, soufflantes, compresseurs stationnaires et mobiles, moteurs à air comprimé et outils, roulage automatique de berlines, locotracteurs. Transporteurs de tous genres.

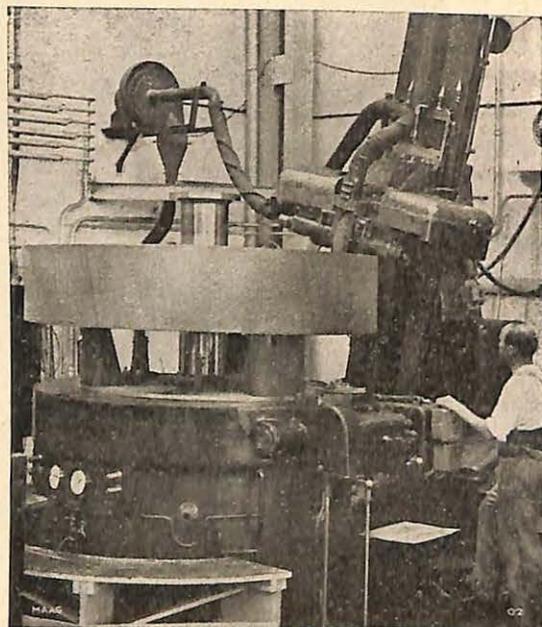


DEMAG

DUISBURG

Représentants pour la Belgique et le Congo Belge :
O. F. WENZ, 107, avenue Dailly, Bruxelles 3.
Installations d'air comprimé, outillage des mines.

Edmond OCHS, Industriel, Seraing.
Pelles universelles, engrenages, grues, palans électriques et ponts roulants de tous types, etc...



LA SUPERIORITE...
par LA SPECIALITE

POUR TOUS...
**PROBLEMES
D'ENGRENAGES**
CONSULTEZ-NOUS!

Références
mondiales

Société Anonyme
des

ENGRENAGES

MAAG

ZURICH - SUISSE

Ad. BAILLY

60, av. Prince de Ligne
BRUXELLES

Tél. : 44.19.53

LA PLUS GRANDE MACHINE DU MONDE!...

...pour la rectification d'engrenages après trempe jusqu'à
3 m. 60 de diamètre et 1 m. de largeur



Le Compteur ASKANIA pour la
mesure des débits d'air comprimé
TYPE A DIVISEUR DE FLUX

Fournit des résultats de mesure
parfaitement exacts, sous toutes
conditions, indépendamment des
variations de pression et de
poids spécifique. Même en cas
de débits pulsatoires, comme
par exemple avec les compres-
seurs, marteaux perforateurs,
hacheuses, etc., le compteur à
diviseur de flux convient par-
faitement.

Pas de calculs compliqués! Pas
de dispositifs auxiliaires de
correction!

L'installation peut être fournie
avec ind.cateur, enregistreur ou
compteur, l'exécution pouvant
être stationnaire ou transpor-
table.

Demandez notre notice S 33630

ASKANIA-WERKE A.G. BERLIN-FRIEDENAU

Ateliers de Construction et Chaudronnerie de l'EST

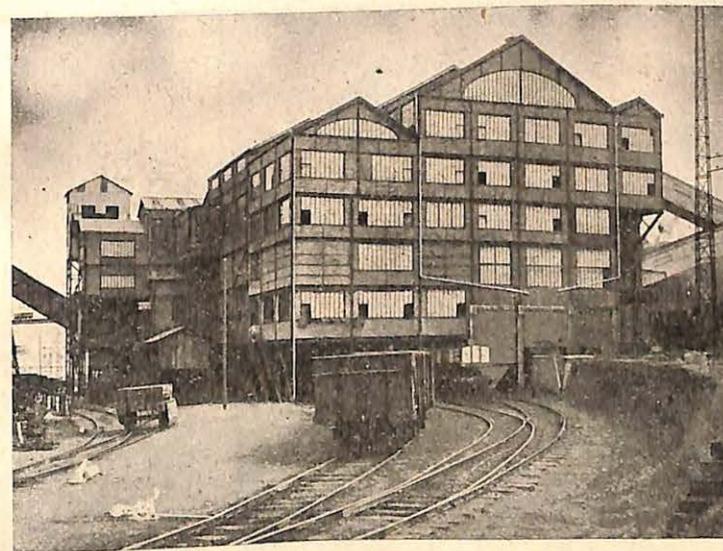
Société Anonyme à MARCHIENNE-AU-PONT (Belgique)

USINES A :

MARCHIENNE - AU - PONT : Chaudronnerie, Forges, Mécanique

MONT - SUR - MARCHIENNE : Charpentes, Réservoirs, Pylones

Téléphones : Charleroi 122.44 (2 lignes) Télégr. : **Estrhéc**



Lavoir RHEOLAVEUR installé en 1937 aux Charbonnages Unis Ouest
de Mons. — Capacité : 100 tonnes-heure de charbon 0-90 mm.

l'EST MET A VOTRE DISPOSITION SES :
Laboratoires, Stations d'essais, Bureau d'études,
Usines spécialisées, Services de montage, Opérateurs,

pour

Préparation mécanique **CHARBONS** et **MINERAIS**

TRIAGES, LAVOIRS RHEOLAVEURS

Manutention générale, ponts roulants,
Installations pour mines et carrières

MECANIQUE — **CHAUDRONNERIE** — **CHARPENTES**
Matériel spécial pour la Colonie

L'AZOBE

DENSITE COMMERCIALE : 1.250 A 1.300

inattaquable par le taret, résiste 3 à 4 fois plus longtemps que le chêne, 8 à 10 fois plus que le hêtre ou le peuplier.

RESISTANCE AU CHOC ET A L'USURE A TOUTE EPREUVE

Bois remarquable pour Travaux Hydrauliques et Maritimes
GLISSIERES DE MINES, Fonds de Camions, Wagons, etc...

BILTERIJST FRERES

Chaussée de Meulestede, 393-395 - GAND

Téléphones : 19.260 — 14.595.

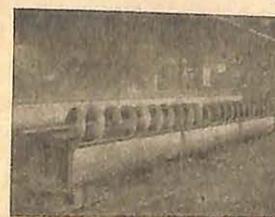
Banquiers : Banque Ouvrière de Bruxelles,
42, rue Pléfinckx, Bruxelles.



ATELIERS DE CONSTRUCTION DE LA BASSE SAMBRE

MOUSTIER-sur-Sambre

Installations de préparation et de lavage de minerais - Installations de charbonnages - Carrières - Fours à coke - Produits chimiques
Manutentions en général - Mécanique générale - Fonderie
Chaudronnerie - Charpentes



LA ROUILLE

VAINCUE DEFINITIVEMENT

par

FISHMASTIC

ET

FISHCOLOR

PRODUITS BELGES

Seul le Fishcolor réunit les trois conditions indispensables pour une bonne peinture antirouille :

ADHERENCE — IMPERMEABILITE — ELASTICITE

EXISTE EN TOUTES TEINTES
DEMONSTRATIONS SUR DEMANDE

FISHMASTIC huile décapante NON ACIDE. Enlève la rouille du métal et remet ce dernier complètement à neuf. En pénétrant dans tous les pores du métal le Fishmastic détruit tous les germes d'oxydation, condition indispensable pour éviter toute corrosion future.

FISHMASTIC de par ses propriétés immunisantes prolonge la durée des tôles, charpentes, réservoirs métalliques, tuyauteries (jusqu'à 200°C.), barres, grilles, etc.

FISHCOLOR est la seule peinture ANTIROUILLE à base de Fishmastic immunisant. Grande économie de main-d'œuvre due à sa très longue durée et sa grande fluidité.

Demandez la Brochure illustrée avec liste de références très importantes et rapports d'essais officiels au :

Comptoir Industriel et Agricole "CINDA"

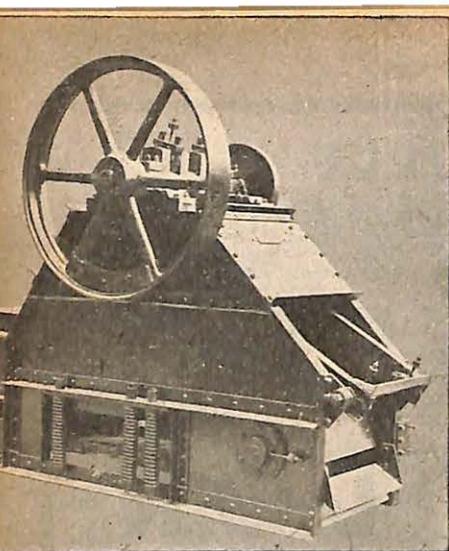
Société Anonyme

31, BOULEVARD PIERCOT, à LIEGE Tél. : 208.40 (3 lignes)

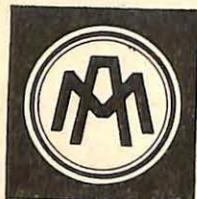
Usine : 156, Rue d'Othée, Ans-lez-Liége

Téléphone : 607.64

Télégrammes : Cinda-Liége



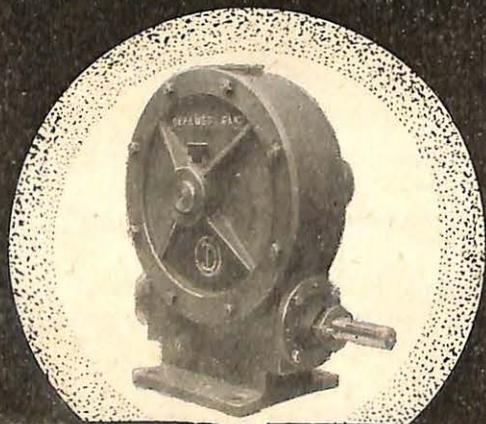
CONCASSEUR



LES ATELIERS METALLURGIQUES DE NIVELLES

SOCIÉTÉ ANONYME

Locomotives, Wagons et voitures
Ponts et Charpentes, Appareils
de levage et de manutention,
Aciérie, Chaudronnerie, Ressorts,
Matériel minier, Galvanisation,
etc..., etc...



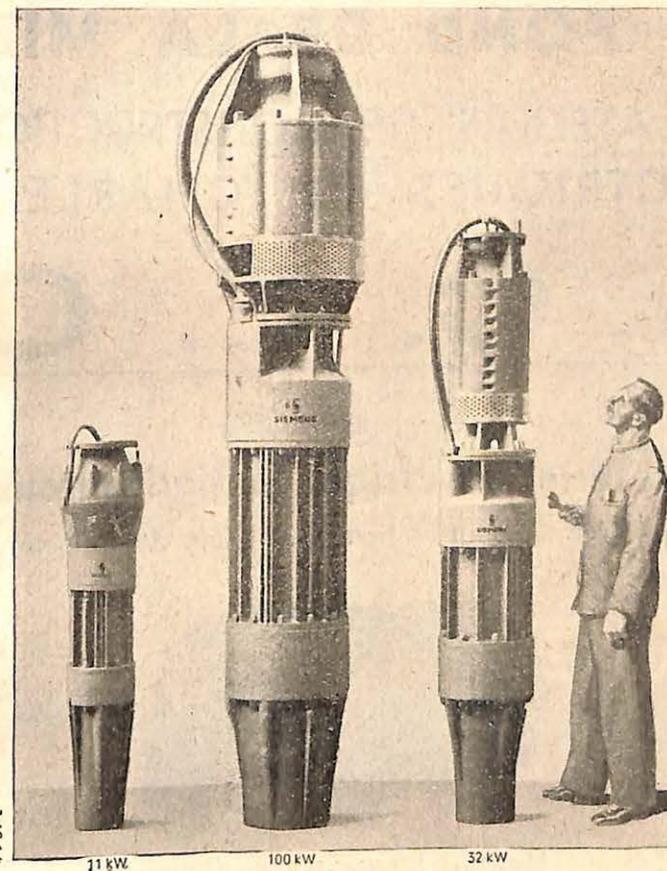
DEFAWES

ENGRENAGES . REDUCTEURS DE VITESSE
ATELIERS JEAN DEFAWES A GAND
2 PASSAGE D'YPRES ET 1815 RUE WAERSCHOOT - TEL. 11408.

7.00.6-38


SIEMENS

Pompes Immersibles



Pour tous débits et pressions

Pour toutes les profondeurs d'immersion

*Une expérience de plusieurs années dans différents cas d'application
assure un service irréprochable.*

SOCIÉTÉ ANONYME SIEMENS
DÉPARTEMENT SIEMENS - SCHUCKERT

116, CHAUSSÉE DE CHARLEROI, BRUXELLES - TÉLÉPHONE 37.31.00

LA QUESTION

A L'ORDRE DU JOUR

ELECTRIFICATION DU FOND DE LA MINE

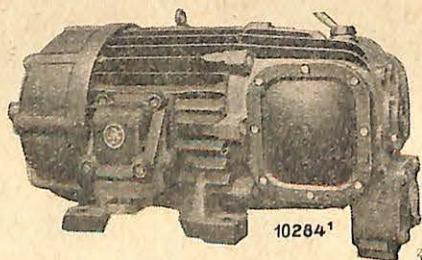
LES ATELIERS DE CONSTRUCTIONS
ELECTRIQUES DE CHARLEROI

A. C. E. C.

construisent tout le

Matériel électrique antigrisouteux

agrée par l'Institut National des Mines de Frameries



Moteur à bagues antigrisouteux
à ventilation extérieure.

MOTEURS

APPAREILLAGE ELECTRIQUE

TRANSFORMATEURS

LOCOMOTIVES ELECTRIQUES

APPAREILS DE SIGNALISATION

ECLAIRAGE ELECTRIQUE

DES FRONTS DE TAILLE

MATERIEL
ANTI-
GRISOU-
TEUX

MATERIEL
ANTI-
GRISOU-
TEUX

ETUDE D'ANNEAUX CIRCULAIRES A FORTE COURBURE RELATIVE SOLLICITES PAR DEUX FORCES DIAMETRALEMENT OPPOSEES

PAR

Louis BLANJEAN,

Ingénieur Civil Mécanicien et Electricien (A. I. Br.),
Chargé de Recherches du Fonds National de la Recherche Scientifique.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	779
Bibliographie	781
Notations principales employées dans cette note	785
I. — ETUDE THEORIQUE.	
2. Généralités	785
3. Conventions de signes	785
A. — <i>Théorie des pièces à forte courbure relative, sollicitées par flexion plane composée. — Méthode basée sur la résistance des matériaux</i>	
4. Définition du cas et hypothèses	786
5. Mise en équation de l'expression de σ_x	786
6. Pièces à forte courbure non fléchies ou sollicitées par traction ou compression simple	797
7. Expressions particulières de l' et de ρ'	797
Section circulaire, elliptique, rectangulaire, trapèze.	

B. — Application de la méthode de la résistance des matériaux à l'étude d'un maillon de chaîne elliptique ou circulaire, sollicité par deux forces égales et diamétralement opposées.

8. a)	Equations de départ dans le cas général	802
9. b)	Cas particulier de l'anneau circulaire à section transversale circulaire constante (anneau rond, section ronde)	805
	1°) Etude des moments fléchissants	805
	2°) Diagramme des tensions normales circonférentielles aux diverses sections transversales de l'anneau	808
	3°) Etude des déformations	811
	Calcul de f_A , variation du diamètre suivant lequel sont appliquées les charges F	811
	Calcul de f_B , variation du diamètre transversal aux charges	814
	C. — Etude de l'anneau circulaire de section transversale constante rectangulaire, par la théorie de l'élasticité.	
10.	Introduction	817
11.	Généralités	818
12.	Cas de l'anneau circulaire, sollicité par deux forces diamétralement opposées le soumettant dans son ensemble à traction	820
	Calcul des tensions; formules générales	820
13.	Relations directement utiles au point de vue technique.	821
14.	Calcul du moment fléchissant M_A . — Remarque	825
15.	Position théorique du point d'inflexion	826
16.	Exemple d'application des formules données par la théorie de l'élasticité	827
17-18-19.	D. — Etude de la tension maximum de la zone même de contact de la charge	829

II. — CONTROLE PHOTO-ELASTIQUE DE CERTAINS RESULTATS OBTENUS PAR LE CALCUL.

20. A)	Introduction	833
21. B)	Rappel des caractères de la région des points d'inflexion	834
22.	Expression générale des tensions	834
23.	Courbes isochromatiques ou d'extinction	837
24. C)	Trajectoires des tensions principales ou lignes isostatiques	857
25-26. D)	Obtention expérimentale des diagrammes des tensions circonférentielles sur les bords intrados et extrados de l'anneau	861
27-28. E)	Obtention expérimentale du diagramme des tensions normales dans la section transversale de l'anneau située suivant le diamètre normal à la direction des charges extérieures	873
29-33. F)	Résumé des résultats acquis par le contrôle des anneaux par la photo-élasticité	876

34. III. RELATIONS DES ESSAIS EFFECTUES SUR ANNEAUX ROUNDS EN FER OU EN ACIER.

35.	Caractéristiques des séries d'anneaux essayés :	
	1°) Métaux utilisés	881
	2°) Résultats des essais	883
36.	Description de l'essai d'un des anneaux	886

IV. — RESUME ET CONCLUSIONS PRATIQUES.

39. A)	Formules et nomogrammes d'application technique	895
40. B)	Tension d'utilisation admissible. Analyse de la situation actuelle	902

41. C) Solution à adopter pour les anneaux ronds. — Bases logiques de cette solution 905
42. D) Conclusion 906
- Tableau des valeurs caractéristiques utiles des principaux métaux employés pour les anneaux 907

ANNEXE I.

45. Formules des anneaux circulaires sollicités par deux forces diamétralement opposées, appliquées soit à l'intrados, soit à l'extrados et supposées, d'une part, uniformément réparties sur un certain arc et, d'autre part, concentrées. 909
44. Quatre cas particuliers 910

ANNEXE II.

45. Application de la méthode de la résistance des matériaux à l'étude du maillon circulaire étauçonné sollicité par deux forces diamétralement opposées 915

INTRODUCTION⁽¹⁾

1. — L'étude est faite dans le but de préciser les limites et les conditions d'application pratiques au problème des anneaux circulaires, des formules données, d'une part, par l'application de la théorie classique de la résistance des matériaux et, d'autre part, par l'application de la théorie de l'élasticité.

L'étude comprend quatre sections :

- I. *Etude théorique* : établissement des formules des tensions et des déformations par la théorie classique de la résistance des matériaux; établissement des formules des tensions par la théorie de l'élasticité; comparaison des deux méthodes.
- II. *Etude expérimentale* : contrôles par la photo-élasticité.
- III. *Etude expérimentale technique* : essais effectués sur un lot d'anneaux en fer ou en acier.
- IV. *Conclusions pratiques et résumé.*

(1) Cette étude a été faite au laboratoire de Photo-élasticité et de Résistance des Matériaux de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Bruxelles, dirigé par M. le Professeur Baes. Les essais sur anneaux circulaires en acier ont été effectués à la suggestion de l'« Association des Industriels de Belgique », en vue de préciser les conditions de sécurité à exiger actuellement pour ces éléments, qui jouent un rôle important dans de nombreuses applications industrielles.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] 1913. Hans LORENZ. — Lehrbuch der Technischen Physik; Band IV, Technische Elastizitätslehre; München und Berlin, R. Oldenbourg.
- [2] 1921. Arthur MORLEY. — Strength of Materials; London, Longman, Green and Co.
- [3] 1922. E. G. COKER. — Curved Beams, Rings and Chain Links; London, The Junior Institution of Engineers.
- [4] 1924. Louis N.G. FILON. — The Stresses in a Circular Ring; London, The Institution of Civil Engineers.
- [5] 1925. S. TIMOSHENKO and J.M. Lessels. — Applied Elasticity; East Pittsburg, Pa., Westinghouse Technical Night School Press.
- [6] 1950. A. MESNAGER. — Essai sur le Tracé des Lignes Isostatiques dans les Problèmes à Deux Dimensions; Premier Congrès International du Béton et du Béton Armé, Liège 1950, volume I, pages 200 à 204; Liège et Paris, La Technique des Travaux.
- [7] 1950. Georg BELL. — Theorie und Versuche über Einige Fälle von Spannungsverteilung in Ringförmige Körper; Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Band 10, pages 52 à 72; Berlin, V.D.I. Verlag.
- [8] 1950-54. Louis BAES. — Résistance des Matériaux et Eléments de la Théorie de l'Elasticité et de la Plasticité des Corps Solides; Tome I, Principes Généraux et Cas Spéciaux Importants; Bruxelles, Maurice Lamertin.
- [9] 1951. E. G. COKER and L. N. G. FILON. — A Treatise on Photoelasticity; Cambridge, University Press.

- [10] 1935. L. BAES et F. TEMMERMAN. — Etats de Tension à Deux Dimensions, Types Fondamentaux de Points Singuliers du Réseau des Trajectoires de Tensions Principales; Comptes-Rendus du 2^e Congrès National des Sciences, pages 1144 à 1156; Bruxelles, M. Hayez.
- [11] 1935. Fritz TEMMERMAN. — Contribution à l'Etude des Singularités des Lignes Caractéristiques des Etats de Tension à Deux Dimensions; Comptes-Rendus du 2^e Congrès National des Sciences, pages 1168 à 1177; Bruxelles, M. Hayez.
- [12] 1936. V. TESAR. — Etude Expérimentale des Contraintes Produites dans une Poutre par des Charges Concentrées; Mémoires de l'Association Internationale des Ponts et Charpentiers, 4^e volume, pages 545 à 571; Zurich, Secrétariat Général de l'Association.
- [13] 1936. S. TIMOSHENKO. — Théorie de l'Elasticité; Paris et Liège, Ch. Béranger.
- [14] 1937. ASSOCIATION BELGE DE STANDARDISATION. — Règlement pour la Construction des Charpentes Métalliques (Texte et Notes explicatives), 3^e édition.
- [15] 1937. Maurice BRICAS. — La Théorie de l'Elasticité Bidimensionnelle; Athènes, Imprimerie Pirsos.
- [16] 1937. Louis BLANJEAN et Fritz TEMMERMAN. — Etude de la Région Voisine du Point d'inflexion d'une Pièce Droite Prismatique en Flexion Plane; Bulletin de la Société Royale Belge des Ingénieurs et des Industriels, n^o 9 de 1937, pages 851 à 864; Bruxelles.

NOTE. — Dans le texte qui suit, les ouvrages auxquels on se référera seront repérés par les numéros précédents placés entre crochets.

NOTATIONS PRINCIPALES EMPLOYEES DANS CETTE NOTE

Dimensions caractéristiques des anneaux.

- h : hauteur radiale d'un anneau;
- ρ : rayon du centre de gravité de la section transversale de l'anneau;
- ρ' : rayon du centre de gravité de la section transversale transformée de l'anneau;
- r_e : rayon de la fibre extrados de l'anneau;
- r_i : rayon de la fibre intrados de l'anneau;
- r, α : coordonnées polaires d'un point courant de l'anneau, comptées respectivement à partir du centre de l'anneau, et à partir du diamètre transversal aux forces extérieures;
- Ω : aire de la section transversale de l'anneau;
- Ω' : aire de la section transversale transformée de l'anneau;
- I : moment d'inertie de la section transversale de l'anneau, par rapport à l'axe de gravité (de cette section) perpendiculaire au plan de l'anneau;
- I' : moment d'inertie de la section transversale transformée de l'anneau, par rapport à l'axe de gravité (de cette section) perpendiculaire au plan de l'anneau;
- ξ : coefficient de forme de la section de l'anneau, au point de vue de la déformation due aux efforts tranchants (1,20 pour une section rectangulaire, et $32/37 = 1,185$ pour une section circulaire);
- z' : distance radiale entre la fibre courante et la fibre de rayon ρ' , prise comme repère, (comptée positive vers l'extrados et négative vers l'intrados).

Données relatives à la matière.

E : module d'élasticité longitudinal;

G : module d'élasticité de glissement ou transversal;

Données relatives à la sollicitation.

F : force extérieure sollicitant l'anneau (positive si c'est une traction);

M'_a : moment fléchissant relatif à la section d'angle polaire α , compté positif s'il tend à diminuer le rayon de courbure (augmenter la courbure);

N_a : effort normal relatif à cette section, compté positif si c'est une traction;

σ_r : tension normale aux facettes orientées perpendiculairement à la direction radiale;

σ_a : tension normale aux facettes radiales, ou tension circonférentielle;

τ_{ra} , τ_{ar} : tensions tangentielles agissant respectivement sur les facettes précédentes.

I. - ETUDE THEORIQUE

2. - GENERALITES.

Tant que le rapport ρ/h du rayon de courbure de la fibre moyenne de l'anneau et de la hauteur radiale h de la section transversale est suffisamment grand (voir les théories ci-après), le problème peut être étudié par la théorie ordinaire de la flexion plane des pièces à forte courbure relative.

La première partie de l'étude théorique, c'est-à-dire les §§ 4 à 7, présente la théorie ordinaire telle qu'elle est enseignée déjà depuis de nombreuses années dans les Universités belges, et notamment par M. le Professeur Baes, au cours de résistance des matériaux de l'Université de Bruxelles (1).

Ainsi qu'il sera montré ultérieurement, lorsque le rapport ρ/h est moindre que 2, c'est-à-dire lorsque la courbure relative est forte, la théorie ordinaire est défavorable, c'est-à-dire que les tensions calculées par cette théorie sont supérieures aux tensions réelles. Il faut alors étudier l'anneau par la théorie de l'élasticité. La méthode de calcul basée sur la théorie de l'élasticité est fort peu connue, aussi est-il utile de résumer cette méthode et surtout d'en dégager les résultats les plus importants susceptibles de rendre de grands services dans les applications techniques.

3. - CONVENTIONS DE SIGNES.

Dans l'étude des tensions et des déformations, l'effort longitudinal N est pris positif, si c'est un effort de traction, et le moment fléchissant M est considéré positif quand il tend à augmenter la courbure.

(1) Nous avons cru utile de publier ici cette théorie, car nous avons pu constater combien le calcul des pièces à forte courbure relative est encore souvent mené de manière tout à fait incorrecte ou par des théories plus anciennes, conduisant à des formules plus lourdes à manier que celles auxquelles aboutit la théorie exposée ci-après.

A. — THEORIE DES PIÈCES A FORTE COURBURE RELATIVE, SOLLICITEES PAR FLEXION PLANE COMPOSEE

Méthode basée sur la résistance des matériaux.

4. — DEFINITION DU CAS.

Le rapport ρ/h du rayon de courbure ρ de la fibre moyenne et de la hauteur radiale h de la section transversale est assez grand pour ne pas exiger l'application de la théorie de l'élasticité, mais n'est pas assez grand pour permettre d'utiliser les formules de la flexion des pièces droites donnant les tensions.

Hypothèses relatives au calcul des tensions normales σ_x :

Ces hypothèses sont les mêmes que dans l'étude de la flexion des pièces longues, droites :

- La pièce peut être considérée comme une pièce longue;
- La défiguration des sections transversales, et notamment les déformations radiales, peuvent être négligées;
- Le calcul des tensions σ_x se fait en admettant que les sections transversales et planes avant flexion le restent après déformation;
- Les tensions σ_y et σ_z sont négligeables, de sorte que dans les limites de l'élasticité, les tensions σ_x sont proportionnelles aux dilatations δ_x .

5. — MISE EN EQUATION DE L'EXPRESSION DE σ_x (fig. 1).

Étudions une fibre quelconque AA_1 , cherchons le σ_x correspondant.

Rapportons le tout à une fibre de référence $G'G'_1$ dont la position n'est pas précisée dès l'abord et qui sera choisie le plus opportunément pour conduire à l'expression la plus simple de σ_x .

Soit δ'_0 la dilatation subie par cette fibre de référence.

Les z' sont comptés positifs vers l'extrados, négatifs vers l'intrados.

Avant déformation, dans l'amplitude angulaire élémentaire $d\alpha'$, les fibres avaient un centre de courbure C ; après déformation, elles ont un centre de courbure C'' , l'angle $d\alpha'$ étant devenu $d\alpha''$. On part

de l'hypothèse que les sections transversales et planes avant déformation restent transversales et planes après déformation.

On sait que l'on obtiendra ainsi la valeur de σ_x .

On a, par définition de δ_x :

$$AA''_1 = AA_1 (1 + \delta_x)$$

mais :

$$AA''_1 = (z'' + \rho'') d\alpha'' = \rho'' d\alpha'' \left(1 + \frac{z''}{\rho''}\right) = \rho'' d\alpha'' \left(1 + \frac{z'}{\rho'}\right)$$

$$AA_1 = (z' + \rho') d\alpha' = \rho' d\alpha' \left(1 + \frac{z'}{\rho'}\right)$$

mais aussi :

$$G'G''_1 = (1 + \delta'_0) G'G'_1$$

ou

$$\rho'' d\alpha'' = (1 + \delta'_0) \rho' d\alpha'$$

δ'_0 étant la dilatation de la fibre de référence.

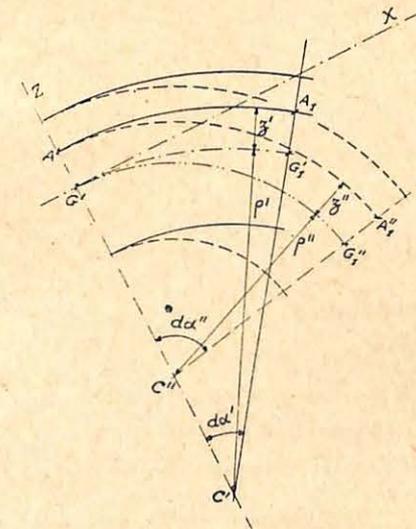


Fig. 1. — Etude géométrique de la déformation.

Donc :

$$1 + \delta_x = \frac{AA''_1}{AA_1} = \frac{\rho'' d\alpha''}{\rho' d\alpha'} \frac{1 + z'/\rho''}{1 + z'/\rho'}$$

$$1 + \delta_x = (1 + \delta'_0) \frac{1 + z'/\rho''}{1 + z'/\rho'}$$

On peut écrire :

$$\delta_x = (1 + \delta'_0) \frac{1 + z'/\rho''}{1 + z'/\rho'} - (1 + \delta'_0) + \delta'_0$$

$$= (1 + \delta'_0) \frac{(1 + z'/\rho'') - (1 + z'/\rho')}{1 + z'/\rho'} + \delta'_0$$

$$= \frac{(1 + \delta'_0)(1/\rho'' - 1/\rho')z'}{1 + z'/\rho'} + \delta'_0$$

ou encore :

$$\delta_x = \frac{1}{1 + z'/\rho'} \left\{ \delta'_0 + \left[\frac{\delta'_0}{\rho'} + (1 + \delta'_0) \left(\frac{1}{\rho''} - \frac{1}{\rho'} \right) \right] z' \right\}$$

Donc, en vertu des hypothèses :

$$\sigma_x = \frac{E}{1 + z'/\rho'} (\delta'_0 + k.z') \quad (1)$$

avec :

$$k = \frac{\delta'_0}{\rho'} + (1 + \delta'_0) \left(\frac{1}{\rho''} - \frac{1}{\rho'} \right)$$

Cette formule n'est qu'une étape de l'étude, puisqu'elle contient deux variables auxiliaires δ'_0 et ρ'' , à éliminer.

Telle qu'elle, cette formule exprime la loi de déformation admise.

Il y a maintenant à poser les équations d'équilibre qui contiennent les σ_x :

Equation d'équilibre suivant l'axe des x :

$$N = \int_0^{\Omega} \sigma_x d\Omega = E.\delta'_0 \int_0^{\Omega} \frac{d\Omega}{1 + z'/\rho'} + E.k \int_0^{\Omega} \frac{z'.d\Omega}{1 + z'/\rho'} \quad (2)$$

Equation d'équilibre de rotation, par exemple par rapport à l'axe passant par G' , et parallèle à l'axe neutre :

$$M' = \int_0^{\Omega} \sigma_x z'.d\Omega = E.\delta'_0 \int_0^{\Omega} \frac{z'.d\Omega}{1 + z'/\rho'} + E.k \int_0^{\Omega} \frac{z'^2.d\Omega}{1 + z'/\rho'} \quad (3)$$

On dispose ainsi des trois équations (1), (2), (3) entre lesquelles on va éliminer δ'_0 et ρ'' .

Section transversale transformée :

Au lieu de continuer à raisonner sur la section transversale réelle, on va raisonner sur cette section après l'avoir transformée opportunément (fig. 2).

On choisit une base de transformation AA.

On remplace la demi-largeur DB du profil par DB' obtenue en joignant BD, en prenant l'intersection E avec la base de transformation et en rejetant E en B'.

On obtient ainsi un nouveau contour de la section transversale.

On a :

$$\frac{b'}{b} = \frac{\rho_0}{z' + \rho'} \quad b' = \frac{b.\rho_0}{z' + \rho'}$$

Une autre base de transformation que AA donnerait des b' tous modifiés dans le même rapport, donc toutes les surfaces transformées que l'on pourrait obtenir ainsi ont le même centre de gravité G' .

C'est le lieu des points G' qui sera choisi comme fibre de référence $G'G'_1$.

Sa position est bien définie et son rayon de courbure aussi.

La surface transformée est telle que son aire :

$$\Omega' = \int_0^{\Omega'} d\Omega' = \int_0^{\Omega'} b'.dz = \rho_0 \int_0^{\Omega'} \frac{b.dz}{z+\rho'}$$

Le centre de gravité G' répond à :

$$\rho'.\Omega' = \int_0^{\Omega'} b'.dz(z+\rho) = \rho_0 \int_0^{\Omega'} \frac{b(z+\rho)}{z+\rho} dz = \rho_0 \int_0^{\Omega'} b.dz$$

$$\boxed{\rho'.\Omega' = \rho_0.\Omega} \quad (4)$$

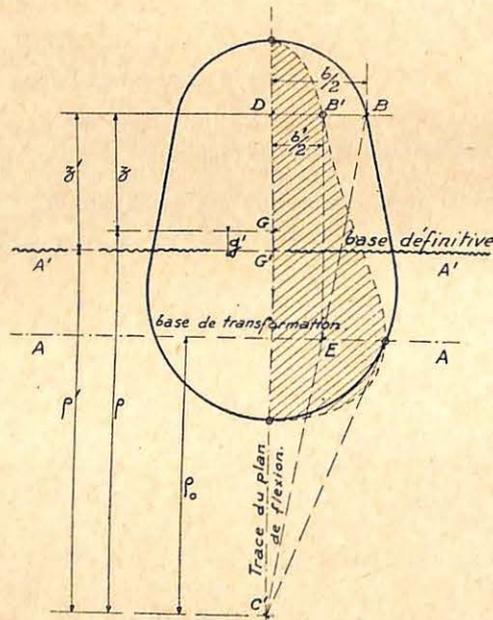


Fig. 2. — Etude des sections transversales transformées.

Donc, si l'on adopte à titre final dans ce problème, comme *base de transformation*, l'axe qui passe par le centre G' commun à toutes les surfaces transformées, on obtient :

$$\rho' = \rho_0 \quad \text{et} \quad \boxed{\Omega' = \Omega} \quad (5)$$

Dans ces conditions :

$$\Omega' = \int_0^{\Omega'} \frac{b.dz}{1+z'/\rho'} = \int_0^{\Omega'} \frac{d\Omega}{1+z'/\rho'}$$

D'ailleurs, il est évident que, puisque :

$$\frac{b'}{b} = \frac{\rho_0}{\rho'+z'} = \frac{1}{1+z'/\rho'}$$

donc :

$$d\Omega' = \frac{d\Omega}{1+z'/\rho'}$$

Donc, lorsque la base de transformation passe en G' :

$$\rho_0 = \rho'$$

$$\int_0^{\Omega'} \frac{z'.d\Omega}{1+z'/\rho'} = \int_0^{\Omega'} z'.d\Omega' = 0$$

$$\int_0^{\Omega'} \frac{z'^2.d\Omega}{1+z'/\rho'} = \int_0^{\Omega'} z'^2.d\Omega' = I'$$

moment d'inertie de la section transformée par rapport à l'axe $A'A'$ passant par G' .

Si l'on introduit ces résultats dans les expressions (1) et (2), celles-ci deviennent :

$$N = E.\delta'_0.\Omega$$

$$M' = E.k.I'$$

donc :

$$\delta'_0 = \frac{N}{E.\Omega}$$

$$k = \frac{M'}{E.I'}$$

et la tension σ_x répond à la formule très simple :

$$\sigma_x = \frac{1}{1 + z'/\rho'} \left[\frac{N}{\Omega} + \frac{M' \cdot z'}{I'} \right] \quad (6)$$

Cette formule est donc une généralisation de la formule des pièces droites fléchies.

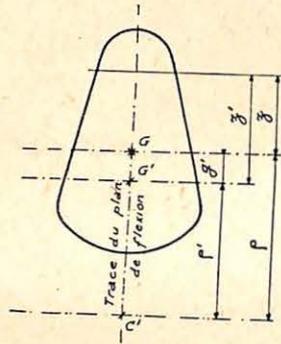


Fig. 3. — Calcul de I' .

Expression simple de I' (fig. 3).

On peut donner de I' une expression particulièrement simple :

On a $z' = z + g'$, en appelant g' la distance GG' :

$$d\Omega' = \frac{d\Omega}{1 + z'/\rho'} = \frac{\rho'}{\rho' + z'} d\Omega$$

mais $\rho' + z' = \rho + z$:

$$\begin{aligned} dI' &= (z + g')^2 \frac{\rho'}{\rho + z} d\Omega \\ I' &= \rho' \int_0^{\Omega'} \frac{(z + g')(z + \rho - \rho') d\Omega}{\rho + z} \\ &= \rho' \int_0^{\Omega'} (z + g') \left(1 - \frac{\rho'}{\rho + z} \right) d\Omega \end{aligned}$$

$$I' = \rho' \left\{ \int_0^{\Omega'} z d\Omega - \rho' \int_0^{\Omega'} \frac{z d\Omega}{\rho + z} + g' \int_0^{\Omega'} d\Omega - g' \cdot \rho' \int_0^{\Omega'} \frac{d\Omega}{\rho + z} \right\}$$

$$I' = \left\{ -\rho' \int_0^{\Omega'} z d\Omega + g' \cdot \Omega - g' \cdot \Omega \right\} = -\rho' \int_0^{\Omega'} z d\Omega$$

mais $z = z' - g'$; donc :

$$I' = -\rho' \int_0^{\Omega'} z' d\Omega' + g' \cdot \rho' \cdot \Omega' = g' \cdot \rho'$$

$$I' = (\rho - \rho') \rho' \cdot \Omega \quad (7)$$

Cette expression facilitera souvent l'application de la formule (6).

Expression de la déformation angulaire (fig. 4) :

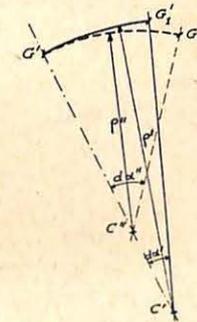


Fig. 4. — Etude de la déformation angulaire.

$$d\varphi = d\alpha'' - d\alpha' = \frac{GG''_1}{\rho''} - \frac{GG'_1}{\rho'} = ds' \left(\frac{1 + \delta_0}{\rho''} - \frac{1}{\rho'} \right)$$

or :

$$k = \frac{1 + \delta'_0}{\rho''} - \frac{1}{\rho'} \quad \text{et} \quad k = \frac{M'}{E.I'}$$

donc :

$$\boxed{\frac{d\varphi}{ds'} = \frac{M'}{E.I'}} \quad (8)$$

Cette relation est très importante pour les applications.

Loi de variation de σ_x dans une section déterminée (fig. 5).

La loi répond à la formule :

$$\sigma_x = \frac{1}{1 + z'/\rho'} \left[\frac{N}{\Omega} + \frac{M'.z'}{I'} \right] \quad (6)$$

En fonction de z' , cette loi est donc une hyperbole équilatère non rapportée à ses asymptotes :

$$\sigma_x = \infty \quad \text{pour} \quad 1 + \frac{z'}{\rho'} = 0 \quad \text{ou} \quad z' = -\rho'$$

Donc une des asymptotes est la droite passant par le centre de courbure C (as. I); il en résulte qu'il y a grand danger à créer un rayon de courbure intrados trop petit.

Comme :

$$z' = \frac{\rho'(N/\Omega - \sigma_x)}{\sigma_x - M'.\rho'/I'}$$

$$z' = +\infty \quad \text{pour} \quad \sigma_x = \frac{M'.\rho'}{I'}$$

La seconde asymptote (as. II) est donc la droite parallèle à l'axe de repère CG' située à la distance $M'.\rho'/I'$ de cet axe, du côté positif ou négatif suivant que M' est positif ou négatif.

Note: Dans le cas où $\frac{c'}{z'} = \frac{\rho'}{z'}$, donc $\frac{c'}{z'} = \frac{\rho'}{z'}$, donc ρ' est confondu avec z' .

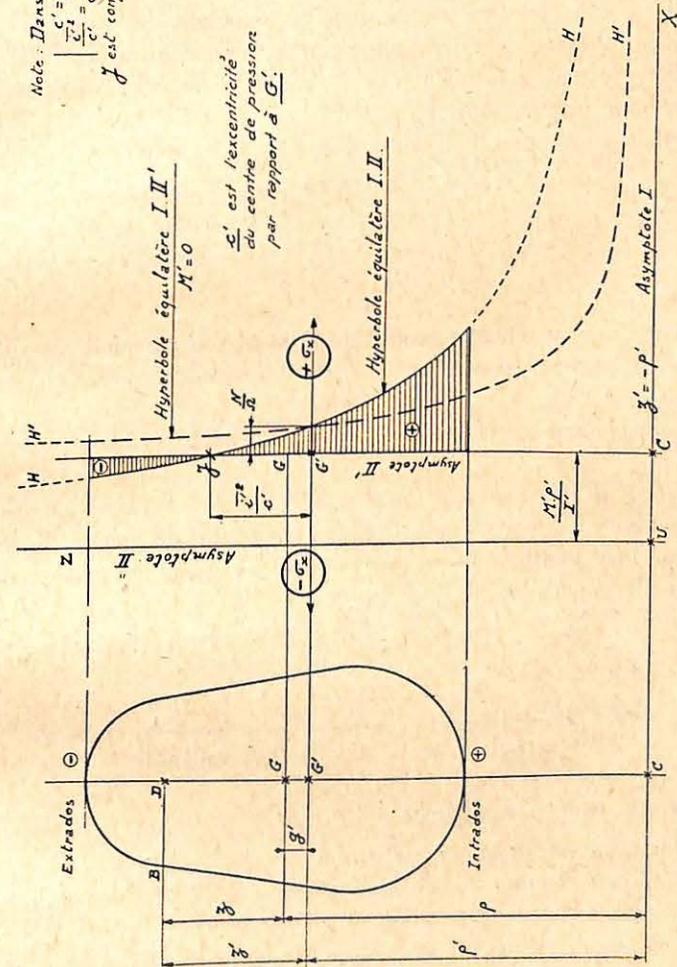


Fig. 5. — Variation de la tension σ_x dans une section déterminée.

Cette asymptote est confondue avec CG' si le moment M' est nul.

$$\text{D'autre part, pour } z' = 0 : \quad \sigma_x = \frac{N}{\Omega}$$

Elle a donc le signe de N ; donc, à l'aplomb du centre G' des sections transformées, la tension σ_x est la tension moyenne N/Ω .

Ceci confirme assurément que la méthode de calcul adoptée est la méthode la plus naturelle.

Quant à l'axe neutre, il correspond à $\sigma_x = 0$, donc à :

$$z' = -\frac{N}{\Omega} \cdot \frac{I'}{M'} = -\frac{(i')^2}{c'}$$

i' étant le rayon d'inertie central de la section transformée avec base de transformation passant par G' ; c' étant l'excentricité de la charge N par rapport à G' .

Le diagramme de σ_x est donc l'hyperbole HH .

Si $c' = \rho'$, c'est-à-dire si la charge N passe à l'aplomb du centre de courbure C , la tension à l'aplomb du centre de gravité G de la section non transformée est nulle; donc l'axe neutre passe par le centre de gravité G .

En effet, $M' = N \cdot \rho'$, donc pour $z' = -(\rho - \rho')$:

$$(\sigma_x)_G = \frac{1}{1 + z'/\rho'} \left[\frac{N}{\Omega} - \frac{M'(\rho - \rho')}{(\rho - \rho')\rho'\Omega} \right] = 0$$

Remarque relative aux signes :

Pour les applications, on ne perdra pas de vue que :

les z' sont comptés positifs ou négatifs suivant qu'ils sont du côté convexité ou concavité par rapport au centre G' ;

N est positif ou négatif suivant qu'il s'agit d'une traction ou d'une compression;

M' est positif ou négatif suivant que ce couple tend à fermer ou à ouvrir la pièce courbe, c'est-à-dire à augmenter ou à diminuer la courbure;

σ_x est positif ou négatif suivant que la tension est une traction ou une compression.

Donc pour un crochet de levage, pour le point intrados de la section contrôlée :

$$z' < 0, \quad N > 0, \quad M' < 0$$

6. — PIÈCES À FORTE COURBURE NON FLECHIES OU SOLLICITEES PAR TRACTION OU COMPRESSION SIMPLE.

On dit que la pièce est dans ce cas lorsqu'elle ne subit pas de déformation angulaire.

$$\text{Or :} \quad \frac{d\varphi}{ds'} = \frac{M'}{EI'}$$

Cela se présente donc lorsque $M' = 0$.

Ce cas se présente donc lorsque la force N passe par le centre de gravité G' des sections transformées.

Dans ce cas :

$$\sigma_x = \frac{1}{1 + z'/\rho'} \frac{N}{\Omega} \quad (7)$$

La loi de σ_x est alors une hyperbole équilatère HH' rapportée à ses asymptotes (fig. 5).

7. — EXPRESSIONS PARTICULIERES DE I' et ρ' .

Cas de la section circulaire (fig. 6).

$$\text{On a :} \quad \rho' = \frac{\Omega}{\int_0^\Omega \frac{d\Omega}{\rho + z}}$$

car :

$$\Omega' = \Omega \quad \text{et} \quad d\Omega' = \frac{d\Omega}{\rho+z}$$

$$z = a \cdot \sin \alpha, \quad dz = a \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha, \quad b = 2a \cdot \cos \alpha$$

$$\int_0^{\Omega} \frac{d\Omega}{\rho+z} = \int_{-a}^{+a} \frac{b \cdot dz}{\rho+z} = 2a^2 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\cos^2 \alpha \cdot d\alpha}{\rho+a \cdot \sin \alpha}$$

$$= 2a^2 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \left(\frac{\rho}{a^2} - \frac{1}{a} \sin \alpha + \frac{1}{a^2} \frac{a^2 - \rho^2}{\rho + a \cdot \sin \alpha} \right) d\alpha$$

$$= 2\pi\rho + 0 + \frac{2(a^2 - \rho^2)}{a} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{d\alpha}{\rho/a + \sin \alpha}$$

$$= 2\pi\rho + \frac{2(a^2 - \rho^2)}{a} \frac{\pi a}{\sqrt{\rho^2 - a^2}} = 2\pi(\rho - \sqrt{\rho^2 - a^2})$$

donc :

$$\rho' = \frac{a^2}{2(\rho - \sqrt{\rho^2 - a^2})} = \frac{\rho^2 - (\rho^2 - a^2)}{2(\rho - \sqrt{\rho^2 - a^2})}$$

$$\rho' = \frac{1}{2} (\rho + \sqrt{\rho^2 - a^2}) \quad (8)$$

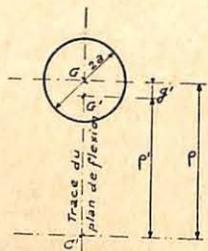


Fig. 6. — Section circulaire.

D'autre part :

$$I' = (\rho - \rho') \rho' \Omega = \frac{\pi \cdot a^4}{4} = I \quad (9)$$

Le cas de la section circulaire est par conséquent particulièrement simple.

Cas de la section elliptique (fig. 7).

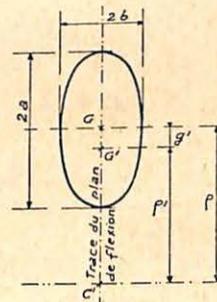


Fig. 7. — Section elliptique.

On considère la section elliptique obtenue par réduction des largeurs de la section circulaire.

On trouve ainsi aisément que :

$$\rho' = \frac{1}{2} (\rho + \sqrt{\rho^2 - a^2}) \quad (8')$$

tandis que :

$$I' = I = \frac{\pi \cdot a^3 \cdot b}{4} \quad (9')$$

Cas de la section rectangulaire (fig. 8) :

$$\rho' = \frac{\Omega}{\int_0^{\Omega} \frac{d\Omega}{\rho+z}}$$

$$\int_0^{\Omega} \frac{d\Omega}{\rho+z} = b \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{dz}{\rho+z} = b \cdot \log_e \left(\frac{\rho+h/2}{\rho-h/2} \right)$$

$$\rho' = \frac{h}{\log_e \left(\frac{\rho+h/2}{\rho-h/2} \right)}$$

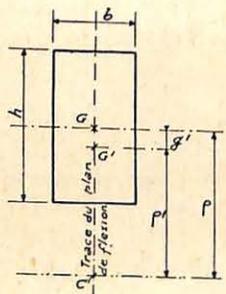


Fig. 8. — Section rectangulaire.

On peut utiliser la formule telle qu'elle, ou bien développer le dénominateur en série, en s'arrêtant aux premiers termes; on a alors :

$$\rho' = \rho \frac{1}{1 + \frac{1}{12} \left(\frac{h}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{80} \left(\frac{h}{\rho} \right)^4} \quad (8'')$$

et $I' = (\rho - \rho') \rho' \Omega$ devient :

$$I' = \frac{b \cdot h^3}{12} \left[1 - \frac{1}{60} \left(\frac{h}{\rho} \right)^2 - \frac{1}{420} \left(\frac{h}{\rho} \right)^4 \right] \quad (9'')$$

Cas de la section trapèze (fig. 9).

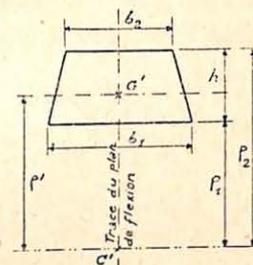


Fig. 9. — Section trapèze.

On trouve que :

$$\rho' = \frac{(b_1 + b_2) h^2}{2 \left[(b_1 \rho_2 - b_2 \rho_1) \log_e \frac{\rho_2}{\rho_1} + (b_1 - b_2) h \right]} \quad (10)$$

$$I' = \frac{\left\{ \left[(b_1 \frac{\rho_2}{h} - b_2 \frac{\rho_1}{h}) \log_e \frac{\rho_2}{\rho_1} + \frac{1}{2} (b_1 - b_2) \right] \frac{\rho_2}{h} \right\} (b_1 + b_2)^2 h^3 - \frac{1}{2} (b_1 + b_2)}{\left\{ 2 (b_1 \frac{\rho_2}{h} - b_2 \frac{\rho_1}{h}) \log_e \frac{\rho_2}{\rho_1} + (b_2 - b_1) \right\}^2} \quad (11)$$

avec :

$$\rho_2 = \rho_2 - h \frac{2b_1 + b_2}{3(b_1 + b_2)}$$

B. — APPLICATION DE LA METHODE BASEE SUR LA RESISTANCE DES MATERIAUX, A L'ETUDE D'UN MAILLON DE CHAINE ELLIPTIQUE OU CIRCULAIRE, SOLLICITE PAR DEUX FORCES EGALES ET DIAMETRALEMENT OPPOSEES

8. — a) EQUATIONS DE DEPART DANS LE CAS GENERAL.

La sollicitation étant symétrique par rapport aux axes de symétrie de l'anneau, il suffit d'étudier le quart de celui-ci.

Comme le maillon est une pièce à forte courbure relative, tous les raisonnements se font sur la fibre moyenne passant par le centre de gravité G' des sections transformées et non pas sur la fibre moyenne passant par le centre de gravité G des sections primitives. Par suite, toutes les cotes sont à prendre comme cotes accentuées (fig. 10).

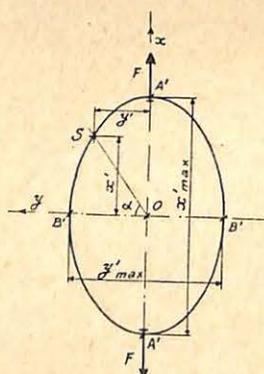
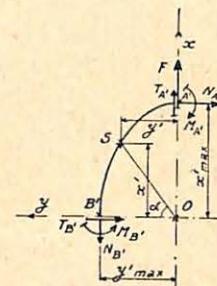


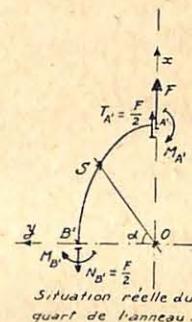
Fig. 10. — Forme générale du maillon.

Nous dégageons le quart A'B' de l'anneau (fig. 11 et 12).



Dans cette figure on a attribué aux éléments $N'_A, T'_A, M'_A, N'_B, T'_B, M'_B$ le signe positif, suivant les conventions posées. La résolution du problème doit les confirmer ou les infirmer.

Fig. 11.



Situation réelle du quart de l'anneau.

Fig. 12.

Il est évident que, par raison de symétrie :

$$T'_B = 0 \quad \text{et} \quad T'_A = \frac{F}{2} \quad (12)$$

Les équations d'équilibre de translation et de rotation du quart de l'anneau donnent donc :

a) Translation dans la direction OB' :

$$N'_A = 0 \quad (13)$$

b) Translation dans la direction OA' :

$$N'_B = \frac{F}{2} \quad (14)$$

c) Rotation autour du point A' :

$$M'_A - M'_B - N'_B \cdot y'_{\max.} = 0 \quad (15)$$

De ces deux équations, nous tirons la valeur de M'_B :

$$M'_B = M'_A - N'_B \cdot y'_{\max.} = M'_A - \frac{F}{2} y'_{\max.} \quad (16)$$

Puisque, en la section B' , il n'y a pas d'effort tranchant, mais seulement un effort longitudinal et un moment fléchissant, nous pouvons considérer cette section B' comme sollicitée uniquement, ainsi que le montre la figure 14, par un effort longitudinal :

$$N'_B = \frac{F}{2}$$

excentré d'une quantité c' telle que :

$$c' = \frac{M'_B}{N'_B} \quad (17)$$

Nous pouvons dès lors considérer, à cause de la double symétrie, qu'il n'y a qu'une seule inconnue hyperstatique dans le problème, le moment M'_A .

Pour calculer la variable hyperstatique M'_A , nous disposons de l'équation de déformation qui exprime que, par raison de symétrie, les deux sections, en A' et en B' , ne tournent pas l'une par rapport à l'autre.

Il vient alors, d'après la formule de Bresse :

$$\int_{B'}^{A'} \frac{M'}{E.I'} ds' = 0 \quad (18)$$

La figure 15 montre qu'au point courant S' :

$$M' = M'_A - \frac{F}{2} \cdot y' \quad (19)$$

Donc, la formule de Bresse donne :

$$\int_{B'}^{A'} \frac{M'_A - \frac{F}{2} \cdot y'}{E.I'} ds' = 0 \quad (20)$$

ou encore :

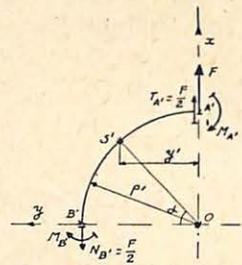
$$M'_A = \frac{F}{2} \frac{\int_{B'}^{A'} \frac{y' \cdot ds'}{I'}}{\int_{B'}^{A'} \frac{ds'}{I'}} \quad (21)$$

9. - b) CAS PARTICULIER DE L'ANNEAU CIRCULAIRE A SECTION TRANSVERSALE CIRCULAIRE CONSTANTE (ANNEAU ROND, SECTION RONDE).

1°) Etude des moments fléchissants.

Dans ce cas (fig. 15) :

$$ds' = \rho' \cdot d\alpha \quad y' = \rho' \cdot \cos \alpha$$



Situation réelle du quart de l'anneau rond.

Fig. 13.

L'équation (21) devient :

$$M'_A = \frac{F}{2} \cdot \rho' \frac{\int_0^{\pi/2} \cos \alpha \cdot da}{\int_0^{\pi/2} da}$$

Effectuant les intégrations, nous obtenons :

$$M'_A = \frac{F}{2} \cdot \rho' \cdot \frac{2}{\pi} = 0,318 \cdot F \cdot \rho' \quad (22)$$

donc :

$$M'_B = M'_A - \frac{F}{2} \cdot \rho' = -\frac{F}{2} \cdot \rho' \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) = -0,182 \cdot F \cdot \rho' \quad (23)$$

Ces relations montrent que, dans le cas d'un anneau sollicité dans son ensemble par traction, M'_A est essentiellement positif et M'_B essentiellement négatif.

En valeur absolue, le plus grand des deux moments est le moment M'_A , aux endroits de l'application des forces extérieures F .

Dans le maillon rond de section ronde, le rayon ρ' au centre de gravité G' de la section transformée est liée au rayon au centre de gravité de la section primitive par la formule :

$$\rho' = \rho \frac{1 + \sqrt{1 - (a/\rho)^2}}{2} \quad (24)$$

voir équat. (8)

a désignant le rayon de la section transversale du tore.

Comme nous l'avons dit précédemment, le couple M'_B peut être considéré comme produit par l'excentrement c' de la force :

$$N'_B = \frac{F}{2}$$

$$c' = \frac{M'_B}{N'_B} = -\rho' \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) = -0,364 \cdot \rho' \quad (25)$$

Le signe moins indique que la ligne d'action en B' est vers l'intrados.

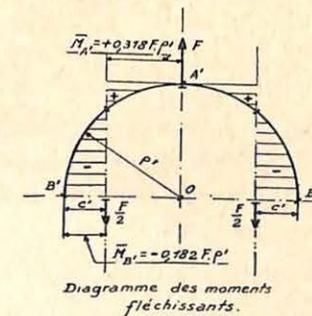


Diagramme des moments fléchissants.

Fig. 14.

Le demi-anneau peut donc être considéré sollicité comme le représente la figure 14, dans laquelle le diagramme hachuré n'est autre que le diagramme des moments fléchissants.

2°) Diagramme des tensions normales circonférentielles aux diverses sections transversales de l'anneau.

La formule de la résistance des matériaux des pièces à forte courbure relatives sollicitées par flexion plane composée est :

$$\sigma_x \text{ ou } \sigma_a = \frac{1}{1 + z'/\rho'} \left[\frac{N}{\Omega} + \frac{M'.z'}{I'} \right]$$

Ici :

$$M' = \frac{F}{2} \cdot \rho' \left(\frac{2}{\pi} - \cos \alpha \right)$$

$$N = \frac{F}{2} \cdot \cos \alpha$$

donc :

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \frac{F}{\Omega} \frac{1}{1 + z'/\rho'} \frac{2}{\pi \cdot n'} \left[+ \rho' + \frac{\pi}{2} \cos \alpha (n' - \rho') \right] \quad (26)$$

en posant :

$$n' = \frac{I'}{\Omega \cdot z'}$$

Pour une fibre déterminée de l'anneau, c'est-à-dire un z' déterminé, le facteur devant le crochet est une constante. Il suffit donc d'étudier la variation de l'expression contenue dans le crochet.

a) Pour les fibres intrados (fig. 15).

Cette équation montre que le diagramme du σ_a pour $z' =$ constante peut être obtenu d'une manière particulièrement simple.

Portons sur le diamètre de l'anneau et à partir du centre une longueur égale à :

$$OB'' = -\frac{\pi}{2} (n' - \rho')$$

puisque $z' < 0$, $n' < 0$, donc à fortiori $n' - \rho' < 0$. Pour trouver la tension σ_a en la section S' , projetons la longueur OB'' sur le rayon de S' . Nous obtenons la longueur :

$$OS'' = -\frac{\pi}{2} (n' - \rho') \cos \alpha$$

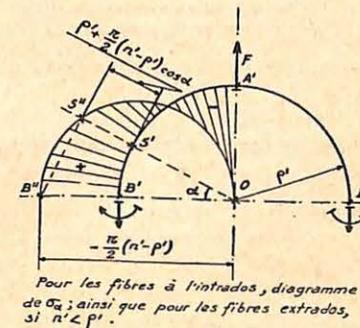


Fig. 15. — Diagramme polaire des tensions σ_a intrados.

La longueur :

$$S'S'' = \rho' + \frac{\pi}{2} \cos \alpha (n' - \rho')$$

Elle représente donc la tension cherchée.

La circonférence de rayon OB'' , lue par rapport à la circonférence du centre G' des sections de l'anneau, constitue donc le diagramme polaire de la tension σ_a à l'intrados.

b) Pour les fibres côtés extrados (fig. 16).

Ici, $z' > 0$, $n' > 0$. Il y aura donc trois cas à considérer :

α) $n' < \rho'$, la construction précédente s'applique intégralement;

β) $n' > \rho'$, puisque dans ce cas $n' - \rho' > 0$, la circonférence de diamètre OB'' est à porter de l'autre côté de l'axe vertical de symétrie et la construction est celle indiquée par la figure 16. La tension σ_a en la section S' sera représentée par la longueur $S'S''$;

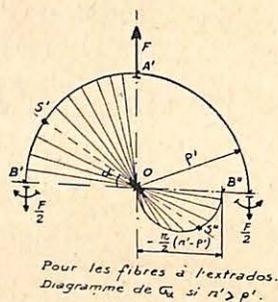


Fig. 16. - Diagramme polaire des tensions σ_a extrados.

$\gamma)$ $n' = \rho'$, la tension est constante en toute section :

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \frac{F}{\Omega} \frac{1}{1+z'/\rho'} \frac{r}{\pi \cdot n'} \rho'$$

c) Pour la fibre moyenne (fig. 17).

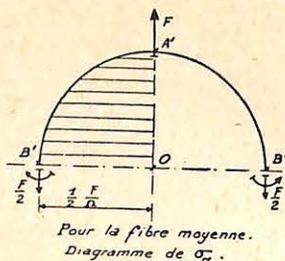


Fig. 17. - Diagramme des tensions σ_a pour la fibre moyenne.

$$z' = 0, \quad n' = \infty$$

et la formule (26) n'est plus valable, car on a mis $1/n'$ en évidence, c'est-à-dire divisé par zéro. En remontant avant ce stade, il vient :

$$(\sigma_a)_{\text{fibre moyenne}} = \frac{1}{2} \frac{F}{\Omega} \cos \alpha$$

Le diagramme de variation de la tension normale le long de la fibre moyenne, est donc donné simplement par la circonférence de

$$\text{diamètre } \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{\Omega} \text{ lue par rapport à l'axe vertical.}$$

3°) Etude des déformations.

Les seules déformations que l'on utilise ici sont en général les variations de longueur des diamètres A'A' et B'B' de l'anneau.

Nous nous bornons à calculer ces deux variations; nous appelons f_A la variation du diamètre A'A' et f_B la variation du diamètre B'B'. Pour calculer ces variations, que nous appelons les flèches diamétrales, nous appliquons le théorème de Castigliano ([8], chapitre VI).

Calcul de f_A , variation du diamètre suivant lequel sont appliquées les charges F.

D'après le théorème de Castigliano, ce déplacement est la dérivée du travail élastique de déformation, par rapport à la charge F :

$$f_A = \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial F}$$

le point d'application de l'une des charges F étant considéré comme fixe, celui de l'autre charge F subissant alors le déplacement f_A .

Or, le travail élastique total de l'anneau a pour expression ([5], n° 162, page 271, et n° 163, page 273) :

$$\mathcal{C} = \frac{4}{2E \cdot I'} \left\{ \int_0^{\pi/2} M^2 \cdot ds' + \right. \\ \left. + \frac{I'}{\Omega'} \left(\int_0^{\pi/2} N^2 \cdot ds' + \xi \cdot \frac{E}{G} \cdot \int_0^{\pi/2} T^2 \cdot ds' \right) \right\}$$

D'où :

$$f_A = \frac{4}{E.I'} \left\{ \int_0^{\pi/2} M' \cdot \frac{\partial M'}{\partial F} \cdot ds' + \right. \\ \left. + \frac{I'}{\Omega'} \left(\int_0^{\pi/2} N \cdot \frac{\partial N}{\partial F} \cdot ds' + \xi \cdot \frac{E}{G} \cdot \int_0^{\pi/2} T \cdot \frac{\partial T}{\partial F} \cdot ds' \right) \right\}$$

Mais :

$$ds' = \rho' \cdot d\alpha$$

$$M' = \frac{1}{2} F \cdot \rho' \left(\frac{2}{\pi} - \cos \alpha \right)$$

$$N = \frac{F}{2} \cos \alpha \qquad T = \frac{F}{2} \sin \alpha$$

donc :

$$\frac{\partial M'}{\partial F} = \frac{1}{2} \rho' \left(\frac{2}{\pi} - \cos \alpha \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial F} = \frac{1}{2} \cos \alpha \qquad \frac{\partial T}{\partial F} = \frac{1}{2} \sin \alpha$$

De tout cela, il résulte que :

$$f_A = \frac{4}{E.I'} \cdot \frac{F}{4} \cdot \rho'^3 \left\{ \int_0^{\pi/2} \left(\frac{2}{\pi} - \cos \alpha \right)^2 d\alpha \right. \\ \left. + \frac{I'}{\Omega'} \cdot \frac{1}{\rho'^2} \left\{ \int_0^{\pi/2} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha \right. \right. \\ \left. \left. + \xi \cdot \frac{E}{G} \cdot \int_0^{\pi/2} \sin^2 \alpha \cdot d\alpha \right\} \right\} \quad (27)$$

Nous en déduisons successivement :

$$f_A = \frac{F}{E.I'} \cdot \rho'^3 \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \times \frac{\pi}{2} + \left(\frac{1}{4} \sin 2\alpha + \frac{\alpha}{2} \right) \frac{\pi/2}{0} \\ & - \frac{4}{\pi} (-\sin \alpha) \frac{\pi/2}{0} \\ & + \frac{I'}{\Omega'} \cdot \frac{1}{\rho'^2} \left\{ \left(\frac{1}{4} \sin 2\alpha + \frac{\alpha}{2} \right) \frac{\pi/2}{0} \right. \\ & \left. + \xi \cdot \frac{E}{G} \left(-\frac{1}{4} \sin 2\alpha + \frac{\alpha}{2} \right) \frac{\pi/2}{0} \right\} \end{aligned} \right\}$$

$$f_A = \frac{F}{E.I'} \cdot \rho'^3 \left[\left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) + \frac{I'}{\Omega' \cdot \rho'^2} \left(1 + \xi \cdot \frac{E}{G} \right) \frac{\pi}{4} \right]$$

$$f_A = \underbrace{0,149 \cdot \frac{F}{E.I'} \cdot \rho'^3}_{\text{terme dû aux } M'} + \underbrace{\frac{\pi}{4} \left(1 + \xi \cdot \frac{E}{G} \right) \frac{F}{E \cdot \Omega'}}_{\text{termes dus aux } N \text{ et } T} \cdot \rho' \quad (28)$$

Le premier terme de l'expression (28) correspond aux effets des moments fléchissants sur la déformation, il est de loin prépondérant par rapport au deuxième terme; aussi la plupart des auteurs se bornent-ils à donner ce premier terme. Voir notamment les auteurs suivants qui établissent cette expression par d'autres voies :

[1] Hans LORENZ : § 28, pages 289 et 290.

[2] Arthur MORLEY : § 155, pages 393 et 384.

[5] S. TIMOSHENKO and J. M. LESSELS : § 58, pages 233 et 254.

Calcul de f_B , variation du diamètre transversal aux charges.

Comme il n'y a pas de force extérieure appliquée aux points B' dont on cherche le déplacement relatif f_B , pour pouvoir utiliser le théorème de Castigliano, nous plaçons en ces endroits une force auxiliaire H, nous calculons la dérivée $\partial \mathcal{C} / \partial H$, le déplacement f_B cherché sera la valeur de cette dérivée pour $H = 0$ ([7], n° 166, page 277).

Si l'on appelle M_H , N_H , T_H les moments, efforts normaux, efforts tranchants dus à cette force auxiliaire H, le travail élastique produit par les deux forces F et les deux forces H est :

$$\mathcal{C} \text{ dû aux F et aux H} = \frac{4}{2E.I'} \left\{ \begin{array}{l} \int_0^{\pi/2} (M + M_H)^2 \cdot ds' \\ + \frac{I'}{\Omega'} \cdot \int_0^{\pi/2} (N + N_H)^2 \cdot ds' \\ + \xi \cdot \frac{E}{G} \cdot \frac{I'}{\Omega'} \cdot \int_0^{\pi/2} (T + T_H)^2 \cdot ds' \end{array} \right\}$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial H} = \frac{4}{E.I'} \left\{ \begin{array}{l} \int_0^{\pi/2} (M + M_H) \cdot \frac{\partial M_H}{\partial H} \cdot ds' \\ + \frac{I'}{\Omega'} \cdot \int_0^{\pi/2} (N + N_H) \cdot \frac{\partial N_H}{\partial H} \cdot ds' \\ + \xi \cdot \frac{E}{G} \cdot \frac{I'}{\Omega'} \cdot \int_0^{\pi/2} (T + T_H) \cdot \frac{\partial T_H}{\partial H} \cdot ds' \end{array} \right\}$$

Or, pour $H = 0$:

$$M_H = N_H = T_H = 0$$

Donc :

$$f_B = \frac{4}{E.I'} \left\{ \begin{array}{l} \int_0^{\pi/2} M \cdot \frac{\partial M_H}{\partial H} \cdot ds' \\ + \frac{I'}{\Omega'} \cdot \int_0^{\pi/2} N \cdot \frac{\partial N_H}{\partial H} \cdot ds' \\ + \xi \cdot \frac{E}{G} \cdot \frac{I'}{\Omega'} \cdot \int_0^{\pi/2} T \cdot \frac{\partial T_H}{\partial H} \cdot ds' \end{array} \right\} \quad (29)$$

Mais :

$$M' = \frac{1}{2} F \cdot \rho' \left(\frac{2}{\pi} - \cos \alpha \right) \quad M_H = \frac{1}{2} H \cdot \rho' \left(\frac{2}{\pi} - \sin \alpha \right)$$

$$N = \frac{F}{2} \cos \alpha \quad N_H = \frac{H}{2} \sin \alpha$$

$$T = \frac{F}{2} \sin \alpha \quad T_H = -\frac{H}{2} \cos \alpha$$

$$\frac{\partial M_H}{\partial H} = \frac{1}{2} \rho' \left(\frac{2}{\pi} - \sin \alpha \right)$$

$$\frac{\partial N_H}{\partial H} = \frac{1}{2} \sin \alpha$$

$$\frac{\partial T_H}{\partial H} = -\frac{1}{2} \cos \alpha$$

En introduisant ces valeurs dans (29) :

$$f_B = \frac{4}{E.I'} \cdot \frac{F}{4} \rho^3 \left\{ \int_0^{\pi/2} \left(\frac{2}{\pi} - \cos \alpha \right) \left(\frac{2}{\pi} - \sin \alpha \right) d\alpha \right. \\ \left. + \frac{I'}{\Omega'} \cdot \frac{1}{\rho^2} \left(1 - \xi \cdot \frac{E}{G} \right) \times \right. \\ \left. \times \int_0^{\pi/2} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \right\}$$

$$f_B = \frac{F}{E.I'} \cdot \rho^3 \left\{ \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{2}{\pi} \cdot (\cos \alpha) \Big|_0^{\pi/2} - \frac{2}{\pi} (\sin \alpha) \Big|_0^{\pi/2} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{I'}{\Omega'} \cdot \frac{1}{\rho^2} \left(1 - \xi \cdot \frac{E}{G} \right) \right\}$$

$$f_B = \frac{F}{E.I'} \cdot \rho^3 \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \right) + \frac{1}{2} \frac{I'}{\Omega' \cdot \rho^2} \left(1 - \xi \cdot \frac{E}{G} \right) \right]$$

$$f_B = \underbrace{-0,136.6. \frac{F}{E.I'} \cdot \rho^3}_{\text{terme dû aux M}} + \underbrace{\frac{1}{2} \left(1 - \xi \cdot \frac{E}{G} \right) \frac{F}{E.\Omega'} \cdot \rho^3}_{\text{termes dus aux N et T}}$$

(50) (1)

(1) Même remarque que pour l'équation (28).

C. — ETUDE DE L'ANNEAU CIRCULAIRE DE SECTION TRANSVERSALE RECTANGULAIRE PAR LA THEORIE DE L'ELASTICITE

10. — INTRODUCTION.

Nous ne développons pas tous les calculs de la méthode et nous indiquons seulement l'allure générale.

Nous insistons surtout sur le résultat pratique à tirer de cette étude de l'anneau par la théorie de l'élasticité. Le résultat le plus important, au point de vue technique, consiste dans les formules exactes des tensions normales circonférentielles agissant à l'intrados et à l'extrados de l'anneau, sauf aux points mêmes d'application des charges. Ces études sont conduites en considérant que l'anneau est dans un état plan de tension.

Les raisonnements sont établis en considérant un anneau ayant l'unité de longueur comme épaisseur dans la direction normale au plan moyen de l'anneau.

La théorie de l'élasticité ne fait aucune des hypothèses qui se trouvent à la base de la théorie ordinaire exposée précédemment. Elle prend la pièce telle qu'elle est. C'est-à-dire :

- a) elle ne suppose pas que la pièce peut être considérée comme pièce longue;
- b) elle ne néglige pas les déformations radiales;
- c) elle ne fait aucune hypothèse au sujet de ce que deviennent les sections transversales et planes.

Ouvrages à consulter.

Pour cette étude par la théorie de l'élasticité, voir parmi les ouvrages cités à la bibliographie :

- [1] Hans LORENZ :
chap. VIII : Der ebene Spannungszustand;
§ 55 : Ungleichförmige Belastung.
- [4] Louis N. G. FILON : toute la brochure.
- [8] Louis BAES : § 157 : Expression générale de la fonction d'Airy en coordonnées polaires.

[9] F. G. COKER and L. N. G. FILON :

§ 4.31 : Equilibrium of a continuous circular ring under given edge stresses;

§ 4.32 : Force and couple resultant at a cross section of a circular ring;

§ 4.35 : Experimental verification of stresses in a circular ring : comparaison with a solution for two half-rings.

[13] S. TIMOSHENKO :

§ 35 : Solution générale des problèmes à deux dimensions en coordonnées polaires;

§ 36 : Application de la solution générale en coordonnées polaires.

[15] Maurice BRICAS : chap. XVIII : Anneaux concentriques, disques infinis percés d'un trou circulaire.

11. — GENERALITES.

Le problème est logiquement traité en coordonnées polaires. Le point de départ de MM. Filon et Coker est l'expression générale trigonométrique de la fonction d'Airy relative à l'anneau circulaire, valable quel que soit l'état de sollicitation. Cette méthode est une méthode directe. M. Bricas n'utilise pas la fonction d'Airy, mais procède par une méthode inverse qui consiste à se donner des solutions et à constater les sollicitations qui y correspondent.

Ayant la fonction d'Airy \mathcal{A} les tensions s'en déduisent directement par les relations :

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \mathcal{A}}{\partial \alpha^2}$$

$$\sigma_a = \frac{\partial^2 \mathcal{A}}{\partial r^2}$$

(fig. 18)

$$\tau_{ra} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial \alpha} \right)$$

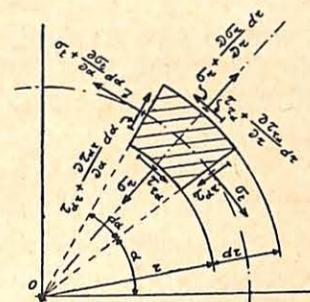


Fig. 18. — Equilibre d'un élément en coordonnées polaires.

La sollicitation extérieure, le long du contour, est définie par une fonction développée en série de Fourier.

L'expression générale de la fonction d'Airy contient des constantes qui seront déterminées par les conditions au contour relatives à l'état particulier de sollicitation considéré. Ces conditions sont tout à fait simples dans le cas étudié, puisqu'il n'y a que deux forces radiales F . Cette détermination se fait en identifiant les termes de même ordre, pris, d'une part, dans les expressions des tensions au contour déduites de la fonction d'Airy et, d'autre part, dans les expressions de la sollicitation extérieure le long de ce contour, développée en série de Fourier.

A ces relations d'identité viennent évidemment se joindre les trois équations d'équilibre statique de l'anneau.

Remarque. — Quand on effectue le calcul des coefficients, on constate que seuls ceux du premier ordre dépendent du rapport des constantes élastiques.

Ce fait conduit au résultat important suivant : la solution est indépendante des constantes élastiques pour autant que la résultante des forces extérieures agissant sur un des contours soit nulle, car alors les termes du premier ordre tombent. (La résultante est également nulle sur l'autre contour en vertu de l'équilibre statique de l'anneau.) Or, le problème de l'anneau que nous étudions est précisément dans ce cas.

Ce fait est très utile pour les études de photo-élasticité, car les résultats obtenus dans ces conditions au banc photo-élastique sur les matières transparentes restent applicables à toutes les autres matières isotropes, dans les limites de l'élasticité.

12. — CAS DE L'ANNEAU CIRCULAIRE, SOLLICITE PAR DEUX FORCES DIAMETRALEMENT OPPOSEES LE SOUMETTANT DANS SON ENSEMBLE A TRACTION.

1°) Calcul des tensions, formules générales.

L'étude de M. Filon [4] n'explicité les coefficients des formules donnant les tensions que dans le cas faisant l'objet de la présente note, où l'anneau est sollicité par deux charges diamétralement opposées appliquées à l'intrados.

Voici les expressions des tensions en tout point de l'anneau (fig. 18) :

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{A_0}{r^2} + 2C_0 + \sum_2^{\infty} [-n(n-1)r^{n-2}A_n - (n+1)(n-2)r^n B_n \\ &\quad - n(n+1)r^{-n-2}C_n - (n-1)(n+2)r^{-n}D_n]. \cos n\alpha \\ \sigma_a &= -\frac{A_0}{r^2} + 2C_0 + \sum_2^{\infty} [n(n-1)r^{n-2}A_n + (n+1)(n+2)r^n B_n \\ &\quad + n(n+1)r^{-n-2}C_n + (n-1)(n-2)r^{-n}D_n]. \cos n\alpha \\ \tau_{ra} &= \sum_2^{\infty} [n(n-1)r^{n-2}A_n + n(n+1)r^n B_n - n(n+1)r^{-n-2}C_n \\ &\quad - n(n-1)r^{-n}D_n]. \sin n\alpha \end{aligned} \quad (51)$$

si

$$A_0 = -\frac{r_e^2 r_1}{\pi(r_e^2 - r_1^2)} F \quad C_0 = \frac{r_1}{2\pi(r_e^2 - r_1^2)} F$$

et pour $n \geq 2$, et ayant des valeurs paires seulement.

Avec :

$$\begin{aligned} A_n &= f_n r_e^{-n+2} \lambda^n \frac{n(1-\lambda^2) + \lambda^2(1-\lambda^{2n})}{2(n-1) Q_n} \\ B_n &= -f_n r_e^{-n} \lambda^n \frac{n(1-\lambda^2) + (1-\lambda^{2n})}{2(n+1) Q_n} \\ C_n &= f_n r_e^{n+2} \lambda^n \frac{n(1-\lambda^2)\lambda^{2n} + \lambda^2(1-\lambda^{2n})}{2(n+1) Q_n} \\ D_n &= -f_n r_e^n \lambda^n \frac{n(1-\lambda^2)\lambda^{2n} + (1-\lambda^{2n})}{2(n-1) Q_n} \\ Q_n &= (1-\lambda^{2n})^2 - n^2 \lambda^{2n-2} (1-\lambda^2)^2 \\ f_n &= (-1)^{(n/2)-1} \frac{2F}{\pi r_1} \\ \lambda &= \frac{r_1}{r_e} \end{aligned} \quad (52)$$

Le problème est ainsi complètement résolu non seulement le long des contours extérieurs, mais aussi en plein anneau.

Toutefois, les calculs nécessaires pour traiter numériquement un cas déterminé sont fort longs, car certains coefficients dépendent de séries très lentement convergentes.

13. — RELATIONS DIRECTEMENT UTILES AU POINT DE VUE TECHNIQUE.

L'étude de l'anneau par la résistance des matériaux a fait apparaître que les deux sections AA, BB sont les seules dont l'étude importe au point de vue sécurité. Ce fait reste valable pour la méthode basée sur la théorie de l'élasticité.

Dans chacune de ces sections, il importe avant tout de connaître la valeur des tensions normales (tensions appelées ici tensions normales circonférentielles) aux bords intrados et extrados.

Les formules sont, pour ces endroits-là, très sensiblement simplifiées; elles prennent la forme suivante :

Tensions normales circonférentielles aux limites extrados et intrados de la section AA' :

$$(\sigma^A)_{\text{extrados}} = \frac{F}{r_{1.e}} \left\{ \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{1-\lambda^2} + \frac{4}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{n \cdot (1-\lambda^2) \cdot (1-\lambda^{2n}) \cdot \lambda^n}{(1-\lambda^{2n})^2 - n^2 \cdot \lambda^{2n-2} (1-\lambda^2)^2} \right\} \quad (33)$$

$$(\sigma^A)_{\text{intrados}} = \frac{F}{r_{1.e}} \left\{ \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1+\lambda^2}{1-\lambda^2} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{2 \cdot (1-\lambda^{2n})^2}{(1-\lambda^{2n})^2 - n^2 \cdot \lambda^{2n-2} (1-\lambda^2)^2} - 1 \right) \right\} \quad (34)$$

Tensions normales circonférentielles aux limites extrados et intrados de la section BB' :

$$(\sigma^B)_{\text{extrados}} = \frac{F}{r_{1.e}} \left\{ \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{1-\lambda^2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{(n/2)-1} \frac{n \cdot (1-\lambda^2) \cdot (1-\lambda^{2n}) \cdot \lambda^n}{(1-\lambda^{2n})^2 - n^2 \cdot \lambda^{2n-2} (1-\lambda^2)^2} \right\} \quad (35)$$

$$(\sigma^B)_{\text{intrados}} = \frac{F}{r_{1.e}} \left\{ \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1+\lambda^2}{1-\lambda^2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{(n/2)-1} \left(\frac{2 \cdot (1-\lambda^{2n})^2}{(1-\lambda^{2n})^2 - n^2 \cdot \lambda^{2n-2} (1-\lambda^2)^2} - 1 \right) \right\} \quad (36)$$

Dans ces formules, $\lambda = r_i/r_e$, et n prend toutes les valeurs paires seulement.

Ces expressions comportent encore des séries, mais ces séries sont assez rapidement convergentes pour les cas de gros anneaux ($\lambda = r_i/r_e \leq 0,60$, ou $\rho/h \leq 2$). Or, ce sont justement ces cas-là où elles sont utiles, car pour les anneaux minces, la théorie de la résistance des matériaux suffit amplement pour les problèmes courants; quoique si l'on veut connaître les choses avec exactitude pour un anneau mince, il faille employer ces formules-ci.

On peut, pour les gros anneaux, se limiter aux termes pour lesquels $n = 2, 4, 6, 8$, et parfois 10; le calcul est alors assez rapide (1). Les termes des séries contenues dans les formules (33) et (36) sont alternativement positifs et négatifs.

14. — CALCUL DU MOMENT FLECHISSANT M_A .

Il est curieux et utile de constater que l'expression du moment fléchissant sollicitant l'anneau dans les sections AA est particulièrement simple. La comparaison de cette expression et de celle donnée par la résistance des matériaux (formule 22) est évidemment un élément intéressant de la confrontation des deux méthodes.

La connaissance du moment M_A , d'ailleurs égal à M'_A puisque $N_A = 0$, fixe du même coup la connaissance des M, N, T dans tout l'anneau. Puisque la résultante $N_A = 0$ pour la section AA, le moment résultant autour du centre de l'anneau de toutes les tensions normales sollicitant cette section est égal au moment fléchissant.

(1) En procédant ainsi, nous avons retrouvé très sensiblement les valeurs indiquées par MM. Coker et Filon à la page 385 de leur ouvrage [9], pour le cas où :

$$\lambda = \frac{r_i}{r_e} = 0,50.$$

On obtient donc en partant de la première formule (31) :

$$M_A = \frac{F \cdot r_1}{\pi} \left(\frac{1}{2} - \frac{\log_e \lambda}{1 - \lambda^2} \right) \quad (37)$$

avec :

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e}$$

Cette expression est aussi, pour toute section transversale de l'anneau, le moment résultant par rapport au centre de l'anneau, de toutes les tensions normales agissant à travers la section, mais n'est plus le moment fléchissant relatif à cette section.

Mais celui-ci a pour expression :

$$(M_G)_\alpha = M_A - \frac{F}{2} \cdot \rho \cdot \cos \alpha \quad (37bis)$$

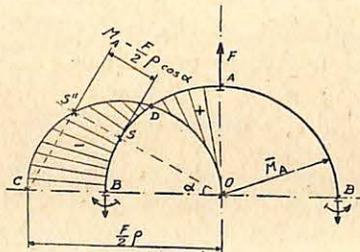


Fig. 19. — Diagramme polaire du moment fléchissant.

de sorte que le diagramme polaire du moment fléchissant est la circonférence OC de diamètre $F/2 \cdot \rho$ lue par rapport à la circonférence moyenne AB de l'anneau (fig. 19), dont le rayon serait supposé représenter M_A .

En développant le logarithme en série de $1 - \lambda$ jusque $(1 - \lambda^2)^2$ inclusivement et en désignant par r_h la moyenne harmonique des rayons intrados et extrados, on a une expression suffisamment approchée :

$$M_A = \frac{F}{\pi} \cdot r_h$$

La théorie ordinaire par la résistance des matériaux donne :

$$M_A = M'_A = \frac{F}{\pi} \cdot \rho' \quad (22)$$

ou

$$M_A = \frac{F}{\pi} \cdot \rho \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{12} \left(\frac{h}{\rho}\right)^2 + \frac{1}{80} \left(\frac{h}{\rho}\right)^4}$$

pour une section rectangulaire (formule 8'').

Ceci fait apparaître que les valeurs des moments fléchissants sollicitant les sections radiales de l'anneau diffèrent en général peu l'une de l'autre suivant que le calcul est mené par la résistance des matériaux ou par la théorie de l'élasticité. En effet, le tableau suivant donne le rapport entre le moment M_A calculé par la théorie de l'élasticité et celui obtenu par la résistance des matériaux :

pour $\lambda = \frac{r_1}{r_e}$	M_A (élasticité)
	M_A (résistance des matériaux)
0,1	0,5138
0,2	0,7255
0,3	0,8414
0,4	0,9090
0,5	0,9495
0,6	0,9736
0,7	0,9877
0,8	0,9954
0,9	0,9990
1,0	1,0000

(anneau infiniment mince)

Les rapports entre les tensions aux bords de l'anneau, calculées par la théorie de l'élasticité, et les tensions correspondantes calculées par la résistance des matériaux, sont du même ordre. On voit donc que

dans les cas habituels, allant même jusqu'à $\lambda = r_1/r_e = 0,60$, les deux méthodes de calcul donnent des résultats peu différents.

Mais on voit que dès que $\lambda = r_1/r_e < 0,50$, les deux méthodes de calcul donnent des résultats différant sensiblement; la résistance des matériaux ordinaire donne pour la section AA des moments fléchissants trop grands, et inversement pour la section BB des moments fléchissants trop petits.

Dans les cas de faible valeur de $\lambda = r_1/r_e$, la méthode par la théorie de l'élasticité s'impose.

Remarque très importante.

Il est essentiel de remarquer que la tension circonférentielle maximum de traction se produit à des endroits différents suivant que l'anneau est relativement mince ou qu'il est relativement épais.

Pour un anneau mince tel que $\lambda = r_1/r_e \approx 0,60$, elle a lieu à l'extrados de la section AA située à l'aplomb de la charge.

Pour un anneau épais tel que $\lambda = r_1/r_e \leq 0,60$, elle a lieu à l'intrados de la section BB, transversale aux charges.

C'est là un fait qu'il ne faut jamais perdre de vue.

15. — La relation (37bis) permet de calculer quelle est la position théorique du point d'inflexion de l'anneau pour les diverses valeurs du rapport λ .

Quand $\lambda = 1$ (anneau infiniment mince), le point d'inflexion, donc de moment nul, se trouve à un angle polaire α tel que $\cos \alpha = 0,656$ ($\alpha = 50^{\circ}51'$).

Ceci est exactement la position obtenue par la théorie de la résistance des matériaux pour ce point.

Quand $\lambda = 0$, ce point d'inflexion se trouve à l'angle polaire $\alpha = \pi/2$, c'est-à-dire à l'aplomb de la charge; autrement dit, il n'existe plus.

Au fur et à mesure que l'épaisseur de l'anneau croît, ce point d'inflexion se rapproche de la charge.

16. — EXEMPLE D'APPLICATION DES FORMULES DONNÉES PAR LA THÉORIE DE L'ÉLASTICITÉ.

Appliquons les formules (33), (34), (35), (36), relatives aux tensions normales circonférentielles, au cas particulier où :

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e} = \frac{1}{2}$$

et en nous limitant aux valeurs $n = 2, 4, 6, 8$. L'anneau a comme épaisseur l'unité de longueur.

1) Section AA, correspondant au diamètre d'action de la charge :

Extrados :

$$\begin{aligned} (\sigma)_{a e} &= \frac{F}{r_1} \left[\frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{5} + \frac{4}{\pi} (1,111 + 0,219 + 0,072 + 0,025) \right] \\ &= \frac{F}{r_1} \left(\frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{5} + \frac{4}{\pi} \cdot 1,425 \right) \\ &= \frac{F}{r_1} (0,212 + 1,815) \end{aligned}$$

$$(\sigma)_{a e} = + 2,027 \frac{F}{r_1}$$

2) Section BB, correspondant au diamètre perpendiculaire aux charges :

a) Intrados :

$$(\sigma_a)_i = \frac{F}{r_1} \left[\frac{5}{\pi} \cdot \frac{1}{3} + \frac{2}{\pi} (4,556 - 1,328 + 1,040 - 1,004) \right]$$

$$= \frac{F}{r_1} \left(\frac{5}{\pi} \cdot \frac{1}{3} + \frac{2}{\pi} \cdot 3,264 \right)$$

$$= \frac{F}{r_1} (0,530 + 2,078)$$

$$(\sigma_a)_i = + 2,608 \frac{F}{r_1}$$

b) Extrados :

$$(\sigma_a)_e = \frac{F}{r_1} \left[\frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{3} - \frac{4}{\pi} (1,111 - 0,219 + 0,072 - 0,023) \right]$$

$$= \frac{F}{r_1} \left(\frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{3} - \frac{4}{\pi} \cdot 0,941 \right)$$

$$= \frac{F}{r_1} (0,212 - 1,198)$$

$$(\sigma_a)_e = -0,986 \frac{F}{r_1}$$

D. — ETUDE DE LA TENSION MAXIMUM DANS LA ZONE MEME DE CONTACT DE LA CHARGE

17. — Les formules de la résistance des matériaux établies précédemment (§ 8) n'ont pas considéré les effets produits dans la zone du contact tout à fait localisé de la charge et de l'anneau. D'autre part, les formules de la théorie de l'élasticité discutées précédemment (§§ 12 et 13) supposent que le contact est absolument ponctuel, ce qui conduit au contour à une tension radiale infinie au point de contact.

La réalité est évidemment différente de ces deux manières de procéder.

Les conclusions de ces deux mises en équation ne sont donc pas valables dans la région immédiate du contact, mais sont valables partout ailleurs. La tension $(\sigma_a)_{AA_{intrados}}$ obtenue au § 15 se produit donc près du point de contact et non au point même. Dans la région immédiate du contact, il faut évidemment s'inspirer de la théorie de la dureté de Hertz ([8], chap. XVII, pp. 697 à 716; et [13], chap. XI, pp. 365 à 376).

Il s'établit entre les deux anneaux en contact une surface de dimensions finies. La théorie de Hertz permet de calculer les dimensions de cette zone de contact, en supposant que tout reste dans les limites de l'élasticité.

Pour que la théorie de Hertz soit applicable, il faut que ces dimensions soient relativement petites par rapport au diamètre de la section transversale de l'anneau; en effet, sans cela, il n'est pas question de pouvoir compter sur une étreinte latérale suffisante de la matière située sous la charge. La théorie de Hertz permet aussi de calculer les tensions qui se produisent dans la zone de contact, dans les limites de l'élasticité; ces tensions sont beaucoup plus grandes que les plus grandes des tensions calculées précédemment.

18. — Nous considérons le cas de deux anneaux identiques se touchant mutuellement par l'intérieur et dont les plans sont normaux l'un à l'autre (cas des maillons d'une chaîne ordinaire).

L'application de la théorie de Hertz montre qu'il y a un cercle de contact entre les deux anneaux.

Lorsque les deux axes de l'ellipse de contact du cas général tendent vers l'égalité, les formules donnant la valeur de ces axes et celle des tensions, tendent vers les formules établies pour le contact de deux sphères (c'est le cas ici).

Donc, le rayon b du cercle de contact qui s'établit entre les deux anneaux identiques, dans les limites de l'élasticité, est donné par la formule :

$$b = \sqrt[3]{\frac{3F}{8} \cdot \frac{4/G(1-1/m)}{2(1/a-1/r_1)}} \quad (38) (1)$$

Pour le cas d'anneaux en acier ou en fer, en prenant $m = 10/3$:

$$b = 0,040355 \cdot \sqrt[3]{\frac{F}{(1/a-1/r_1)}} \quad (38bis)$$

Aire du cercle de contact :

$$\pi b^2 = 0,00511 \cdot \sqrt[3]{\frac{F^2}{(1/a-1/r_1)^2}}$$

On en déduit la tension normale maximum, laquelle vaut 1,5 fois la tension normale moyenne qui serait obtenue en supposant que la force sollicitante se répartisse uniformément sur ce cercle de contact :

$$\sigma_{\max} = 295,54 \sqrt[3]{F} \sqrt[3]{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r_1}\right)^2} \quad (39)$$

(1) Rappelons que les lettres ont la signification suivante :

F : force extérieure sollicitant l'anneau;

G : module d'élasticité de glissement ou transversal;

$1/m$: coefficient de Poisson;

a : rayon de la section transversale de l'anneau;

r_1 : rayon de la fibre intrados de l'anneau.

Remarquons, avec Timoshenko, que si pour m , on adopte la valeur 4 au lieu de 10/3, les demi-axes croissent d'environ 1 % et la pression maximum diminue d'environ 2 %.

La tension maximum de cisaillement ne se produit pas au centre de la surface de contact, mais un peu en dessous, à une profondeur donnée par (pour $m = 10/3$) :

$$x_1 = 0,47 \cdot b$$

et elle a pour valeur :

$$\tau_{\max} = 0,31 (\sigma_x)_{\max} \quad (40)$$

ou en explicitant :

$$\tau_{\max} = 90,997 \sqrt[3]{F} \sqrt[3]{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r_1}\right)^2} \quad (40bis)$$

C'est la tension la plus dangereuse pour une matière douce obéissant au critère de Guest ou de la plus grande tension tangentielle. On déduit de là, la valeur que l'on peut admettre pour la force appliquée, sans dépasser les conditions ordinaires imposées.

19. — Pour une matière douce, telle qu'un acier laminé ou forgé, on peut admettre que la tension normale (au centre de la surface de contact) ne peut dépasser $1,20 \cdot R'_e$, R'_e étant la limite d'élasticité du métal considéré ([14], p. 41). Une valeur aussi grande peut être tolérée, avec une sécurité contre le dépassement de la limite d'élasticité, car la matière est étreinte de toutes parts dans cette zone de contact où elle est en état triple de tension.

En s'imposant de ne pas franchir cette limite, la force maximum qu'il est possible d'appliquer à l'anneau est donnée par :

$$F = 68,32 \cdot 10^{-9} \frac{(R'_e)^3}{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r_1}\right)^2}$$

Quand on se trouve devant une matière raide, le problème est différent, le critère à appliquer n'étant plus le même.

En appliquant cette formule, on constate qu'il n'y a pratiquement pas moyen de faire en sorte, pour des anneaux, que la limite d'élasticité ne soit pas dépassée dans la zone du contact de deux maillons.

L'expérience journalière montre que la rupture d'un maillon en fer ou en acier non écroui, sollicité diamétralement, ne se produit pas dans la région même du contact. Dans cette région, la matière ductile dont est fait l'anneau a nettement dépassé la limite d'élasticité, mais elle est étreinte de toutes parts par de la matière encore en état triple de tension qui n'a pas dépassé cette limite. L'expérience montre aussi que, même lorsque le métal de l'anneau est complètement écroui par suite d'actions répétées excessives, la rupture ne se produit pas non plus dans la zone de contact.

En fait, l'analyse de ce qui se passe dans la zone du contact est donc ici sans portée réelle pour autant que cette zone, par suite de la rotation de l'anneau, ne soit pas sollicitée ultérieurement par traction.

II. - CONTROLE PHOTO-ELASTIQUE DE CERTAINS RESULTATS OBTENUS PAR LE CALCUL

A. — INTRODUCTION

20. — Le principe de ce contrôle est basé sur le fait fondamental suivant : au moyen de modèles réduits transparents, exécutés en une matière jouissant de la propriété de la biréfringence accidentelle, il est aisé de déterminer expérimentalement six choses importantes :

- 1) la position des points d'inflexion des anneaux;
- 2) l'orientation du vecteur sollicitant la section transversale en ces points;
- 3) la position des points neutres ou non sollicités, à l'intrados et à l'extrados de l'anneau;
- 4) les trajectoires des tensions principales ou lignes isostatiques, ou au moins l'allure de ces trajectoires;
- 5) le diagramme des tensions circonférentielles à l'intrados et à l'extrados de l'anneau;
- 6) le diagramme des tensions normales sur les sections transversales, et principalement celui relatif à la section transversale située sur le diamètre normal à la direction des charges.

**B. — RAPPEL DES CARACTERES
DE LA REGION DES POINTS D'INFLEXION**

21. — Dans le cas d'une pièce droite prismatique, de section rectangulaire, sollicitée par flexion plane, la région aux abords d'un point d'inflexion présente un aspect extrêmement caractéristique dans l'examen optique par la photo-élasticité, comme nous l'avons montré nous-mêmes dans une étude publiée en collaboration avec M. Fritz Temmerman ([16]).

On constate, lors de l'étude de la théorie de la méthode de la photo-élasticité, que les courbes qui apparaissent en noir, si on fait usage d'une lumière monochromatique polarisée circulairement, sont des courbes suivant lesquelles la différence des tensions principales présente une même valeur. Si l'on fait usage de la lumière non monochromatique, chaque bande analogue présente une même couleur. De là le nom de bandes d'extinction ou de lignes isochromatiques donné à ces courbes.

Il est extrêmement important de discuter analytiquement les caractères des courbes isochromatiques dans la région du point d'inflexion, afin de pouvoir comprendre les photographies ci-annexées et de pouvoir en interpréter les résultats.

Une partie du texte du mémoire précité est reproduite ici.

22. — EXPRESSION GENERALE DES TENSIONS.

Nous travaillons en coordonnées rectangulaires, l'axe des x étant l'axe de la pièce, l'axe des z étant dans la direction orthogonale dans le plan de flexion; l'origine O des axes coïncide avec le point d'inflexion, figure 20.

σ_x et σ_z sont les tensions normales, τ_{xz} et τ_{zx} les tensions tangentielles, en un point quelconque de la région du point d'inflexion, relatives aux facettes respectivement normales à l'axe des x et à l'axe des z .

La théorie classique de la flexion composée, avec effort tranchant, donne les lois simples de distribution des tensions en tous les points d'une section transversale :

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{N}{\Omega} + \frac{M.z}{I} \\ \sigma_z &= 0 \\ \tau_{xz} &= \frac{T}{2I} (a^2 - z^2) \end{aligned} \right. \quad (41)$$

N est l'effort longitudinal; T est l'effort tranchant.
 N et T sont les composantes du vecteur sollicitation Q .

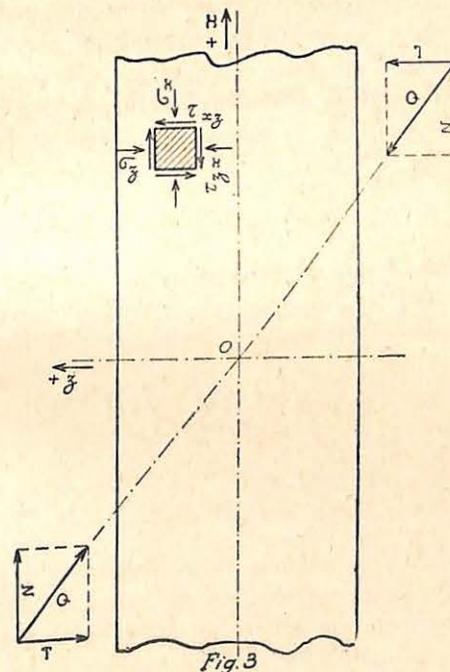


Fig. 20. — Sollicitation d'un tronçon de pièce droite.

Dans cette dernière expression, remplaçons σ_x et τ_{xz} par leurs valeurs (43). Il vient :

$$|\tau_{\max}| = \frac{3}{4} \frac{T}{a.e} \sqrt{\left(\frac{x}{a} \cdot \frac{z}{a} + \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{T}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^2} \quad (45)$$

Donc si nous posons :

$$|\beta| = \frac{\tau_{\max}}{\frac{3}{4} \cdot \frac{T}{a.e}} \quad (46)$$

chaque courbe isochromatique correspond à une cote β telle que :

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{x}{a} \cdot \frac{z}{a} + \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{T}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^2} \quad (47)$$

Cette relation résolue par rapport à x/a donnera :

$$\frac{x}{a} = \frac{1}{z/a} \left\{ -\frac{1}{3} \cdot \frac{N}{T} \pm \sqrt{\beta^2 - \left[1 - \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^2} \right\} \quad (48)$$

Les courbes isochromatiques constituent donc un groupe de courbes cotées en β . Nous avons choisi la forme de β de façon à éliminer du problème la valeur absolue des grandeurs et ne conserver que leurs valeurs relatives, seules en jeu pour l'étude des propriétés intrinsèques des points d'inflexion.

L'équation (48) montre que les courbes isochromatiques ont le point d'inflexion O comme centre de symétrie.

Le coefficient angulaire de la tangente en un point quelconque vaut :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{1}{\frac{2 [1 - (z/a)^2]}{\sqrt{\beta^2 - [1 - (z/a)^2]^2}} - \frac{x/a}{(z/a)^2}} \quad (49)$$

Les isochromatiques présentent les particularités suivantes :

1° Sur chaque bord de la pièce, c'est-à-dire pour $z/a = \pm 1$, il existe un point neutre non sollicité, donc de cote $\beta = 0$. Ils ont pour

abscisse $\pm \frac{Q}{3} \cdot \frac{N}{T}$. La droite qui les joint passe par l'origine

et a pour pente $-\frac{3T}{N}$. Dons, s'ils sont obtenu expérimentalement

avec une précision suffisante, l'inclinaison de la droite qui les joint permet de contrôler la valeur de N/T du cas.

2° Lorsque x et z tendent vers 0, β prend la valeur :

$$\beta_0 = \sqrt{\left(\frac{N}{3T}\right)^2 + 1} \quad (50)$$

Cette valeur est toujours supérieure à l'unité. Si on l'introduit dans l'équation (47), on obtient comme isochromatique passant par l'origine :

$$\left(\frac{z}{a}\right)^4 + \left[\left(\frac{x}{a}\right)^2 - 2\right] \left(\frac{z}{a}\right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{T} \cdot \frac{x}{a} \cdot \frac{z}{a} = 0 \quad (51)$$

ce qui peut se décomposer en deux équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{z}{a} = 0 \\ \frac{x}{a} = \frac{-\frac{N}{3T} \pm \sqrt{\left(\frac{N}{3T}\right)^2 + 2\left(\frac{z}{a}\right)^2 - \left(\frac{z}{a}\right)^4}}{\left(\frac{z}{a}\right)} \end{array} \right. \quad (52)$$

La première de ces deux équations représente l'axe de la pièce. Celui-ci est donc une isochromatique de cote β_0 .

La seconde de ces deux équations représente une courbe isochromatique ayant même cote que l'axe. Cette courbe a la forme d'un S très allongé; elle joint les deux points à l'infini sur l'axe en suivant le trajet (fig. 22, 23, 24, 25, 26, 27) :

$$+ \infty \text{ BS' SOS'' S''' D } - \infty$$

Les parties S'B et S'''D ont pour asymptote l'axe de la pièce.

La partie SOS'' voisine du point d'inflexion a une forme en S très caractéristique.

Dans la région voisine des points neutres C, la courbe sort de la partie utile de la pièce.

Elle coupe l'axe des z au point d'ordonnée $z = \pm a\sqrt{2}$, indépendamment de la valeur du rapport N/T .

Pour connaître la tangente à l'origine à cette branche de l'isochromatique β_0 , on calcule la valeur correspondante de dz/dx et l'on trouve après d'assez longs calculs :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{T} \quad (53)$$

En comparant avec le coefficient angulaire de la droite qui joint les points neutres, on voit que :

La droite des points neutres et la tangente à l'isochromatique β_0 passant par l'origine sont orthogonales.

3° Les courbes ayant une cote $\beta > \beta_0$ sont toutes asymptotiques à l'axe des x . Chacune d'elles présente deux branches extérieures à la courbe en S de cote β_0 .

Ces branches sortent de la pièce entre les points :

$$-\frac{1}{3} \cdot \frac{N}{T} + \beta \quad \text{et} \quad -\frac{1}{3} \cdot \frac{N}{T} - \beta$$

et les points symétriques par rapport à l'origine.

4° Toutes les courbes de cote $\beta < \beta_0$ se composent de deux branches entièrement séparées et entourant chacune l'un des points neutres. Lorsque $\beta \approx 1$, elles ont un point à l'infini et sont asymptotiques à l'axe des x . Lorsque $\beta < 1$, les courbes sont fermées, sans point à l'infini, et se composent encore de deux branches entourant chacune un des points neutres.

En effet, s'il y a un point à l'infini, il se trouve sur l'axe Ox , étant donné que les isochromatiques ne peuvent se couper, et que les deux branches de l'isochromatique β_0 entre lesquelles elles sont entièrement comprises se rejoignent sur l'axe à l'infini. Il n'y a donc de point à l'infini que si à $z/a = 0$ correspond une valeur réelle et infinie de z/a , c'est-à-dire, d'après l'équation (48), lorsque :

$$\beta^2 = \left[1 - \left(\frac{z}{a}\right)^2 \right]^2$$

reste positif lorsque z/a tend vers 0, c'est-à-dire si $\beta \approx 1$.

5° En un point du bord le coefficient angulaire de la tangente à l'isochromatique vaut $dz/dx = -a/x$. On voit immédiatement que la tangente à l'isochromatique au point d'intersection avec le bord de la pièce coupe l'axe des z en un point fixe J, indépendamment des valeurs de β ou de N/T , et situé à une distance $2a$ de l'origine.

6° Toutes les lignes isochromatiques coupent le contour de la pièce de part et d'autre du point neutre C, en des points dont la distance à ce point neutre représente la cote β multipliée par la demi-largeur a de la pièce.

En effet, le long du contour la tension maximum est égale à :

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{1}{2} (\sigma_x)_{\text{contour}} = \frac{1}{2} \left[\frac{N}{\Omega} + \frac{M.v}{l} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{N}{2ae} + \frac{6T.x}{4a^2.e} \right] \end{aligned} \quad (54)$$

Donc, le long du contour, la cote β varie linéairement suivant la formule :

$$\beta = \frac{x}{a} + \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{T} \quad (55)$$

Les courbes isochromatiques dont les cotes diffèrent d'un même nombre aboutissent au contour en des points également écartés l'un de l'autre.

Remarque importante.

Dans toutes les parties droites d'une pièce, sollicitée en flexion plane composée, les diverses lignes isochromatiques ou d'extinction, vues à un moment déterminé au banc photo-élastique, sont toutes, sur le bord de la pièce, également écartées l'une de l'autre. En effet, elles correspondent à des valeurs régulièrement étagées de τ_{\max} qui au bord est proportionnel au $(\sigma_x)_{\text{contour}}$, donc leurs cotes β diffèrent l'une de l'autre de la même quantité.

Commentaire général des figures et des photographies des lignes isochromatiques.

Etant donnée l'importance de bien fixer les aspects photo-élastiques de la région du point d'inflexion, nous donnons ci-après de nombreuses photographies et les tracés théoriques de cinq cas différents par la valeur de N/T .

Dans les figures théoriques 22, 23, 24, 25 et 26, nous avons présenté :

- En trait fort, le cheminement général bouclé (y compris l'axe);
- En trait d'axe, la ligne des points neutres COC;
- En trait plein ordinaire, diverses courbes isochromatiques;
- En trait pointillé, la courbe spéciale $\beta = 1$.

Dans ces figures, les deux flèches, opposées l'une à l'autre, représentent l'alignement des vecteurs Q qui s'opposent l'un à l'autre au point d'inflexion.

Sur ces figures, la croix centrale se présente en noir ou en clair au cours de l'examen photo-élastique.

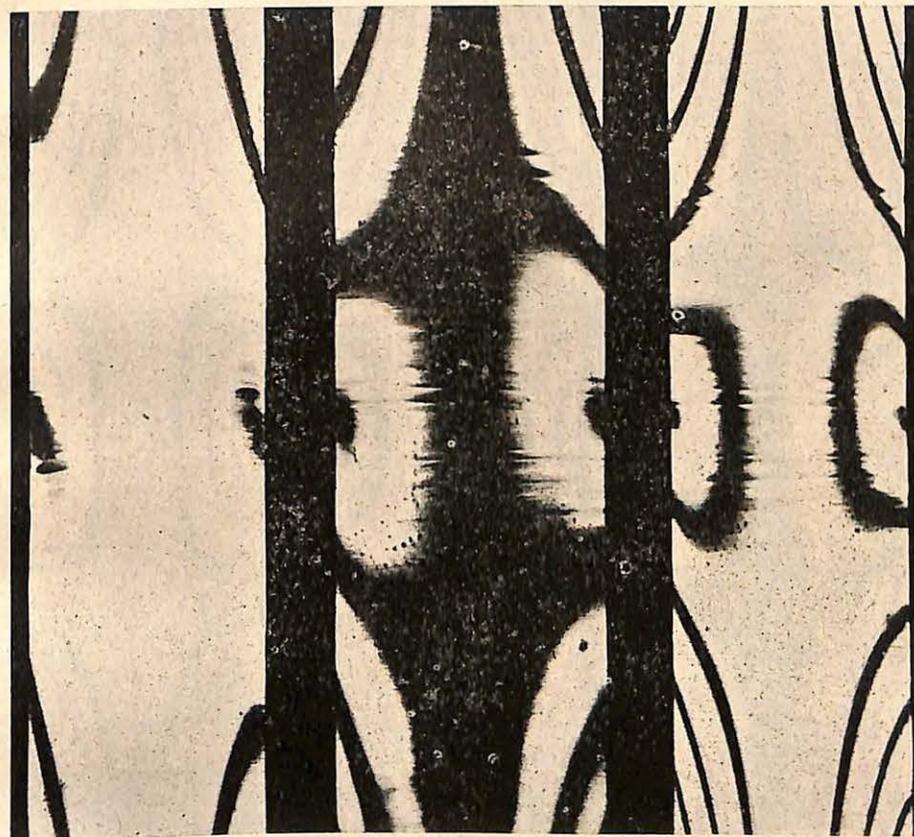
Les diverses courbes tracées sur ces figures ont été calculées par points.

Il est à remarquer que les planches et les photographies sont présentées en positions symétriques les unes des autres.

Analyse de chacun des cas présentés.

Les planches présentent les cas suivants qui semblent couvrir toutes les possibilités.

$$I. \text{ Cas } \frac{N}{T} = 0.$$



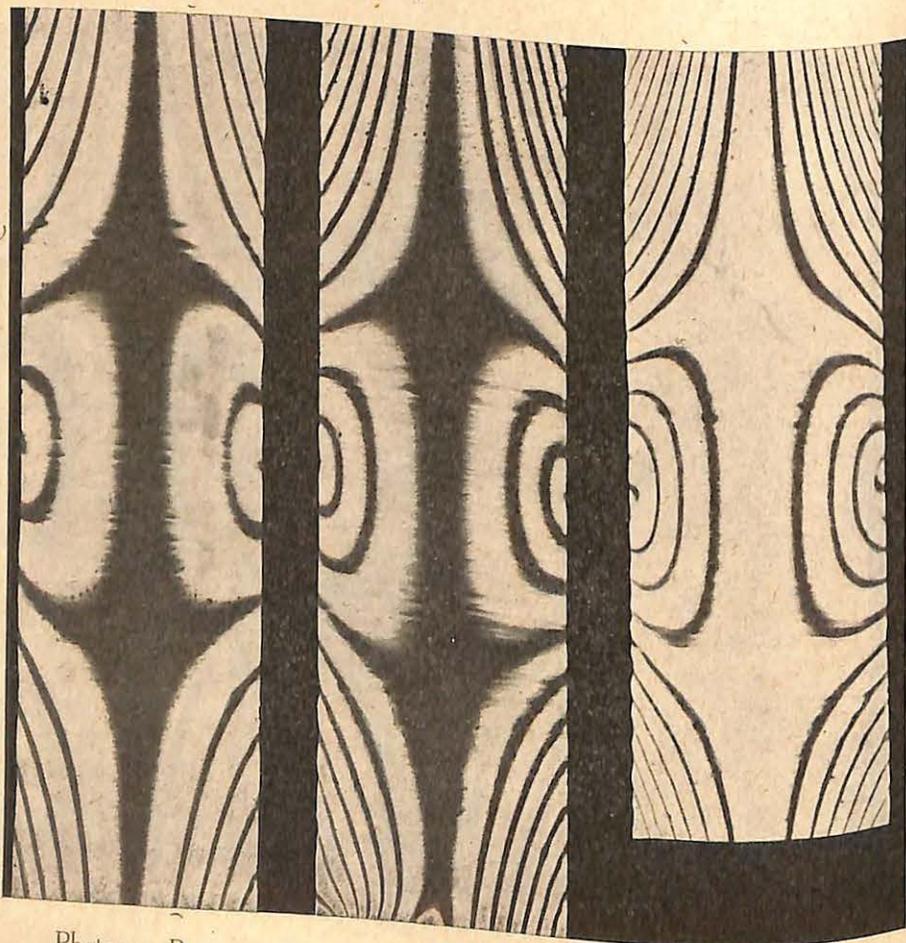
Photos : P-1.

P-2.

P-3.

Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.
(Les photographies sont présentées en position symétrique de la figure 22.)

I. Cas $\frac{N}{T} = 0.$



Photos : P-4.

P-5.

P-6.

Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.
 (Les photographies sont présentées en position symétrique de la figure 22.)

I. Cas $\frac{N}{T} = 0.$

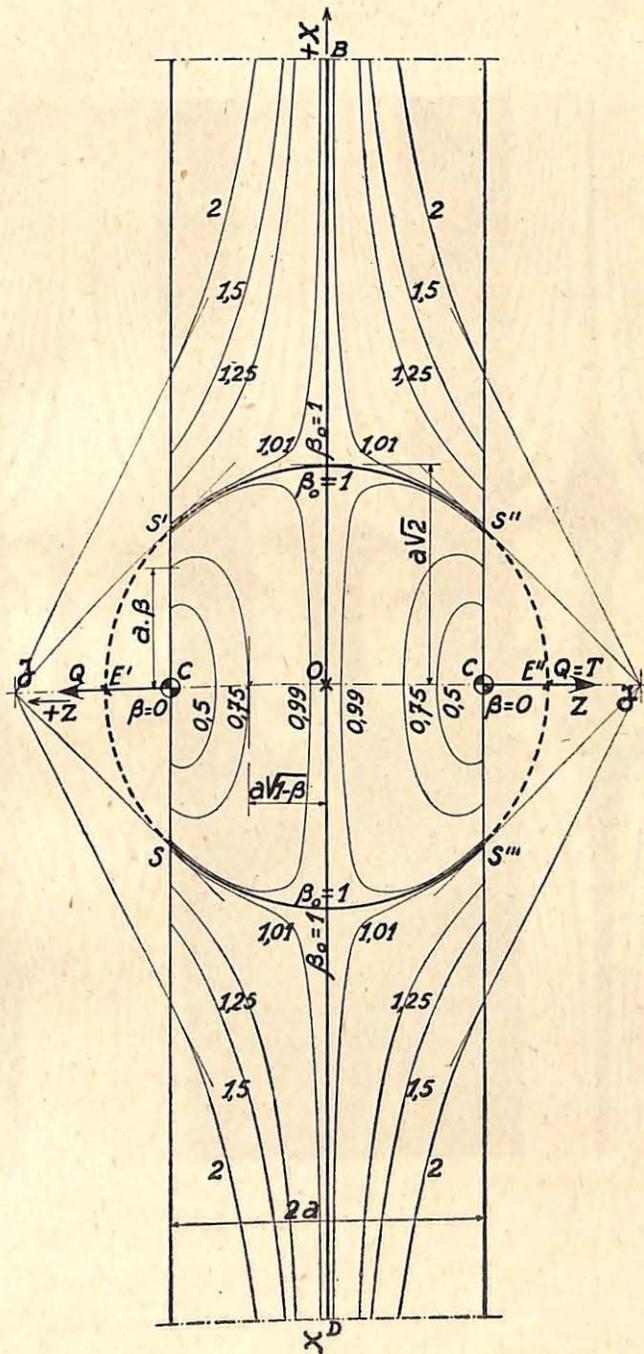
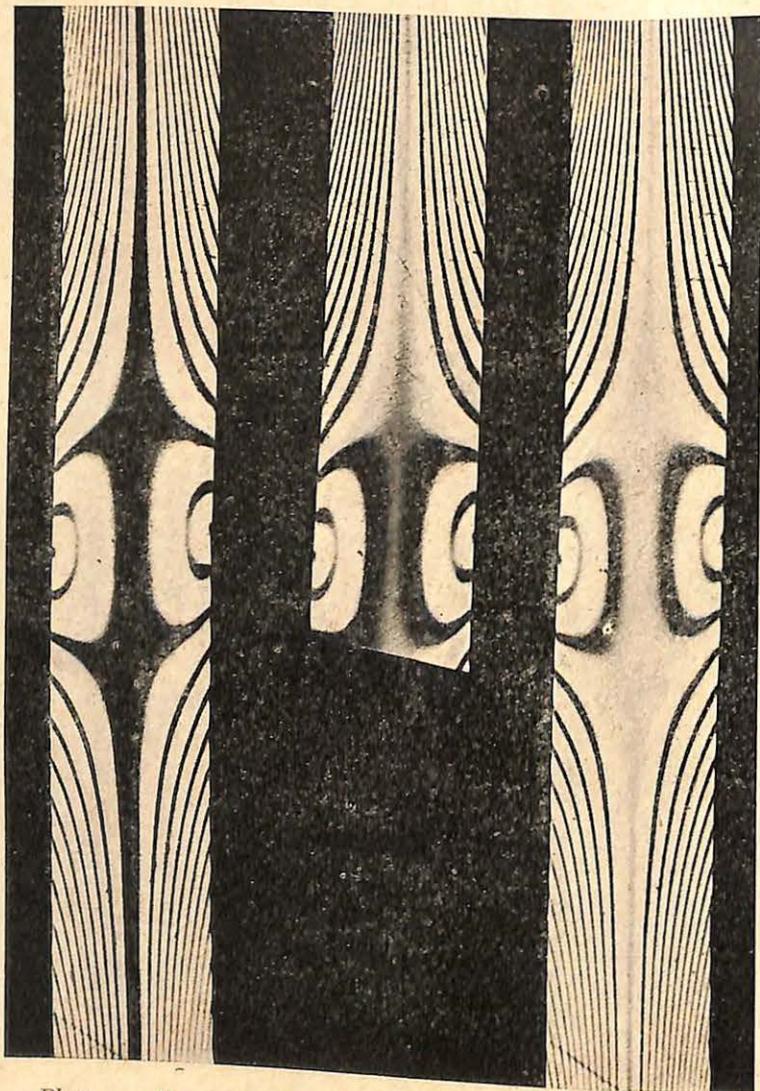


Fig. 22. — Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.

II. Cas $\frac{N}{T} = -0.5.$



Photos : P-7.

P-8.

P-9.

Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.
 (Les photographies sont présentées en position symétrique de la figure 25.)

II. Cas $\frac{N}{T} = -0.5.$

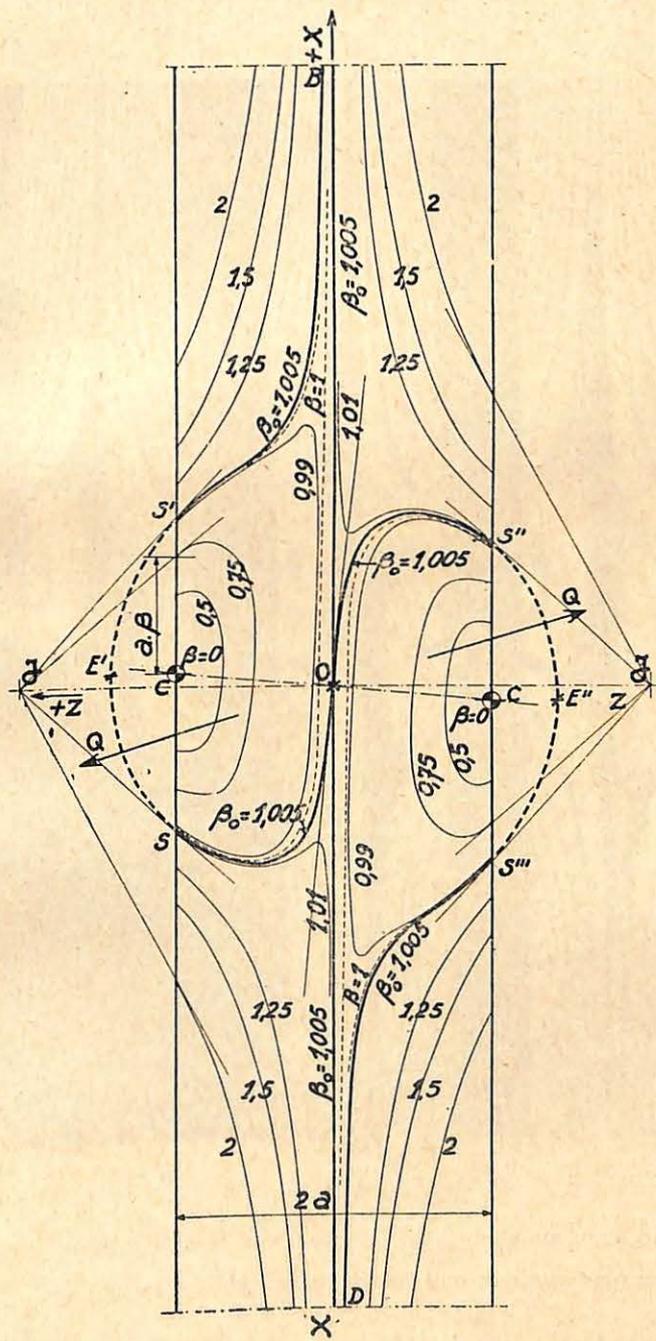
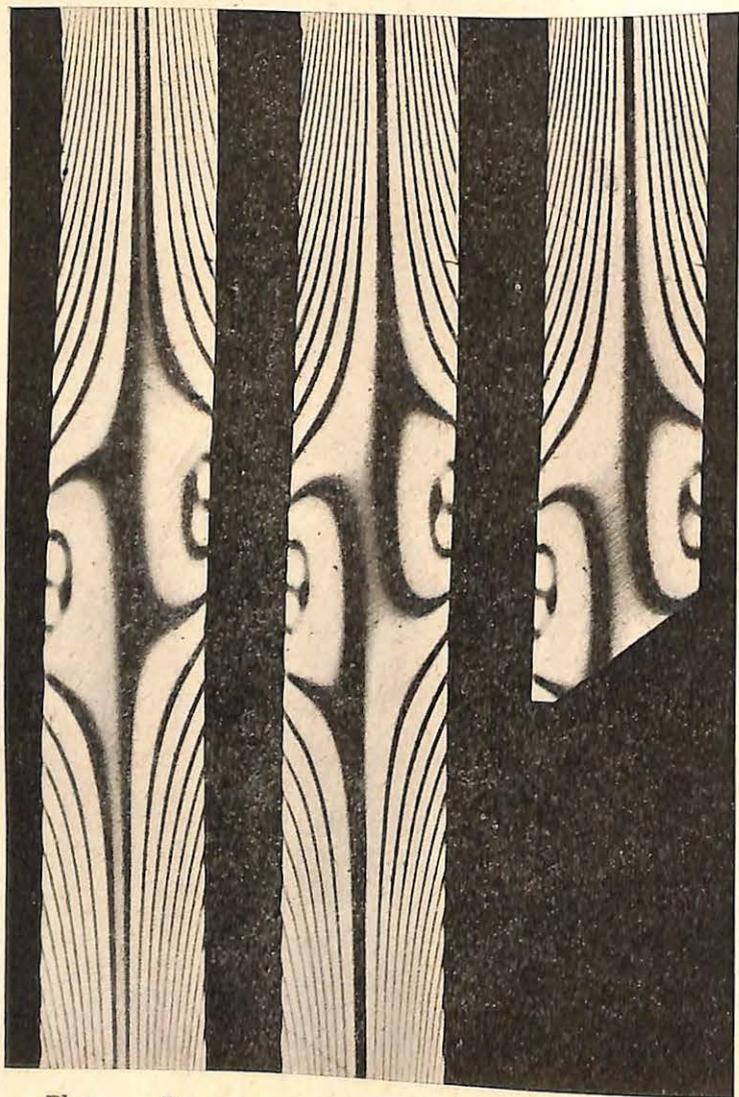


Fig. 25. — Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.

$$\text{III. Cas } \frac{N}{T} = -\frac{5}{\sqrt{5}}$$



Photos : P-10. P-11. P-12.

Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.
(Les photographies sont présentées en position symétrique de la figure 24.)

$$\text{III. Cas } \frac{N}{T} = -\frac{5}{\sqrt{5}}$$

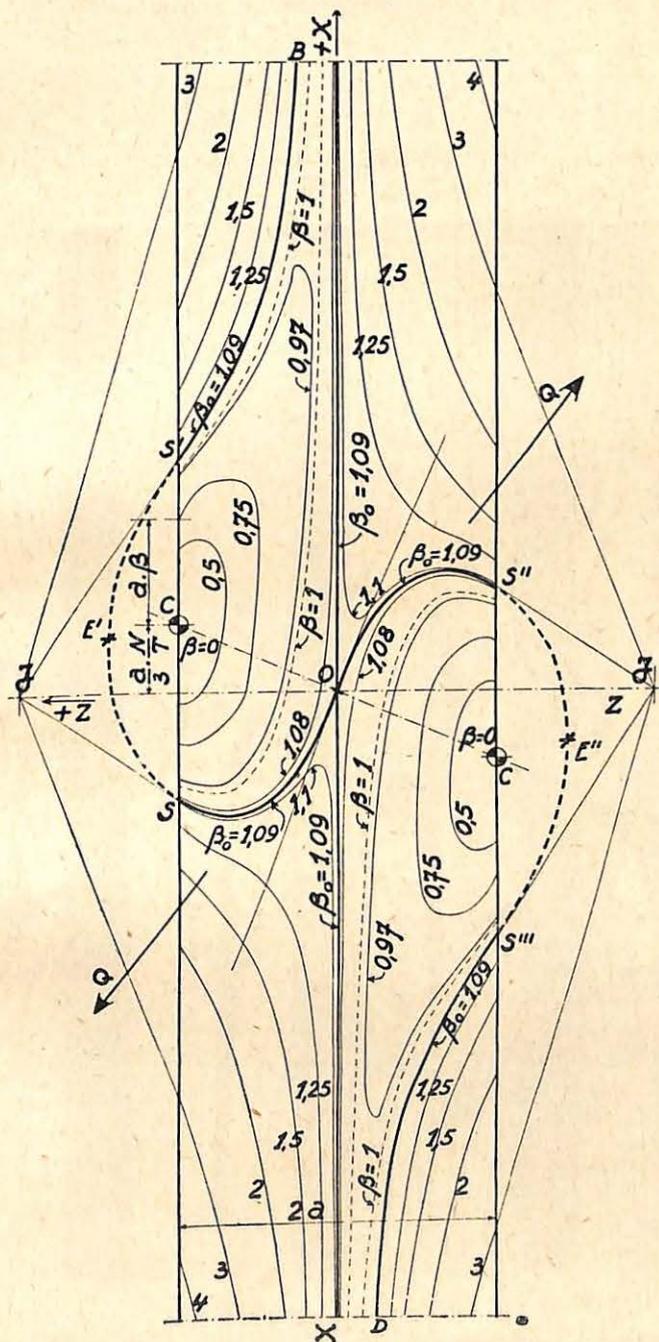
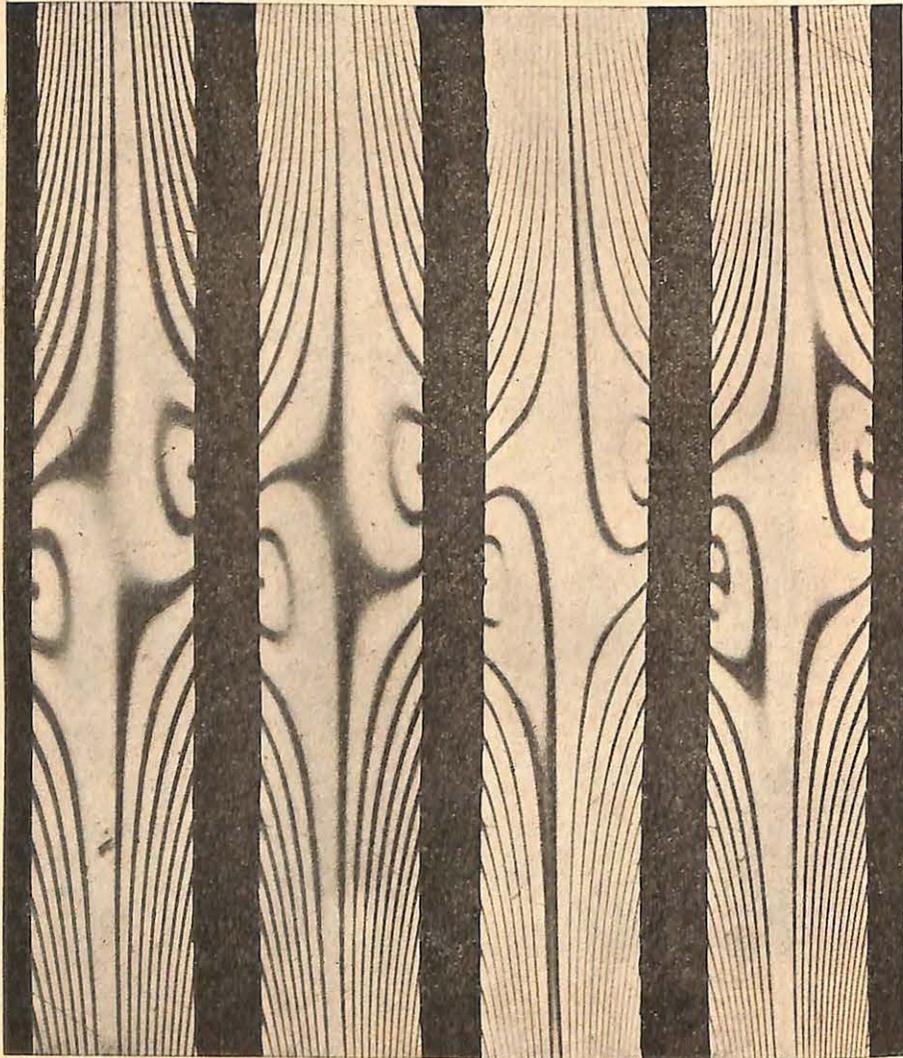


Fig. 24. — Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.

IV. Cas $\frac{N}{T} = -2.$



Photos : P-13. P-14. P-15. P-16.

Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.
 (Les photographies sont présentées en position symétrique de la figure 25.)

IV. Cas $\frac{N}{T} = -2.$

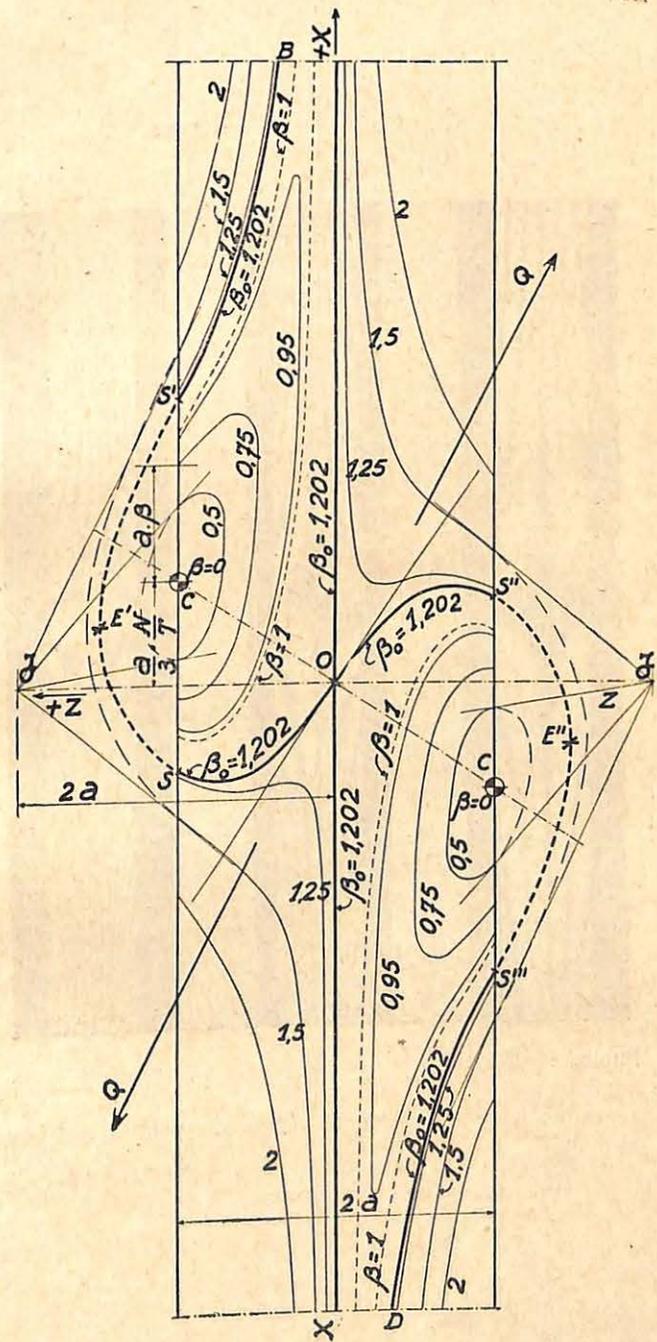


Fig. 25. — Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.

$$V. \text{ Cas } \frac{N}{T} = -18,45.$$



Photos : P-17.

P-18.

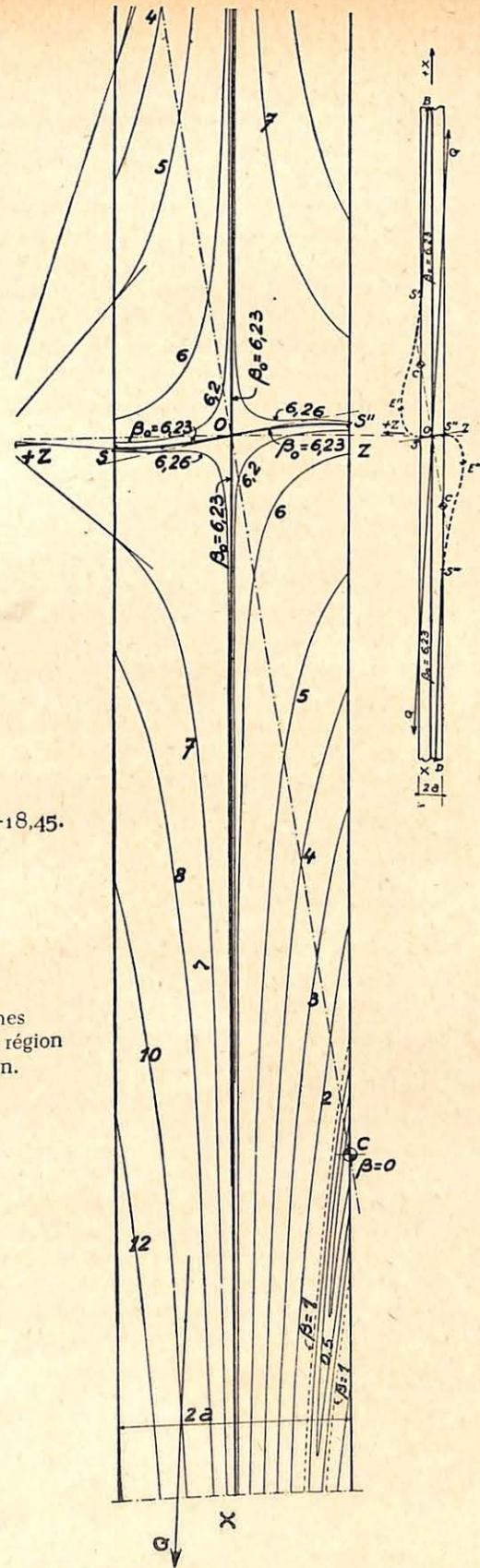
P-19.

Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.

(Les photographies sont présentées en position symétrique de la figure 26-27.)

$$V. \text{ Cas } \frac{N}{T} = -18,45.$$

Fig. 26-27. — Lignes isochromatiques de la région du point d'inflexion.



Cas I. $\frac{N}{T} = 0$, effort longitudinal nul (fig. 22 et photos P-1 à P-6).

Ce cas est fort important. C'est le cas limite où la flexion composée devient de la flexion simple. Il se présente notamment dans tous les montants d'une poutre Vierendeel de hauteur constante, à l'aplomb desquels il n'y a pas de force extérieure appliquée. Il offre comme particularité que le cheminement bouclé a la forme limite comprenant l'axe de la pièce et une circonférence de rayon $a\sqrt{2}$.

Les photographies montrent plusieurs aspect photo-élastiques successifs à charge croissante. Ces photographies confirment remarquablement l'aspect prévu analytiquement.

Cas II. $\frac{N}{T} = -0,5$ (fig. 23 et photos P-7 à P-9).

Cas III. $\frac{N}{T} = -\frac{5}{\sqrt{5}}$ (fig. 24 et photos P-10 à P-12) (1).

Cas IV. $\frac{N}{T} = -2$ (fig. 25 et photos P-13 à P-16).

Valeurs moyennes de l'effort longitudinal.

Ces trois cas sont des cas généraux au point de vue des lignes isochromatiques.

Ces cas se présentent en application pour les montants d'une poutre Vierendeel, de hauteur constante, à l'aplomb desquels est concentrée une force extérieure. Ils se présentent fréquemment aussi quand la bride est polygonale. Ces cas se produisent encore, pour le cas de hauteur constante, dans les panneaux voisins des extrémités de la poutre. On voit donc combien est importante l'étude

(1) Ce cas correspond à ce que, dans notre mémoire [8], nous avons appelé le cas de passage au point de vue du réseau des lignes isostatiques. Pour des valeurs de N/T inférieures à celle-ci, toutes les isostatiques avaient au moins une extrémité à l'infini; pour des valeurs de N/T supérieures à celle-ci, un groupe d'isostatiques restait entièrement à distance finie; pour cette valeur de N/T , il existe une isostatique com-

complète de ces cas. Nous rappelons en particulier que le décalage des deux points neutres C l'un par rapport à l'autre est d'autant plus grand que l'effort longitudinal N est plus grand par rapport à l'effort tranchant T .

Cas V. $\frac{N}{T} = -18,45$ (fig. 26 et 27, photos P-17 à P-19).

Grande valeur de l'effort longitudinal.

Nous avons présenté ce cas séparément, car il est fréquent dans les ossatures de bâtiments à nombreux étages, ainsi que dans les brides des poutres Vierendeel de forme polygonale et même de hauteur constante.

L'aspect photo-élastique est ici assez différent des cas précédents, parce que les points neutres C sont rejetés fort loin l'un de l'autre, de sorte que, à certains moments au point d'inflexion, les bandes d'extinction forment une croix noire presque doublement symétrique. La figure 26, tracée à l'échelle des figures 22 à 25, est très caractéristique à cet égard. La figure 27 donne d'ailleurs l'aspect de la pièce à plus petite échelle.

Au fur et à mesure que N/T grandira encore, les points neutres C

posée de : le bord de la pièce de l'infini au premier point neutre, la droite joignant les points neutres, puis l'autre bord de la pièce du second point neutre jusqu'à l'infini.

Il convient de faire remarquer ici que la formule (18) de ce mémoire est à lire :

$$X = \frac{\frac{5T}{2a^3e} (a^2 - z^2)}{\frac{5T}{2a^3e} zx + \frac{N}{2ae}}$$

au lieu de :

$$X = \frac{\frac{5T}{4a^3e} (a^2 - z^2)}{\frac{5T}{2a^3e} zx + \frac{N}{2ae}}$$

Il en résulte que le cas de passage correspond en réalité à $N/T = \sqrt{3}$; les cotes des isoelines sont à modifier légèrement et l'aspect du champ des isostatiques est un peu altéré.

Les formules subséquentes sont à modifier en conséquence.

s'écarteront davantage. Aussi il pourrait arriver qu'ils s'éloignent au point de pénétrer dans les congés de raccordement des diverses pièces constituant l'ossature.

Le présent mémoire ne traite que la région des points d'inflexion d'une pièce droite prismatique, de sorte que dans les ossatures à angles rigides, dans lesquelles le point d'inflexion d'une pièce s'approcherait d'un congé de raccordement, les aspects photo-élastiques de cette région seraient plus ou moins fortement altérés par rapport aux aspects que montrent les diverses photographies contenues dans cette note. Cependant, les caractères généraux se maintiendraient. Mais il arrive que dans ces ossatures, certaines pièces ne présentent pas de point d'inflexion parce que le vecteur Q coupe l'axe de la pièce en dehors de la région utile.

C'est notamment le cas dans certaines parties des membrures d'une poutre Vierendeel à bride polygonale. L'aspect photo-élastique révélera cette situation, puisqu'il ne présentera pas les caractères remarquables que nous venons de décrire à nouveau.

Remarque importante.

Toute cette théorie est établie exclusivement pour le cas d'une pièce droite longue, mais la forme étudiée ne présente pas toujours ce caractère, loin de là. Ainsi, pour ne prendre que la question qui nous occupe, les anneaux ne sont plus des pièces droites. Les lignes isochromatiques ne présenteront donc plus tout à fait les mêmes aspects que ceux que nous venons de rappeler d'après le mémoire précité.

Cependant, quand la courbure relative est faible, les lignes isochromatiques autour des points neutres ne sont pas fort altérées, comme en font foi les photographies P-20 à P-27. En conséquence, on pourra encore se baser très approximativement sur la position des points neutres aux bords de l'anneau pour en déduire la position du point d'inflexion éventuel, exactement comme cela serait fait si la pièce était droite au lieu d'être courbe. D'ailleurs, ainsi que l'étude détaillée des photographies le montrera, en suivant cette méthode, les résultats du calcul seront remarquablement confirmés, pourvu que la courbure de l'anneau ne soit pas trop forte, auquel cas il faudrait modifier l'étude théorique des points d'inflexion.

On peut dire que pour les anneaux auxquels la théorie ordinaire de la résistance des matériaux est applicable (c'est-à-dire tels que $\lambda = r_1/r_0 \approx 0,6$), les points d'inflexion peuvent être étudiés comme si la pièce était droite.

C. — TRAJECTOIRES DES TENSIONS PRINCIPALES OU LIGNES ISOSTATIQUES

24. — En fait, dans le cas qui nous occupe, il importe peu de déterminer exactement ces trajectoires, mais il est fort utile d'en déterminer l'allure. Celle-ci est, en effet, la clef de la compréhension parfaite de la manière dont la pièce organise sa résistance à la sollicitation extérieure. L'allure de ces lignes est commandée principalement par les caractères des points singuliers de leur réseau ([8], §§ 187 à 191; [10] et [11]).

Ces points singuliers diffèrent suivant que l'anneau est mince ou épais.

Dans le cas de l'anneau mince ($\lambda = r_1/r_0 \approx 0,724$), le réseau comprend au total seize points singuliers (fig. 28) :

Sur le diamètre de charge OX, les points I, II, III;

Sur le diamètre OY, normal au diamètre de charge, les points IV;

Sur les bords intrados et extrados, les points V et VI.

Les points I sont du type de demi-centres de rayonnement; ils sont donc des demi-points d'ordre $n = +1$.

Les points II sont du type de centres étoilés à trois branches; ils sont donc d'ordre $n = -1$.

Les points III sont du type de centres focaux; ils sont d'ordre $n = +2$.

Les points IV sont du même type que les points III.

Les points V et VI sont des demi-centres étoilés à trois branches; ils sont donc des demi-points d'ordre $n = -1$.

Les points I sont les points d'application des charges.

Les points II sont assez difficiles à dépister, car ils sont très proches des points I et sont, en général, cachés dans la zone en plasticité; on sait cependant nettement qu'ils existent (en phase élastique) ([6] et [12]).

Les points III et IV apparaissent très nettement sur les photographies photo-élastiques (voir photos P-22 à P-31).

Fig. 28. — Champ des lignes isostatiques pour un anneau mince.

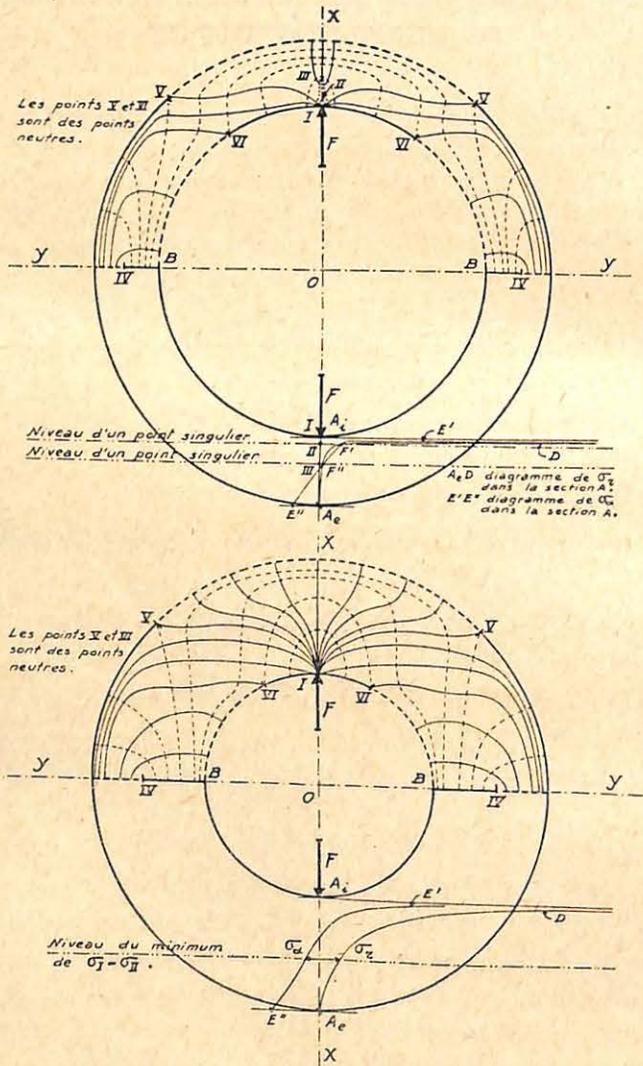


Fig. 29. — Champ des lignes isostatiques pour un gros anneau.

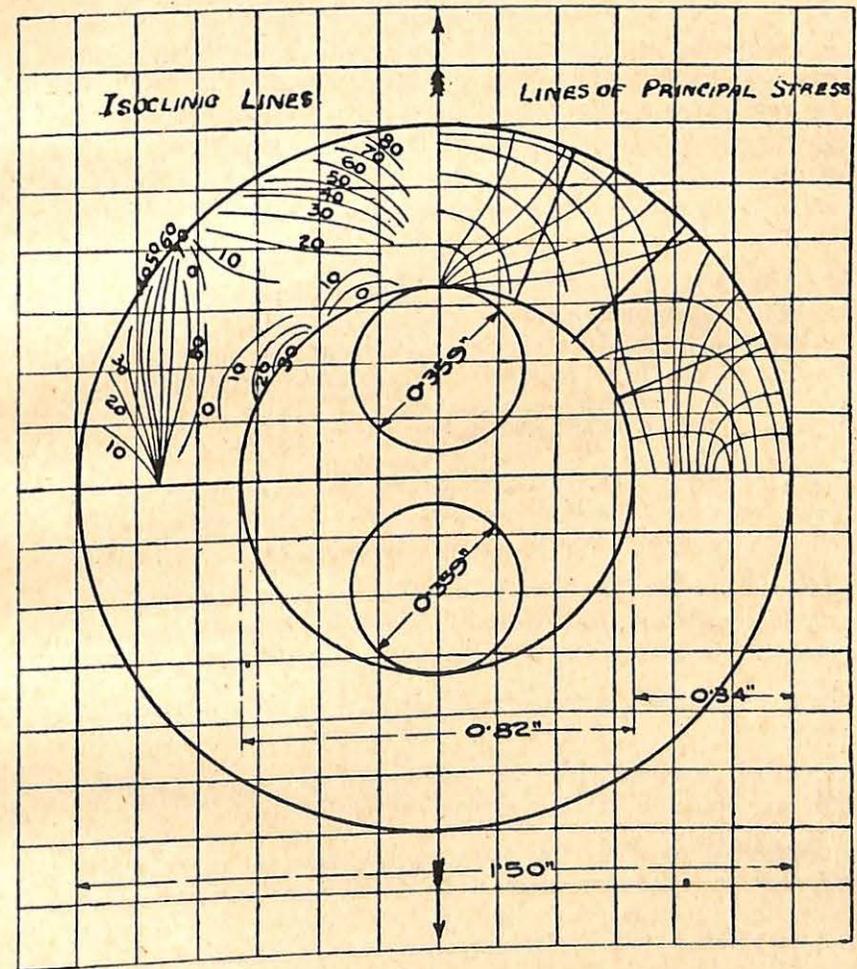


Fig. 30. — Champ des lignes isoclines et des lignes isostatiques pour un anneau épais (d'après Coker).

Les points V et VI apparaissent également manifestement; ce sont d'ailleurs les points neutres sur les contours dont il a été largement parlé ci-avant.

Dès que tous ces points sont définis, on connaît déjà les allures des lignes isostatiques dans leurs environs; il suffit de faire appel aux caractères généraux connus pour ces divers points. Cela donne lieu à la figure d'amorçage des tracés. Ceux-ci sont alors complétés systématiquement pour satisfaire aux allures imposées aux environs des points singuliers.

Les tracés ainsi établis sous forme provisoire sont alors retouchés en prenant quelques lignes isoclines.

La figure 28 montre pourquoi il y a trois points singuliers dans la section AA quand l'anneau est mince.

Soit A_eD la courbe représentative de la tension radiale σ_r dans la section AA. Elle est nulle à l'extrados et infinie à l'intrados (point de contact). D'autre part, représentons par $E'E''$ la loi de variation de la tension σ_a dans cette même section AA, tension due à la flexion plane composée. Quand l'anneau est relativement mince, et que sa forme puisse être considérée comme n'étant pas trop éloignée de celle d'une pièce droite, cette tension σ_a est assez grande, et la courbe

$E'E''$ recoupe deux fois la courbe de σ_r , comme le montre la figure 28. En chacun de ces points F' et F'' , la différence des deux tensions normales $\sigma_r - \sigma_a = \sigma_1 - \sigma_{11} = 0$. Ce sont les points singuliers II et III.

Le point singulier I se trouve en A_1 même, là où cette différence est infinie.

Quand l'épaisseur relative de l'anneau augmente, l'importance relative des tensions normales σ_a diminue, et les deux points F' et F'' se rapprochent l'un de l'autre. A un moment donné, ils se confondent (quand les deux courbes A_eD et $E'E''$ sont tangentes); leurs ordres étant $+1$ et -1 , l'ordre résultant est zéro, c'est-à-dire qu'ils n'existent plus. A fortiori, quand le diagramme des tensions se présente comme indiqué figure 29, les points II et III ont disparu. Cela se remarque sur les photographies relatives aux anneaux pour lesquels $\lambda \leq 0,656$ (P-24 à P-35).

Le réseau des lignes isostatiques est modifié en conséquence et devient celui indiqué par M. Coker en 1922 ([3], p. 26); il est reproduit à la figure 30, laquelle donne aussi les isoclines.

D. — OBTENTION EXPERIMENTALE DES DIAGRAMMES DES TENSIONS CIRCONFERENCELLES SUR LES BORDS INTRADOS ET EXTRADOS DE L'ANNEAU

25. — Lors de l'essai photo-élastique en lumière monochromatique polarisée circulairement, s'il y a des points neutres ou des points auxquels la différence des tensions principales $\sigma_1 - \sigma_{11} = 0$, ces points sont les premiers où l'on aperçoit des taches d'extinction.

Il est à remarquer que si la sollicitation de la pièce varie homothétiquement, ces points noirs restent dans une position fixe.

26. — D'autre part, d'autres bandes d'extinction se signalent, qui, elles, se modifient profondément de forme lorsque la sollicitation, tout en restant homothétique, varie.

Dans le cas des anneaux, ces bandes d'extinction restent toutes dans le champ de la pièce; elles changent de forme lorsque la charge varie; elles sont obligées de se serrer d'autant plus que la pièce est fortement sollicitée, et en conséquence; la largeur de ces bandes décroît, rendant leur tracé de plus en plus précis.

Ces bandes arrivent aux points où, pour une sollicitation déterminée, la valeur de $\sigma_1 - \sigma_{11}$ est un maximum. Donc, dans le cas de l'anneau, ces bandes naissent aux points intrados et extrados situés sur le diamètre de charge et sur le diamètre normal à celui-ci.

Au cours du changement de forme de ces courbes, que l'on peut très bien suivre sur les diverses photographies, elles viennent, dans le cas de l'anneau, se grouper en entourant les points neutres ou ceux auxquels $\sigma_1 - \sigma_{11} = 0$.

On peut donc attribuer à chaque bande un numéro d'ordre qui est celui d'arrivée.

A un moment déterminé, les points neutres ou tels que $\sigma_1 - \sigma_{11} = 0$ étant numérotés 0, les bandes d'extinction qui les entourent et qui en sont les plus proches seront numérotées 1, les suivantes 2, et ainsi de suite. L'aspect général des bandes d'extinction et l'évolution qu'elles ont subi lorsque la charge croissait, permet en outre de fixer le numéro de toutes les bandes, même de celles qui n'entourent pas les points noirs fixes.

Il apparaît donc que l'examen des courbes d'extinction en cours de formation permet de préciser de suite la position des points neutres le long des contours de la pièce et celle des points les plus sollicités le long de ces contours. Les premiers donnent en principe le moyen de mettre en place les points d'inflexion.

Mais, outre cela, on sait que d'une bande d'extinction à la suivante, il y a une variation constante de la différence des tensions principales donnée par la formule ([8], §§ 209 et 209bis) :

$$\Delta |\sigma_1 - \sigma_{11}| = \frac{\lambda}{k.e} \quad (55)$$

λ étant la longueur d'onde de la lumière monochromatique, e étant l'épaisseur de la plaque dans laquelle a été découpée la pièce et k étant une constante spécifique de la matière.

Comme on le sait, dans la zone où le contour d'une pièce n'est pas chargé, il n'existe qu'une seule tension principale; celle agissant sur les facettes perpendiculaires au contour, l'autre est nulle. C'est le cas qui se présente pour les anneaux, sauf aux endroits où s'exerce le contact entre les charges extérieures et l'anneau. Mais ces contacts sont très localisés pour les anneaux qui sont en jeu ici. Il y a là une grande accumulation de lignes isochromatiques; cette zone aux alentours du point de contact entre très rapidement en plasticité quand la charge croît, auquel cas elle apparaît noire sur les photographies; cela empêche d'y distinguer clairement ce qui s'y passe. En conséquence, on fera ici abstraction de la zone de contact elle-même.

Puisque aux contours, sauf dans cette zone, une des tensions principales est nulle, soit σ_{11} par exemple, au point où une bande d'extinction aboutit au contour, son numéro d'arrivée, qui est en quelque sorte sa cote, est représentatif de σ_1 .

Ayant doté chaque courbe d'extinction du numéro qui est le sien, on peut donc tout le long du contour tracer à une échelle conventionnelle le diagramme polaire de la tension dirigée tangentiellement au contour. Ce diagramme passe évidemment par zéro aux points neutres.

La figure 31 montre en traits interrompus les résultats de l'application de ce procédé pour les anneaux tels que $\lambda = 0,501 \cong 1/2$.

Le diagramme en traits pleins donne les résultats du calcul fait par les formules de l'élasticité.

On voit l'excellente concordance entre les deux figures. Ceci confirme bien les résultats obtenus par le calcul et montre, d'autre part, l'utilité d'un essai photo-élastique. Si, par exemple, une pièce a une forme pour laquelle on ne peut calculer les tensions, un essai photo-élastique permet néanmoins de se représenter aisément la sollicitation au contour.

Le calcul a été effectué pour le cas où les forces agissent à l'intrados de l'anneau. Les points neutres se placent à l'intrados et à l'extrados respectivement aux angles polaires de $58^{\circ},2$ et $45^{\circ},9$.

L'expérience a donné pour ces mêmes angles et dans les mêmes conditions de sollicitation $58^{\circ},6$ et 44° (photo P-27).

La concordance est donc excellente.

Diagramme polaire de la tension circonférentielle aux contours intrados et extrados.

$$\lambda = \frac{r_i}{r_e} = \frac{1}{2}$$

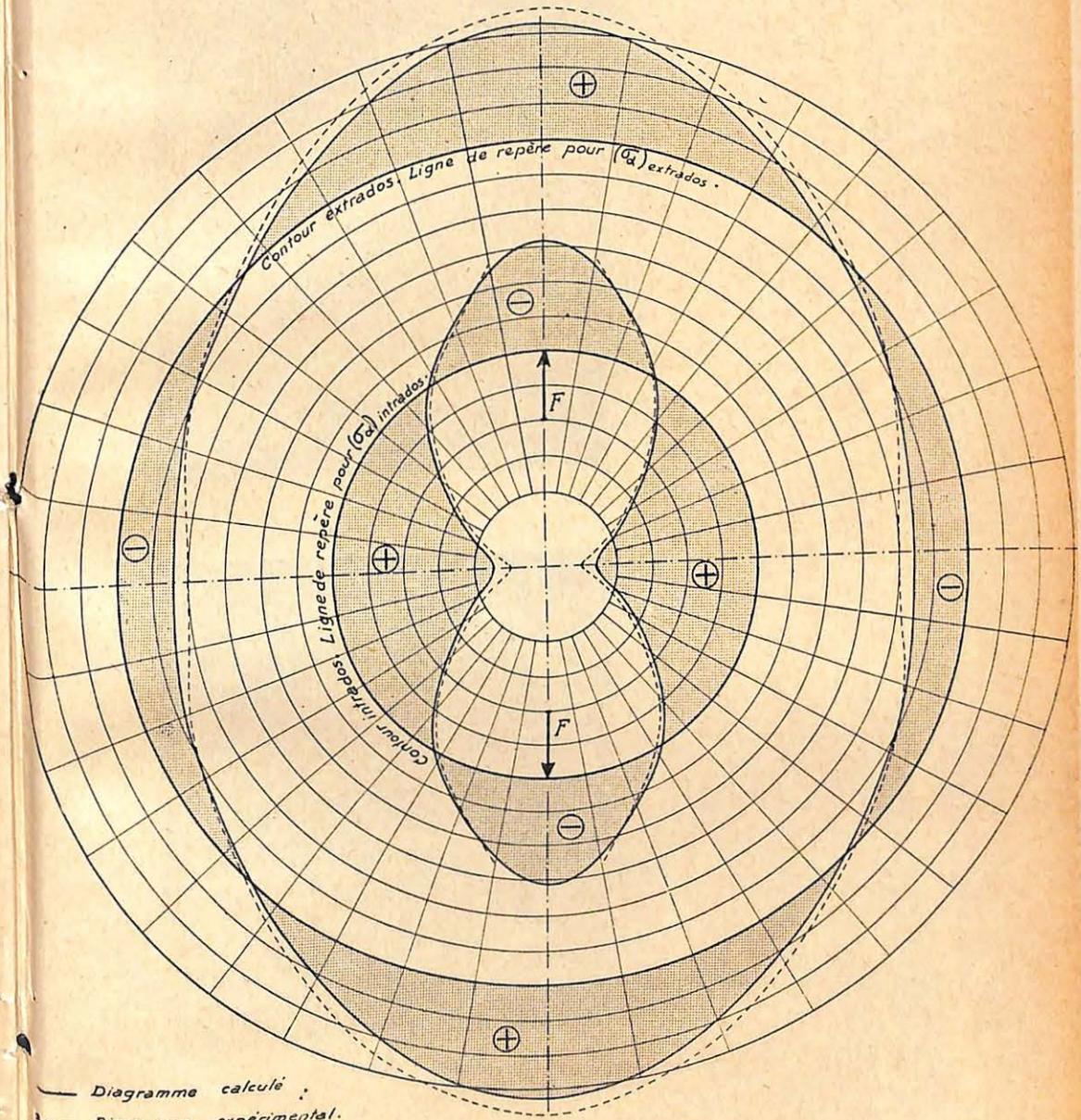


Fig. 51.

Photo P-20.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_0} = 0,845.$$

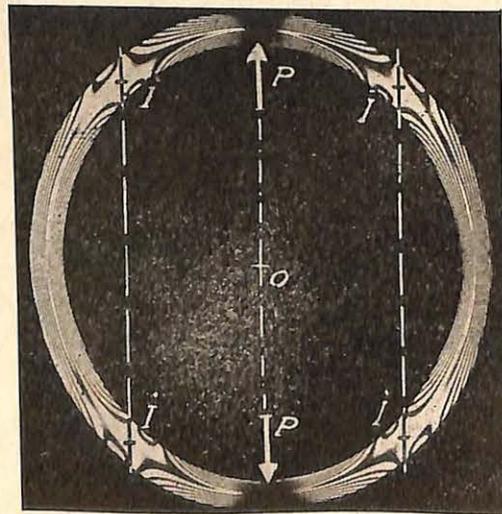
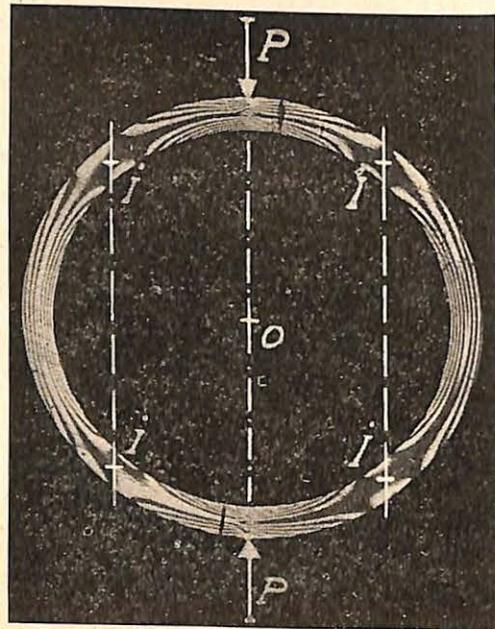


Photo P-21.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_0} = 0,845.$$

Photo P-22.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_0} = 0,724.$$

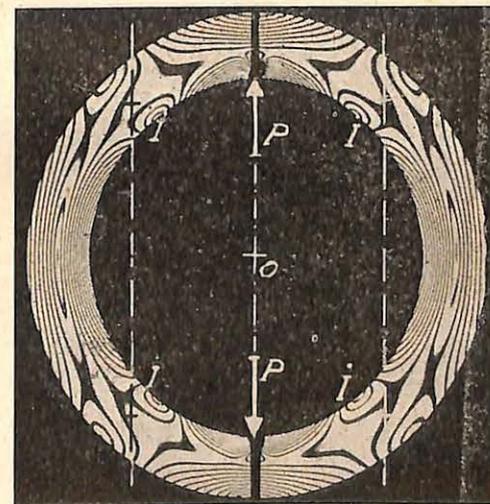
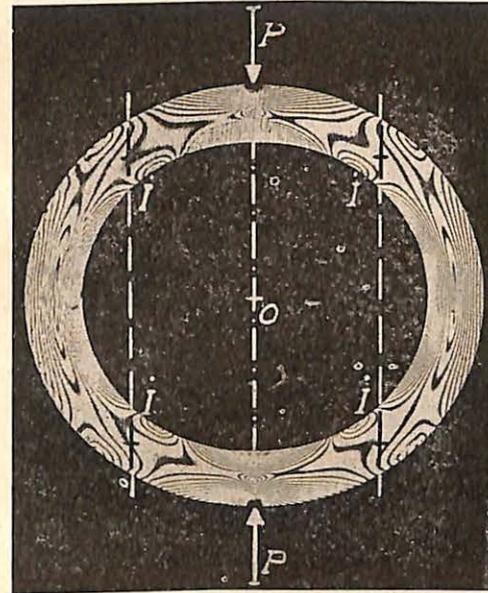


Photo P-23.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_0} = 0,724.$$

Photo P-24.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e} = 0,656.$$

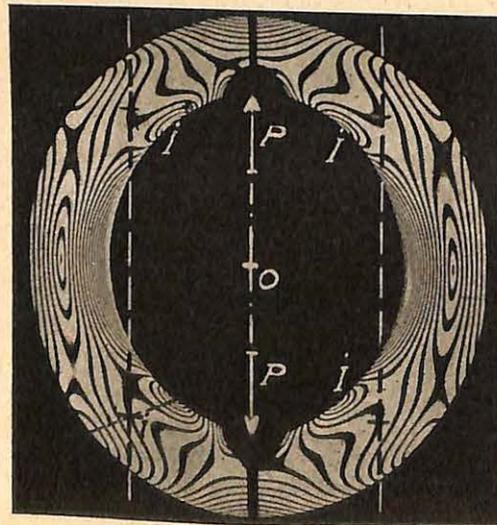
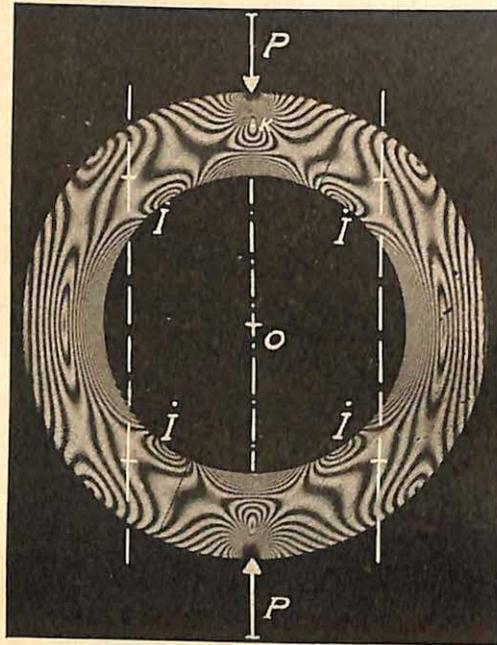


Photo P-25.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e} = 0,656.$$

Photo P-26.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e} = 0,501.$$

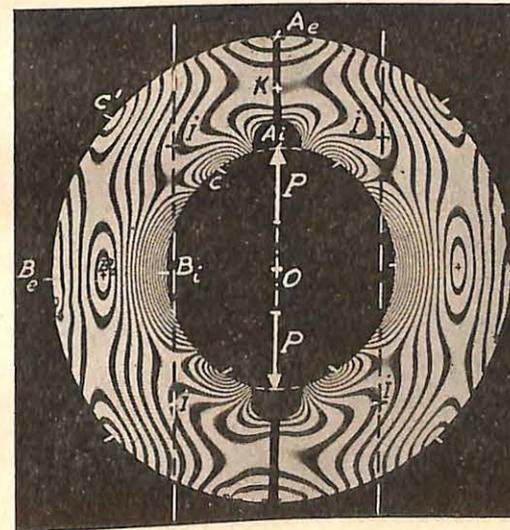
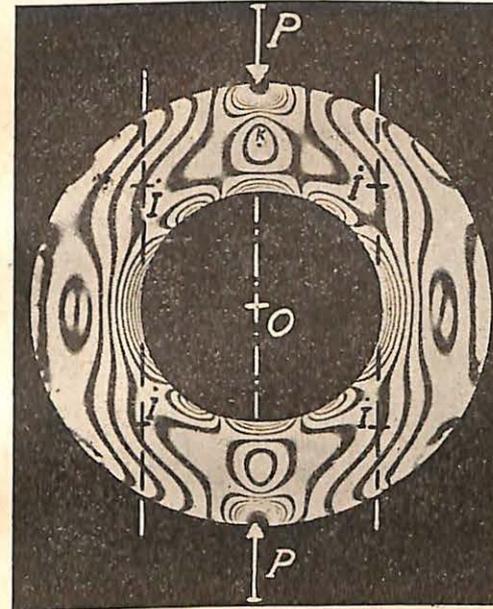


Photo P-27.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e} = 0,501.$$

Photo P-28.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e} = 0,384.$$

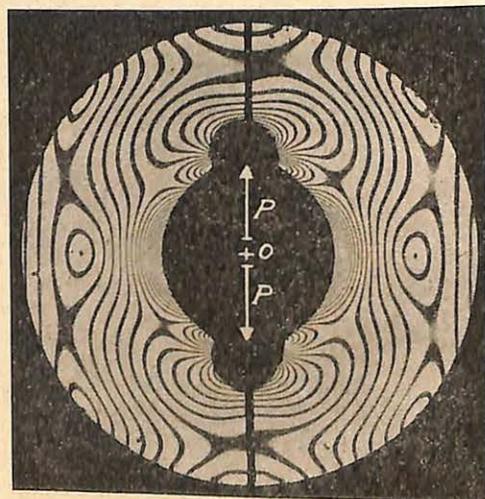
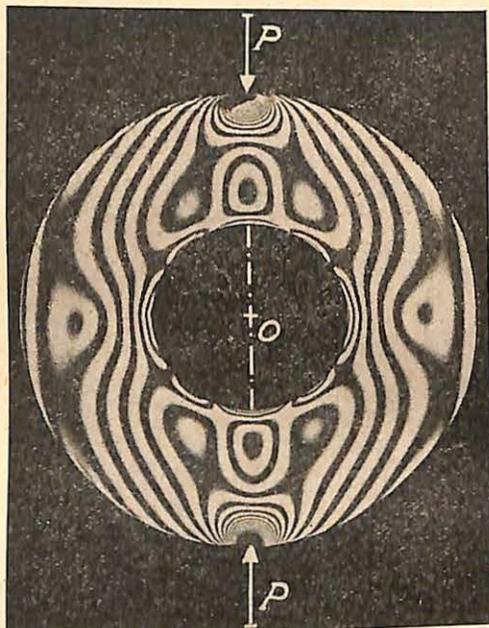


Photo P-29.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e} = 0,384.$$

Photo P-30.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e} = 0,270.$$

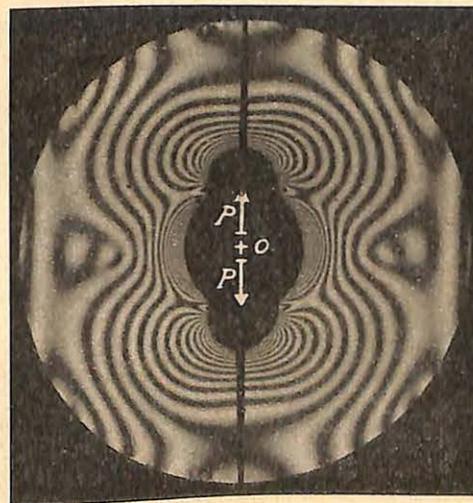
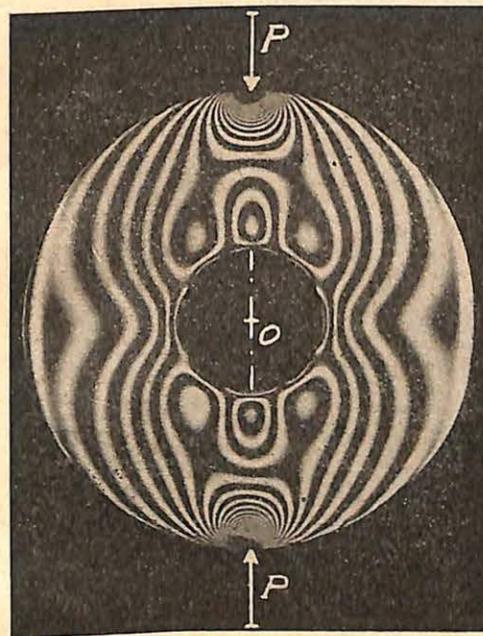


Photo P-31.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_1}{r_e} = 0,270.$$

Photo P-52.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_i}{r_e} = 0,152.$$

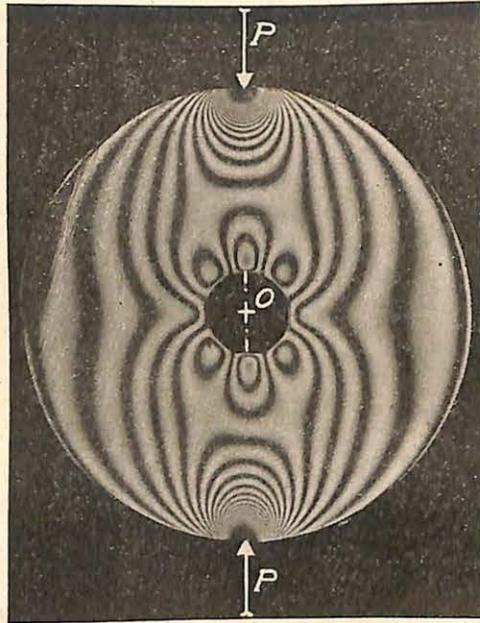


Photo P-55.

Lignes isochromatiques.

$$\lambda = \frac{r_i}{r_e} = 0,152.$$

E. — OBTENTION EXPERIMENTALE DU DIAGRAMME
DES TENSIONS NORMALES DANS LA SECTION
TRANSVERSALE DE L'ANNEAU SITUÉE SUIVANT
LE DIAMETRE BB NORMAL A LA DIRECTION
DES CHARGES EXTERIEURES

27. — La section transversale considérée est une section de symétrie, la trace de cette section est donc confondue avec la ligne isostatique transversale et avec une partie de l'isocline 0° .

On obtient de suite les tensions normales aux points intrados B_i et extrados B_e de cette section. On sait, en effet, qu'en ces points la tension principale radiale σ_r est nulle, la matière se trouve donc en état simple de traction, caractérisé par la seule valeur de la tension circonférentielle $\sigma_1 = \sigma_a$. Cette tension est donc proportionnelle au numéro d'arrivée de la bande isochromatique qui passe en cet endroit.

Ainsi, pour la photographie P-23, on voit que, en valeur absolue :

$$\left| \frac{\sigma_{B_e}}{\sigma_{B_i}} \right| = \frac{11,2}{7,2} = 1,56$$

ce qui est confirmé très sensiblement par la photographie P-22.

A une certaine échelle, σ_{B_e} et σ_{B_i} peuvent donc être représentés

respectivement par des nombres proportionnels à 11,2 et à 7,2.

On s'assure de suite que ces deux valeurs ne sont pas compatibles avec un diagramme rectiligne pour la tension σ_1 et que nécessairement ce diagramme est nettement curviligne.

En traçant le diagramme de variation du numéro d'arrivée des bandes d'extinction en fonction de leur abscisse le long de la section B, on a le diagramme de la différence $\sigma_r - \sigma_a$ des tensions principales.

Pour déterminer suffisamment le diagramme de σ_1 , il faudrait connaître un troisième point. Le plus logiquement, c'est le point du diagramme situé à l'aplomb du point B_0 d'extinction permanente en photo-élasticité. Ce point apparaît très clairement sur les photographies. On sait qu'il correspond au fait que les deux tensions principales y sont égales et de même signe. Si l'on en connaissait la somme, leur valeur serait donc connue. Il existe des moyens de déterminer cette somme expérimentalement.

Mais pour les cas où la résistance des matériaux semble suffire ($\lambda = r_1/r_0 \approx 0,6$), le diagramme des tensions σ_α répondra très sensi-

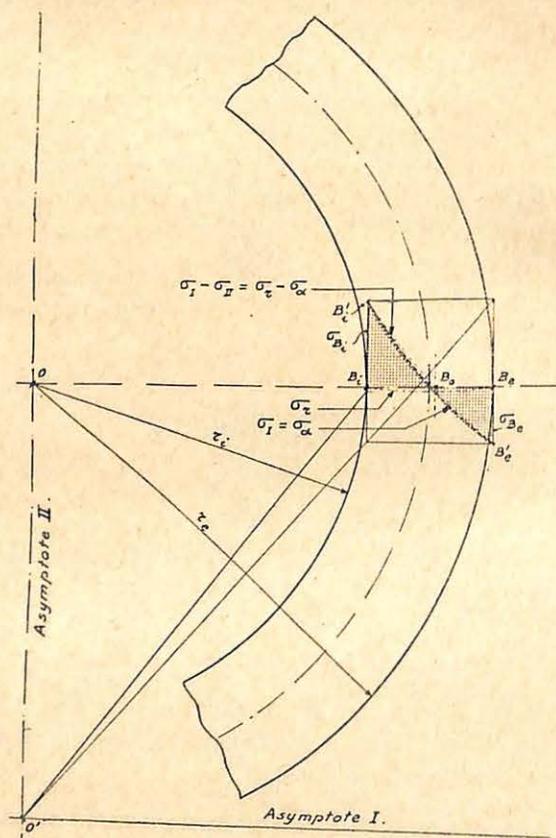


Fig. 52. — Diagramme de la tension circonférentielle dans la section BB (calcul graphique).

blement à la loi indiquée par cette théorie dans la section B. On a vu que cette loi est alors une hyperbole équilatère (§ 5, formule 6) :

$$\sigma_\alpha = \frac{1}{1 + z'/\rho'} \left[\frac{N}{\Omega} + \frac{M'z'}{I'} \right] \quad (6)$$

On peut calculer point par point au moyen de cette formule, le diagramme de σ_α dans la section BB (fig. 52, relative à l'anneau de la photographie P-25).

Il est possible de faire le contrôle indirect suivant : Supposer que la loi est l'hyperbole équilatère en question et en rechercher les asymptotes. L'une d'entre elles est la droite qui passe au centre de courbure de l'anneau, l'autre se détermine graphiquement assez aisément, puisqu'on a deux points et une asymptote de cette hyperbole équilatère. Or, la théorie de la résistance des matériaux indique que cette seconde asymptote est distante de $M' \cdot \rho' / I'$ du niveau représentant la trace de la section (fig. 5). Donc, $OO' = M' \cdot \rho' / I'$.

Pour trouver expérimentalement ce diagramme, on peut procéder, à partir de la connaissance des isochromatiques, à une intégration le long de l'isostatique confondue avec la trace de la section BB ([8], chap. IX, p. 459). Le diagramme obtenu doit concorder très sensiblement avec l'hyperbole équilatère dont il est question ci-dessus.

28. — Tout ceci permet d'affirmer que lorsque $\lambda = r_1/r_0 \approx 0,6$, la formule (6) de la tension normale σ_α des pièces courbes à forte courbure relative sollicitées par flexion plane se trouve parfaitement confirmée. L'auteur anglais Coker avait d'ailleurs déjà constaté le fait.

D'autre part, tout indique en conséquence que la photo-élasticité donne le diagramme des σ_α également pour les cas où la formule de la résistance des matériaux n'est plus valable, mais doit être remplacée par les formules de la théorie de l'élasticité.

F. — RESUME DES RESULTATS ACQUIS
PAR LE CONTROLE DES ANNEAUX
PAR LA PHOTO-ELASTICITE

29. — Nous avons réalisé toute une suite d'essais au banc photo-élastique sur une série complète d'anneaux dont les rapports caractéristiques $\lambda = r_i/r_e$ variaient de 0,845 à 0,152, comme l'indique le tableau ci-après résumant les résultats obtenus.

Pour l'observation des lignes isochromatiques ou bandes d'extinction, nous avons utilisé comme matière transparente le trolon et la dekorit (ce sont des résines artificielles). Le trolon et la dekorit ne diffèrent guère l'un de l'autre que par le recuit qu'ils ont subi. Observons cependant que la dekorit est plus déformable que le trolon.

Pour l'observation des isoclines, nous avons utilisé le plexiglas.

Les essais photo-élastiques ont été faits en lumière verte monochromatique polarisée circulairement, obtenue en éliminant par un filtre toutes les radiations autres que la raie verte $5.460,9 \text{ \AA}$.

Les courbes isochromatiques ou bandes d'extinction s'étudient le mieux en lumière polarisée circulaire, ce qui évite l'apparition simultanée des isoclines, lesquelles gêneraient l'observation des isochromatiques.

Les plaques de trolon, de dekorit et de plexiglas dans lesquelles les anneaux ont été découpés avaient 5 mm. d'épaisseur.

30. — Les essais photo-élastiques donnent très remarquablement :

La position des points neutres à l'intrados et à l'extrados de l'anneau;

La position des autres points singuliers du réseau des lignes isostatiques;

La position des points d'inflexion, au moins pour les anneaux tels que :

$$\lambda = \frac{r_i}{r_e} > 0,55.$$

Le diagramme des tensions circonférentielles à l'intrados et à l'extrados;

Le diagramme des tensions normales σ_a dans toute l'étendue de la section B.

Dans le cas où la position des points d'inflexion est très nette, on sait (§ 9, 1°, fig. 14) que la sollicitation de l'anneau est immédiatement connue. En effet, le vecteur sollicitant la section transversale passant par le point d'inflexion s'appuie sur ce dernier et est dirigé parallèlement au diamètre de charge, il est donc immédiatement mis en place.

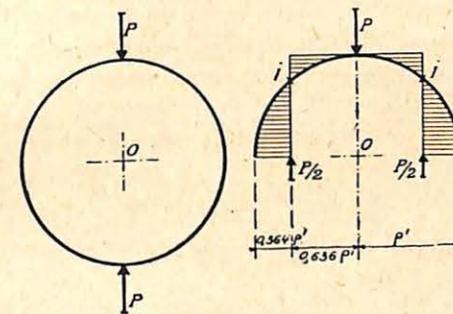


Fig. 35. — Sollicitation d'un demi-anneau.

La figure 35 montre ce résultat (*). L'orientation de ce vecteur est bien conforme à ce qu'indique la théorie de la région voisine du point d'inflexion : la droite qui joint les points neutres est, par rapport à la trace de la section, trois fois moins inclinée (et en sens inverse) que le vecteur sollicitant.

Ces essais montrent bien que toutes les conséquences annoncées par la théorie ordinaire de la résistance des matériaux, dans les limites de l'élasticité, sont confirmées expérimentalement, pour autant que le rapport $\lambda = r_i/r_e \geq 0,6$ ou que le rapport $h/2\rho < 0,25$.

(*) Cette figure est extraite de : « Etude de la résistance des volants », par L. Baes et L. Blanjean. Revue « Standards », Bruxelles, nos 6, 7 et 8 de 1938.

Ces limites couvrent tous les cas pratiques courants.

La confiance dans les formules de la résistance des matériaux peut donc être complète pour ces cas.

31. — Ces essais montrent également que, en dehors de ces limites de proportions, les formules de la théorie de l'élasticité sont confirmées, notamment pour ce qui concerne le diagramme des tensions circonférentielles à l'intrados et à l'extrados (fig. 51).

32. — Disposant donc d'un moyen expérimental très efficace, nous avons pensé utile de confronter le cas où l'anneau est sollicité par deux forces diamétrales de traction, appliquées à l'intrados, et celui où il est sollicité par deux forces diamétrales de compression appliquées à l'extrados. La théorie ordinaire de la résistance des matériaux ne fait pas de distinction entre les deux cas, sinon au point de vue des signes.

En revanche, la théorie de l'élasticité fait une distinction très nette entre les deux cas, tenant compte de l'endroit de la localisation des forces appliquées.

Nous donnons en annexe les formules, que nous avons établies, exprimant les tensions pour le cas des deux charges de compression; ces formules diffèrent des formules (51) à (56) indiquées précédemment pour le cas des deux charges de traction.

Puisque, pour les deux cas, les formules de tension sont différentes, les bandes d'extinction ont évidemment des formes différentes. Si les aspects de figures des bandes d'extinction diffèrent sensiblement, c'est que les deux cas sont nettement distincts.

De plus, la théorie de la résistance des matériaux localise les points d'inflexion sur les alignements parallèles au diamètre de charge, à une distance de $0,518 \cdot (2\rho')$ de part et d'autre de ce diamètre (fig. 14).

Les photographies P-20 à P-35 montrent la situation des deux cas. Elles font apparaître que pour les cas où :

$$\lambda = \frac{r_i}{r_e} = 0,501; 0,584; 0,270; 0,152.$$

il n'est plus possible de définir la position des points d'inflexion, et que d'ailleurs il y a une distinction très nette entre les deux problèmes de charges de traction et de charges de compression. Cette distinction concerne notamment la position des points neutres sur les contours et le groupement des bandes d'extinction dans la section B, sur le diamètre transversal aux charges. Or, la résistance des matériaux ne distingue pas les deux cas.

Le tableau suivant montre les résultats obtenus pour ces deux cas de sollicitation :

$\lambda = \frac{r_i}{r_e}$	Charge à l'extrados		Charge à l'intrados	
	Photo n°	Excentricité en % de $(2\rho')$	Photo n°	Excentricité en % de $(2\rho')$
0,845	20	51,5	21	51,8
0,724	22	51,9	25	52,0
0,656	24	51,8	25	55,5
0,501	26	55,4	27	55,2
0,584	28	—	29	—
0,270	30	—	31	—
0,152	32	—	35	—

N. B. — La résistance des matériaux donne une excentricité de $51,8 \% \cdot (2\rho')$.

33. — Tout cela confirme donc très nettement que dès que les proportions de l'anneau sont telles que $\lambda = r_i/r_e < 0,6$, le calcul doit être fait par la théorie de l'élasticité, tandis que pour les anneaux moins épais, le calcul peut se faire par la résistance des matériaux.

Conclusion importante. — La photo-élasticité permet de déterminer aisément la limite d'application de formules basées sur des hypothèses simplificatrices, et empêche que l'on analyse d'une manière incorrecte les cas qui échappent à ces formules.

III. - RELATION DES ESSAIS EFFECTUES SUR ANNEAUX EN FER OU EN ACIER

34. — En vue de vérifier expérimentalement, sur pièces réelles métalliques, l'exactitude des formules données ci-avant, nous avons effectué des essais sur un lot de 22 anneaux. Nous donnons, ci-joint, un tableau résumant les principaux résultats obtenus. Toutefois, certains de ces essais appellent quelques remarques. Les anneaux étaient sollicités par deux forces de traction radiales, égales et diamétralement opposées.

35. — CARACTERISTIQUES DES SERIES D'ANNEAUX ESSAYES.

1°) Métaux utilisés.

Les anneaux se partageaient en trois séries de dimensions identiques; nous avons en outre quatre anneaux hors série. Chacune des séries était faite d'un métal différent. Les métaux étaient désignés :

Acier D des unifiés français (trempé à l'eau à 875°, revenu à 625°);

Fer 5;

Fer S (fer de Suède).

Nous avons essayé des éprouvettes de traction de chacun de ces trois métaux. Les résultats obtenus sont les suivants :

Métal.	Tension limite apparente d'élasticité R_e en kg/mm ²	Tension de rupture R_r en kg/mm ²	Allongement de rupture pris sur 10 ϕ , en %	Striction en %	Dureté Brinell	
Acier D (traité)	51,3	51,5	68,4	18,4	66,4	217
	51,3		67,4	14,6	65,2	
Fer 5	24,8	25,9	57,6	28,5	58,4	99,2
	27,0		55,4	24,1	46,7	
Fer S	17,95		29,0	58,1	78,8	71,6

Les diagrammes de ces essais de traction sont reproduits par les figures 34 à 36.

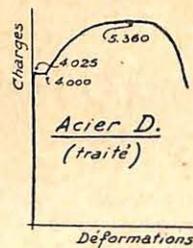


Fig. 54. — Diagramme de l'essai de traction de l'acier D.

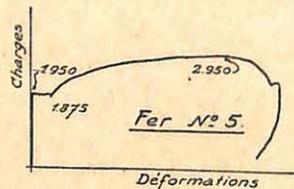


Fig. 55. — Diagramme de l'essai de traction du fer n° 5.

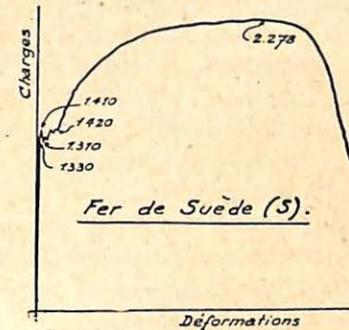


Fig. 56. — Diagramme de l'essai de traction du fer de Suède.

2°) Tableau des résultats des essais sur anneaux.

Le tableau ci-après donne pour chaque anneau les caractéristiques suivantes :

Dans la colonne n° :

- 1 : un numéro d'ordre de l'anneau;
- 2 : la désignation du métal dont est fait l'anneau;
- 3 : le diamètre $d = 2.a$ de la barre;
- 4 : le rayon ρ du centre de gravité G de la section transversale;
- 5 : le rayon ρ' du centre de gravité G' de la section transversale transformée;
- 6 : le rapport $\lambda = r_1/r_e$, caractéristique de la courbure relative;
- 7 : la tension normale σ_{max} de flexion qui se produit dans l'anneau lorsque celui-ci est soumis à deux forces de traction F de 1.000 kgs chacune. Cette tension est celle qui se produit à l'extrados de la section A, c'est-à-dire de la section couchée suivant l'axe de la charge, quand $\lambda \approx 0,6$, car pour $\lambda < 0,6$, la tension maximum se produit en B à l'intrados; cette tension répond à la formule :

$$\sigma_{max} = \frac{1}{1 + v'/\rho'} \cdot \frac{F}{\pi} \cdot \frac{\rho' \cdot v'}{l'} \quad (57)$$

ce qui devient pratiquement ici, en confondant ρ' et ρ :

$$(\sigma_{max})_{\text{en A}} = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + \rho/a} \cdot \frac{F}{2 \Omega} \quad (58)$$

Ω étant l'aire de la section transversale de la barre;

- 8 : la force F_e qu'il faudrait appliquer à l'anneau pour que la tension maximum soit égale à la tension R_e , limite apparente d'élasticité, constatée par l'essai de traction simple du métal;
- 9 : la force F_p pour laquelle on constate expérimentalement les premières déformations permanentes du diamètre BB , transversal à la charge;
- 10 : le rapport F_p/F_e de la charge qui fait constater une déformation permanente du diamètre BB , à la charge pour laquelle la tension maximum à l'extrados des sections A atteint la limite apparente R_e ;
- 11 : la flèche diamétrale f_B calculée, variation du diamètre de l'anneau normal au diamètre suivant lequel sont placées les charges. Cette flèche est calculée par la formule 50 :

$$f_B = \frac{F}{E \cdot I'} \cdot \rho^3 \left\{ \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\Omega'} \cdot \frac{1}{\rho^2} \left(1 - \xi \cdot \frac{E}{G} \right) \right\} \quad (50)$$

Les calculs ont été faits pour la simplicité avec $E = 20.000 \text{ kg./mm}^2$.

12 : la flèche diamétrale f_B réellement observée lors des essais.

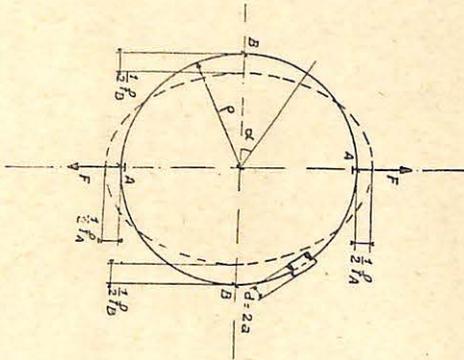


Fig. 57. — Flèches prises par l'anneau déformé.

Résultats des essais effectués sur les anneaux (fig. 57).

1. No	2. Métal.	3. $d = 2a$ mm.	4. ρ mm.	5. ρ' mm.	6. $\lambda = \frac{\tau_i}{\tau}$	7. Pour $F=1.000 \text{ kg.}$ $\sigma \text{ max.}$ kg./mm^2	8. Pour la limite élastique $\sigma \text{ max.} = R_e$			11. Pour $F = 100 \text{ kg.}$	
							8. F_e calculée kg.	9. F_p réelle kg.	10. $\frac{F_p}{F_e}$	11. f calculée avec $E = 20.000 \text{ kg./mm}^2$ mm	12. f réelle mm
1	D	25,0	50	49,206	0,600	8,549	6,005	7,000	1,165	0,004,4	0,004,3
4	»	»	75	74,475	0,714	13,712	3,745	3,750	1,000	0,014,5	0,012,6
7	»	»	100	99,608	0,778	18,882	2,760	3,750	1,360	0,033,6	0,031,7
10	»	»	125	124,684	0,818	24,056	2,140	2,500	1,168	0,065,1	0,063,1
13	»	»	150	149,738	0,847	29,231	1,757	2,200	1,346	0,112,3	0,104,6
16	»	»	175	174,776	0,867	34,542	1,486	2,000	1,346	0,177,7	0,168,0
19	»	20,5	60	59,573	0,719	19,806	2,592	3,000	1,178	0,016,9	0,015,5
20	»	»	»	»	»	»	»	3,400	1,336	»	0,015,0
2	5	25,0	50	49,206	0,600	8,549	3,030	3,750	1,237	0,004,4	0,004,1
5	»	»	75	74,475	0,714	13,712	1,890	2,400	1,270	0,014,5	0,013,7
8	»	»	100	99,608	0,778	18,882	1,372	1,500	1,092	0,033,6	0,032,1
11	»	»	125	124,684	0,818	24,056	1,077	1,400	1,300	0,065,1	0,063,1
14	»	»	150	149,738	0,847	29,231	887	1,100	1,242	0,112,3	0,104,8
17	»	»	175	174,776	0,867	34,542	750	900	1,200	0,177,7	0,163,0
21	»	20,5	60	59,573	0,719	19,806	1,378	1,500	1,148	0,016,9	0,015,8
22	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,015,7
3	S	25,0	50	49,206	0,600	8,549	2,100	2,250	1,072	0,004,4	0,004,8
6	»	»	75	74,475	0,714	13,712	1,308	1,500	1,148	0,014,5	0,014,6
9	»	»	100	99,608	0,778	18,882	950	950	1,000	0,033,6	0,037,8
12	»	»	125	124,684	0,818	24,056	746	950	1,274	0,065,1	0,068,9
15	»	»	150	149,738	0,847	29,231	614	750	1,222	0,112,3	0,110,5
18	»	»	175	174,776	0,867	34,542	520	700	1,346	0,177,7	0,185,0

Remarque. — Pour tous les cas soumis aux essais, ρ' est pratiquement égal à ρ .

DESCRIPTION DE L'ESSAI D'UN DES ANNEAUX.

36. — Le diagramme d'un des essais est reproduit ici à deux échelles différentes (fig. 38 et 39). Les mesures de déformation du diamètre sont faites au moyen d'un comparateur donnant le 1/100 de millimètre et permettant d'apprécier le 1/1.000 de millimètre.

Les mesures portent sur la flèche diamétrale f de l'anneau (variation de longueur du diamètre horizontal perpendiculaire à la direction des forces appliquées). Les deux photographies P-54 et P-55 montrent le montage réalisé, soit avec le comparateur, soit avec l'extensomètre Huggenberger.

Constatons qu'une division de la montre, représentant 1/100 de millimètre, indique une flèche diamétrale relative de 1/10.000 si le diamètre initial est de 100 mm., et de 1/35.000 si le diamètre initial est de 350 mm. Or, on peut très bien apprécier le 1/5 de division, et même le 1/10.

La finesse du procédé de mesure est donc grande; d'ailleurs, la moindre fluctuation de l'effort est indiquée avec une plus grande netteté par ce montage que par les cadrans indicateurs de la machine d'Amstler employée aux essais.

Cette flèche diamétrale commence par être proportionnelle à la charge appliquée; on est manifestement dans la phase élastique. Si, dans cette phase, on redescend à une charge inférieure, on repasse par les mêmes points du diagramme de l'essai.

37. — A partir d'une certaine charge, on constate que les déformations croissent plus rapidement que les efforts appliqués; la limite de proportionnalité du métal est franchie dans une certaine zone de l'anneau. En revenant en arrière, par diminution de la charge, on ne repasse plus par les mêmes points du diagramme. Pour les anneaux essayés bruts de forge, des écailles d'oxyde commencent alors à se détacher de la surface de l'anneau. La charge F , pour laquelle la tension au point le plus sollicité de l'anneau atteint la limite apparente d'élasticité R_e de la matière, est assurément comprise entre la charge à partir de laquelle le diagramme charge-flèche cesse d'être rectiligne et la charge à partir de laquelle on constate, à l'aide du montage réalisé, que la flèche diamétrale de l'anneau n'est plus totalement élastique et comporte donc une partie permanente.

La première de ces charges (limite de proportionnalité) est évidemment impossible à relever strictement; la dernière de ces charges se relève par tâtonnement.

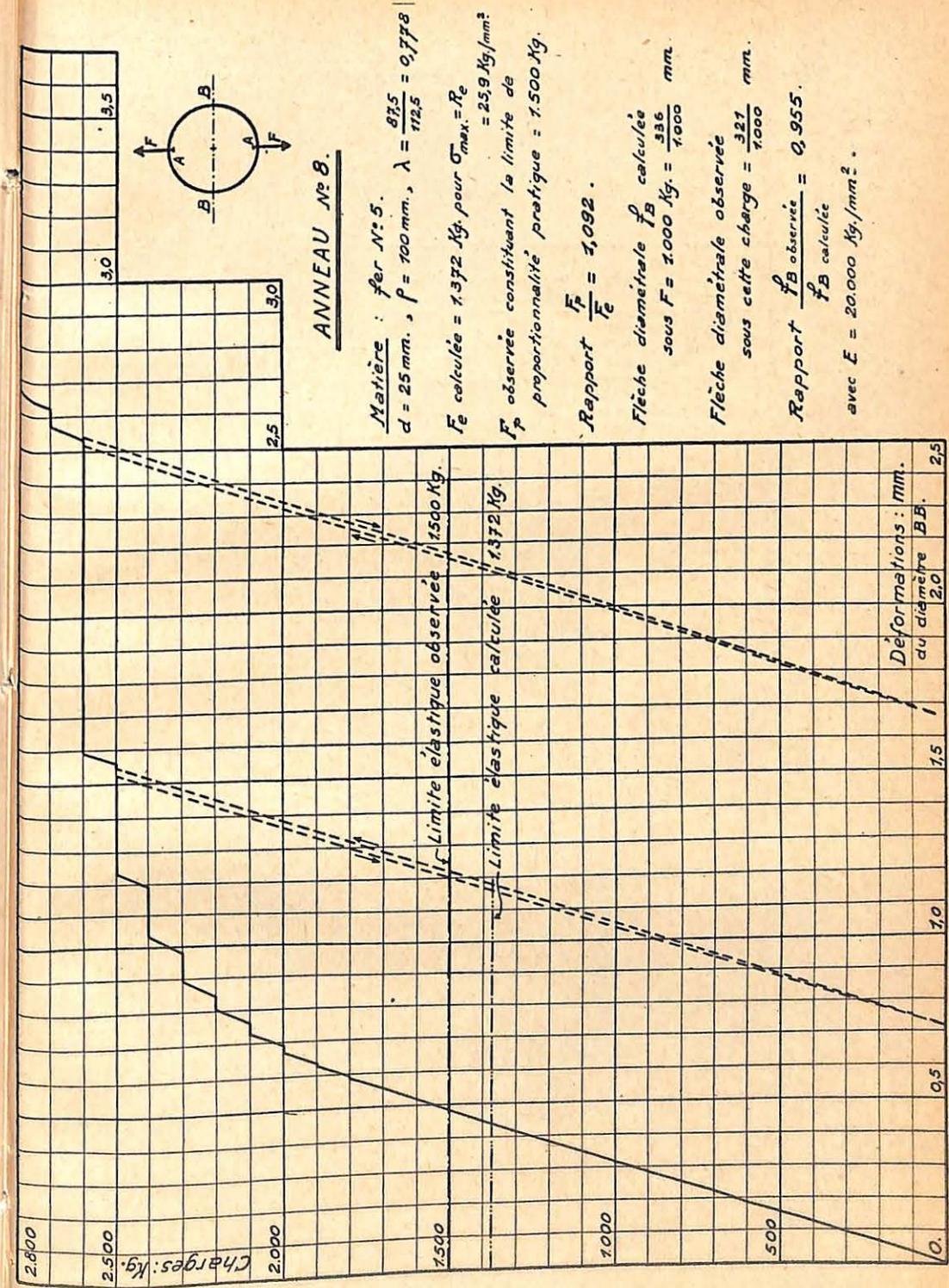


Fig. 38. — Diagramme de l'essai de traction de l'anneau n° 8 (reproduction à grande échelle du début du diagramme).

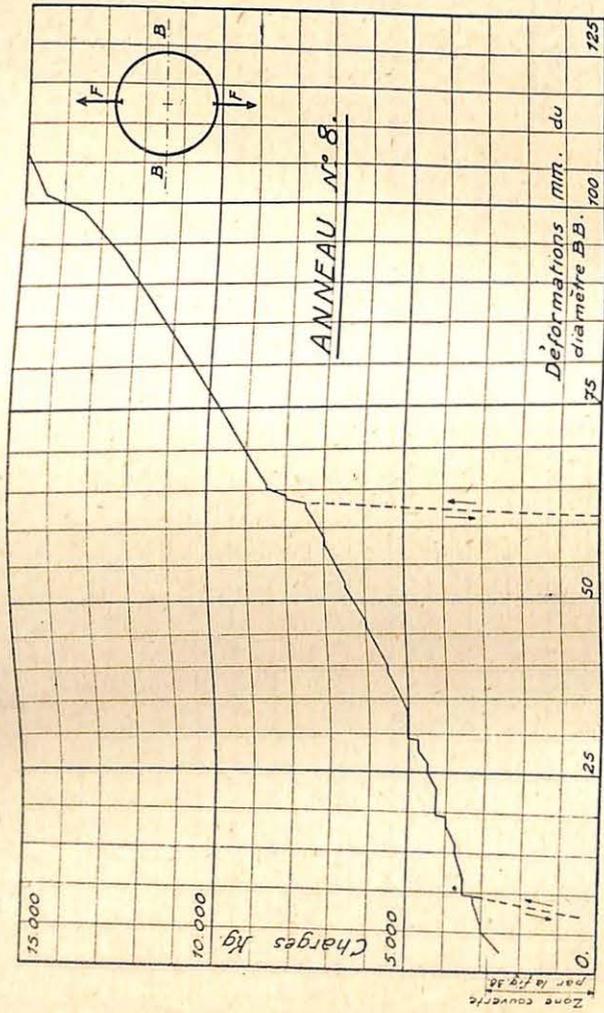


Fig. 59. — Diagramme de l'essai de traction de l'anneau n° 8

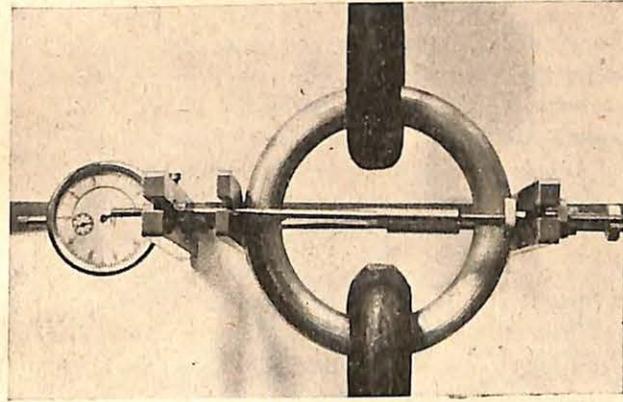


Photo P-54.
Montage
du comparateur.

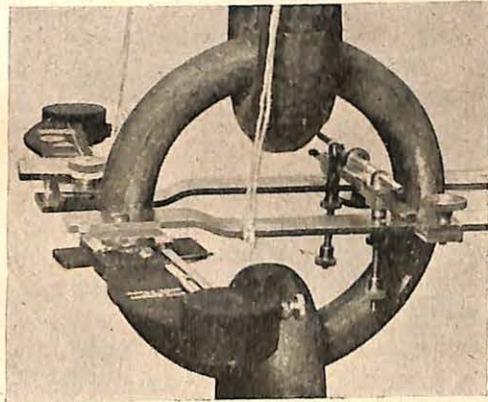


Photo P-55.
Montage
de l'extensomètre.

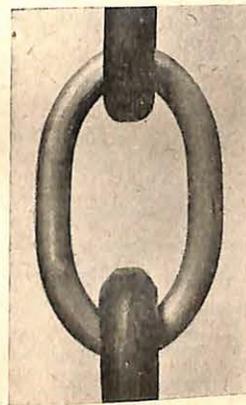


Photo P-56.
Anneau au cours
de la déformation.

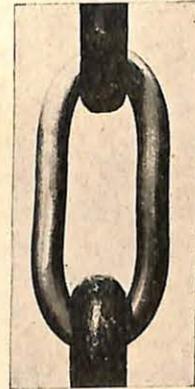


Photo P-57.
Anneau fortement
déformé.

On ne peut évidemment pas s'attendre à ce qu'une déformation permanente du diamètre BB se constate dès que la tension au point le plus sollicité des sections A atteint la limite R_e ; en effet, la déformation du diamètre BB est le résultat d'une intégration des déformations de tout l'anneau. Il est donc certain qu'une déformation permanente sensible ne se relève que lorsque la limite d'élasticité est franchie dans une région de l'anneau d'une étendue suffisante.

Le rapport F_p/F_e doit donc être supérieur à l'unité; il faut que les essais constatent nettement ce fait. C'est bien ce que l'on relève au tableau précédent. Ce rapport peut être variable avec les proportions de l'anneau et la nature du métal.

L'essai de l'anneau étant poursuivi, on constate que si l'on applique une charge supérieure à la charge F_p des premières déformations permanentes constatées de la flèche diamétrale, la déformation nouvelle ne se stabilise pas instantanément. Il faut laisser la charge constante pendant quelques temps, avant que la flèche diamétrale de l'anneau cesse de grandir sous cette charge. Le diagramme de l'essai marque donc un palier. Ce palier va croissant avec la charge et il en est de même de la durée de formation de ce palier. Cette durée a parfois atteint vingt minutes, sans que l'on puisse affirmer avoir au bout de ce temps réellement épuisé toute la déformation correspondant à cette charge. Dans certains cas, on a porté la durée de maintien d'une charge constante à plusieurs heures (ce que permettait la machine employée); ce n'est que pendant les premières parties de ce temps que l'on constatait un accroissement de la déformation.

L'action du temps est donc déjà très nettement marquée pour ce genre d'essais dès qu'il est poussé au delà de la limite d'élasticité.

Les diagrammes figures 38 et 39 obtenus par pointage montrent très bien le phénomène.

D'autre part, les diagrammes enregistrés par la machine d'Amsler font apparaître qu'à chaque nouvelle montée de la charge, la courbe monte d'abord presque verticalement pour rattraper une courbe en prolongement continu de la partie précédente arrêtée au moment où l'on a maintenu la charge constante. La reproduction à la figure 40 d'un diagramme d'essai de l'anneau 20 montre très bien ce phénomène.

Si, après être arrivé à une charge F_1 , on laisse redescendre à une charge F_2 , au lieu de maintenir F_1 constante, puis qu'on fasse remonter la charge à la valeur F_1 , les courbes de descente et de montée ainsi parcourues sont sensiblement parallèles à la première courbe de montée du début de l'essai.

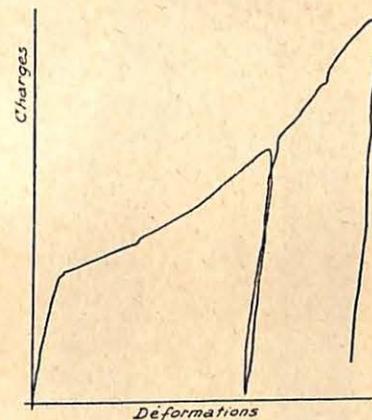


Fig. 40. — Reproduction du diagramme d'essai de l'anneau n° 20.

58. — Au fur et à mesure que grandit, au delà de la limite d'élasticité, la force à laquelle l'anneau est soumis, il se défigure de plus en plus et acquiert une forme tout à fait allongée, comme le montrent les photographies P-56 et P-57. On sait que le moment fléchissant agissant sur la partie de l'anneau proche du diamètre transversal aux charges est négatif, c'est-à-dire qu'il tend à diminuer la courbure de l'anneau. Elle décroît donc jusqu'à devenir nulle, mais il est évident que lorsque ce stade est atteint, le moment fléchissant existe toujours et poursuit son action dans le même sens. La conséquence en est que cette partie de l'anneau se courbe en sens inverse du sens primitif. L'anneau acquiert une forme de 8 aux très fortes charges; cela apparaît nettement sur la photo P-57. En poursuivant encore l'accroissement de la charge, l'anneau finit par se rompre (photographies P-58 et P-59).

Cette charge de rupture est considérable par rapport à la charge limite apparente d'élasticité. Par exemple, l'anneau 21, dont la

limite apparente d'élasticité était de 1.500 kg., ne s'est rompu qu'à 19.400 kg., c'est-à-dire à une charge égale à 12,94 fois la force donnant lieu au phénomène de la limite apparente d'élasticité; et encore, cet anneau s'est-il rompu dans une soudure en sifflet, car

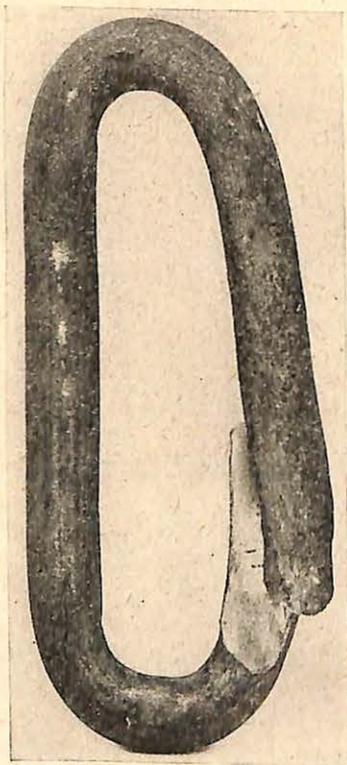


Photo P-58.

Anneau n° 21, après rupture (fer de Suède).
L'anneau est rompu dans une soudure en sifflet.

il était formé d'une barre droite pliée à chaud et soudée (photo P-58). La pièce commençait à s'écailler manifestement à 2.900 kg., la rupture a donc eu lieu quand on a appliqué à l'anneau une force 6,70 fois plus grande que celle qui fait apparaître les écailles et à laquelle, d'ailleurs, les déformations commencent à être nettement visibles à simple vue d'ensemble ($f_B = 1,78$ mm. pour l'anneau 21).

L'anneau circulaire présente donc une grande sécurité contre la rupture. Quand les déformations commencent à être nettement remarquées à simple vue, on dispose encore d'une grande marge avant la destruction.

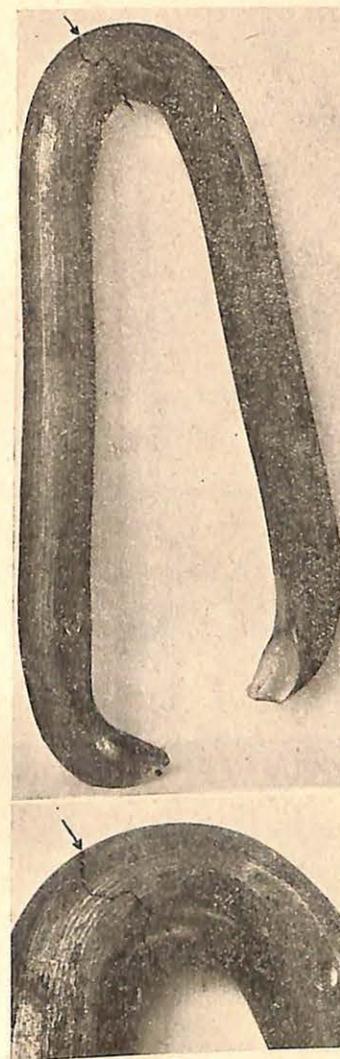


Photo P-59.

Anneau n° 20, après rupture (acier D, traité).
L'anneau est rompu hors de la zone de contact de la charge.
(Les fissures sont renforcées par les photographies.)

IV. - RESUME ET CONCLUSIONS PRATIQUES

A. — FORMULES

59. — Ce qui précède donne les formules des anneaux circulaires établies par deux méthodes différentes.

Première méthode, par la théorie de l'élasticité, qui ne fait aucune hypothèse simplificatrice.

Pour cette méthode, nous nous sommes contenté d'indiquer l'allure générale, sans entrer dans le détail algébrique, mais nous nous sommes surtout attaché à faire apparaître les relations directement utiles au point de vue pratique.

Ces relations, pour le cas de deux forces égales et diamétralement opposées, s'appliquant à l'intrados et sollicitant donc l'anneau en traction générale, sont :

Tension circonférentielle en A, à l'extrados :

$$(\sigma^A)_{\text{extrados}} = \frac{F}{r_{i.e}} \left\{ \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{1-\lambda^2} \right. \\
 \left. + \frac{4}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{n(1-\lambda^2)(1-\lambda^{2n})\lambda^n}{(1-\lambda^{2n})^2 - n^2\lambda^{2n-2}(1-\lambda^2)^2} \right\} \quad (35)$$

Tension circonférentielle en A, à l'intrados :

$$(\sigma^B)_{intrados} = \frac{F}{r_{i.e}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1+\lambda^2}{1-\lambda^2} \\ - \frac{2}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{2(1-\lambda^{2n})^2}{(1-\lambda^{2n})^2 - n^2 \lambda^{2n-2} (1-\lambda^2)^2} - 1 \right) \end{array} \right\} \quad (34)$$

Tension circonférentielle en B, à l'extrados :

$$(\sigma^B)_{extrados} = \frac{F}{r_{i.e}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{1-\lambda^2} \\ - \frac{4}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{(n/2)-1} \frac{n(1-\lambda^2)(1-\lambda^{2n})\lambda^n}{(1-\lambda^{2n})^2 - n^2 \lambda^{2n-2} (1-\lambda^2)^2} \end{array} \right\} \quad (35)$$

Tension circonférentielle en B, à l'intrados :

$$(\sigma^A)_{intrados} = \frac{F}{r_{i.e}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1+\lambda^2}{1-\lambda^2} \\ + \frac{2}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{(n/2)-1} \left(\frac{2(1-\lambda^{2n})^2}{(1-\lambda^{2n})^2 - n^2 \lambda^{2n-2} (1-\lambda^2)^2} - 1 \right) \end{array} \right\} \quad (36)$$

Dans ces formules, n est un nombre pair positif et $\lambda = r_i/r_e$.

On a vu que lorsqu'il est nécessaire de recourir à la théorie de l'élasticité, les formules pratiques ne sont pas les mêmes pour le cas où l'anneau est sollicité en traction générale et celui où l'anneau est sollicité en compression générale (par deux forces diamétralement

opposées agissant respectivement à l'intrados et à l'extrados). Dans ce second cas, dont les circonstances d'application sont très différentes de celles du premier cas, les formules à appliquer sont données à l'annexe I.

Pour l'application des formules (33) à (36), au calcul de très gros anneaux, seuls cas pour lesquels la théorie de l'élasticité s'impose, on peut se limiter, dans les séries, aux termes pour lesquels $n = 2, 4, 6, 8$, au lieu de devoir poursuivre jusqu'à de grandes valeurs de n .

Dans ces conditions, l'application numérique de ces formules n'est pas ardue; un exemple a été traité au § 16.

Deuxième méthode, par la résistance des matériaux.

Ici, le calcul se fait en utilisant les formules de la flexion d'une pièce longue courbe; on néglige les déformations des sections transversales et on suppose que celles-ci restent planes après, comme avant déformation. Alors que les formules obtenues par la théorie de l'élasticité sont valables pour tous les anneaux, même exceptionnellement gros, les formules obtenues par la résistance des matériaux ne sont pas valables pour les très gros anneaux.

Ces formules étant applicables pour autant que le rapport $\lambda \leq 0,60$, elles le sont pour tous les cas de la technique courante. Les essais tant mécaniques que photo-élastiques ont montré que ces formules étaient fort exactes pour tous les cas courants.

En fait, seuls les anneaux exceptionnellement épais exigent l'emploi des formules de la théorie de l'élasticité. D'ailleurs, pour un anneau déterminé, les formules de la résistance des matériaux conduisent à admettre une force portante plus faible que les formules de la théorie de l'élasticité. Au point de vue de la sécurité, il n'y a donc pas de danger à appliquer les formules de la résistance des matériaux.

La méthode par la résistance des matériaux se réduit au point de vue pratique à la formule générale (26), dans laquelle on se rappellera que z' est compté positif vers l'extrados et négatif vers l'intrados.

Cette méthode ne distingue pas, sinon par les signes, le cas de l'anneau soumis à une traction générale de celui de l'anneau soumis à une compression générale.

Pour l'un et l'autre cas :

α) pour les anneaux habituels, c'est-à-dire tels que $\lambda = r_i/r_e \leq 0,60$, la tension circonférentielle maximum se produit en A, à l'extrados des sections où s'appliquent les charges; on désigne ci-après par v' la valeur absolue du z' en ce point;

β) pour les anneaux épais, c'est-à-dire tels que $\lambda = r_i/r_e \geq 0,60$, la tension circonférentielle maximum se produit en B, à l'intrados des sections transversales au diamètre de charge; ci-après on désigne par v'' la valeur absolue du z' en ce point.

Dans le cas α, $\lambda \leq 0,60$, la formule à appliquer est donc :

$$(\sigma^A)_{\text{extrados}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + v'/\rho'} \cdot \frac{F}{l'/v' \cdot \rho'} \quad (60)$$

Dans le cas β, $\lambda \geq 0,60$, la formule à appliquer est donc :

$$(\sigma^B)_{\text{intrados}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{1 - v''/\rho'} \cdot \frac{F}{l'/v'' \cdot \rho'} \quad (61)$$

$$\times \frac{1}{2} \left[\frac{2}{\pi} - 1 + \frac{l'}{v'' \cdot \rho'} \cdot \frac{1}{\Omega} \right]$$

Ces formules ne présentent aucune difficulté d'application pour le calcul d'un anneau circulaire déterminé. Nous reproduisons deux graphiques qui en facilitent beaucoup l'emploi et qui, en outre, permettent l'établissement d'un anneau devant répondre à une sollicitation connue (fig. 41 et 42).

La figure 41 est établie sous forme relative et la courbe qui y est tracée est donc valable pour tous les anneaux. La première partie JJ' de cette courbe se rapporte aux anneaux relativement minces, c'est-à-dire aux cas de la technique courante, pour lesquels $\lambda \leq 0,60$; la

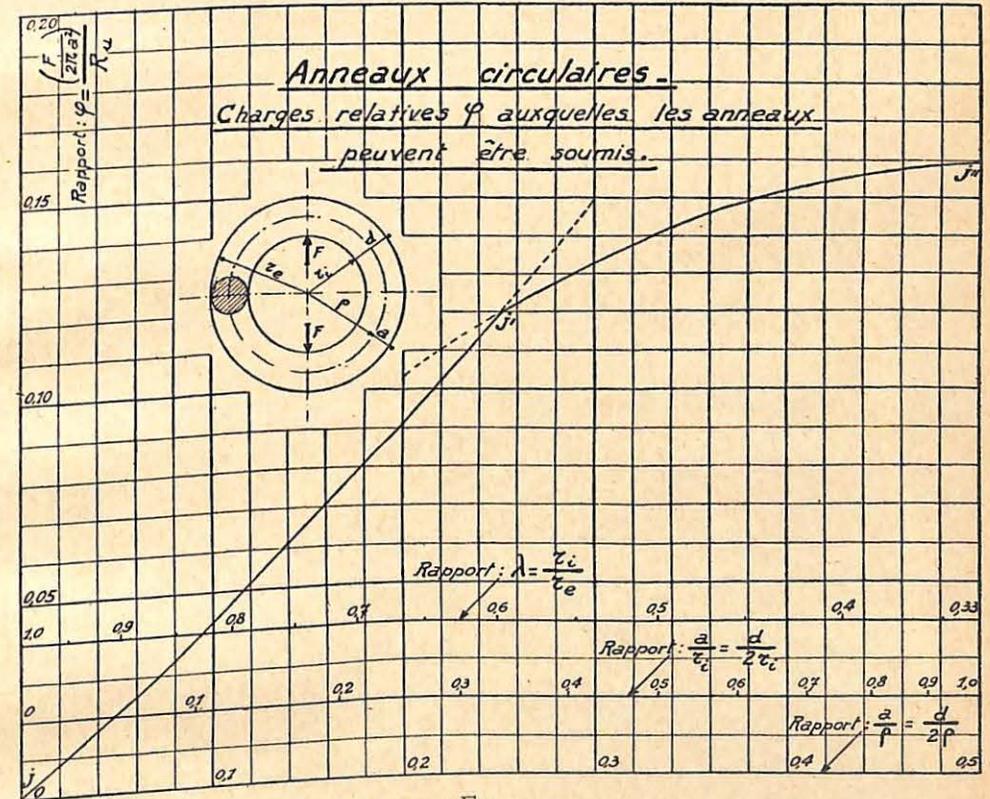


Fig. 41.

deuxième partie JJ'' concerne les anneaux relativement épais pour lesquels $\lambda \leq 0,60$.

Cette courbe donne le rapport $\varphi = \frac{(F/2\pi a^2)}{R_u}$ en fonction du

rapport a/ρ , ou de $d/2\rho$, ou de $d/2r_i$, ou de $\lambda = r_i/r_e$; R_u désigne la tension d'utilisation admissible.

La figure 42 présente une série de courbes couvrant tous les cas pratiquement rencontrés. Chaque courbe se rapporte à un diamètre intérieur déterminé et elle permet de trouver le quotient F/R_u en fonction du diamètre du fer de l'anneau. Inversement, ayant à faire supporter une charge connue, on obtient immédiatement les dimensions qu'il est possible de donner à l'anneau. Chaque courbe se compose de deux parties correspondant respectivement aux deux parties JJ' et JJ'' de la courbe de la figure 41. L'échelle des ordonnées est proportionnelle à la racine carrée des nombres représentés.

Occupons-nous spécialement du cas α ($\lambda \leq 0,60$), qui comprend presque tous les anneaux utilisés dans la pratique.

Dans ces conditions, la plus grande différence entre ρ et ρ' étant à peine égale à 1,6 % de ρ , on peut, sans erreur sensible, supposer $\rho' = \rho$ et $v' = a$.

La formule (60) peut s'écrire alors :

$$(\sigma^A)_{extrados} = 1,62 \cdot \frac{(2r_i/d + 1)^2}{(2r_i/d + 2)} \cdot \frac{F}{d^2}$$

On remarque, en outre, qu'à une erreur maximum de 6,67 % près, dans le sens de la sécurité, on peut, si $\lambda \leq 0,60$, simplifier et écrire :

$$(\sigma^A)_{extrados} = 1,62 \cdot \frac{2r_i}{d} \cdot \frac{F}{d^2} \quad (62)$$

Donc, en remplaçant $(\sigma^A)_{extrados}$ par R_u , tension d'utilisation admise, de cette dernière relation on tire la formule pratique :

$$d = \sqrt[3]{\frac{1,62}{R_u} \cdot F \cdot (2r_i)} \quad (63)$$

Forces portantes, en Kg., des anneaux :
 { $M = \text{mines} ; R_u = \frac{1}{3} R_e$
 $I = \text{industrie} ; R_u = \frac{1}{2,5} R_e$

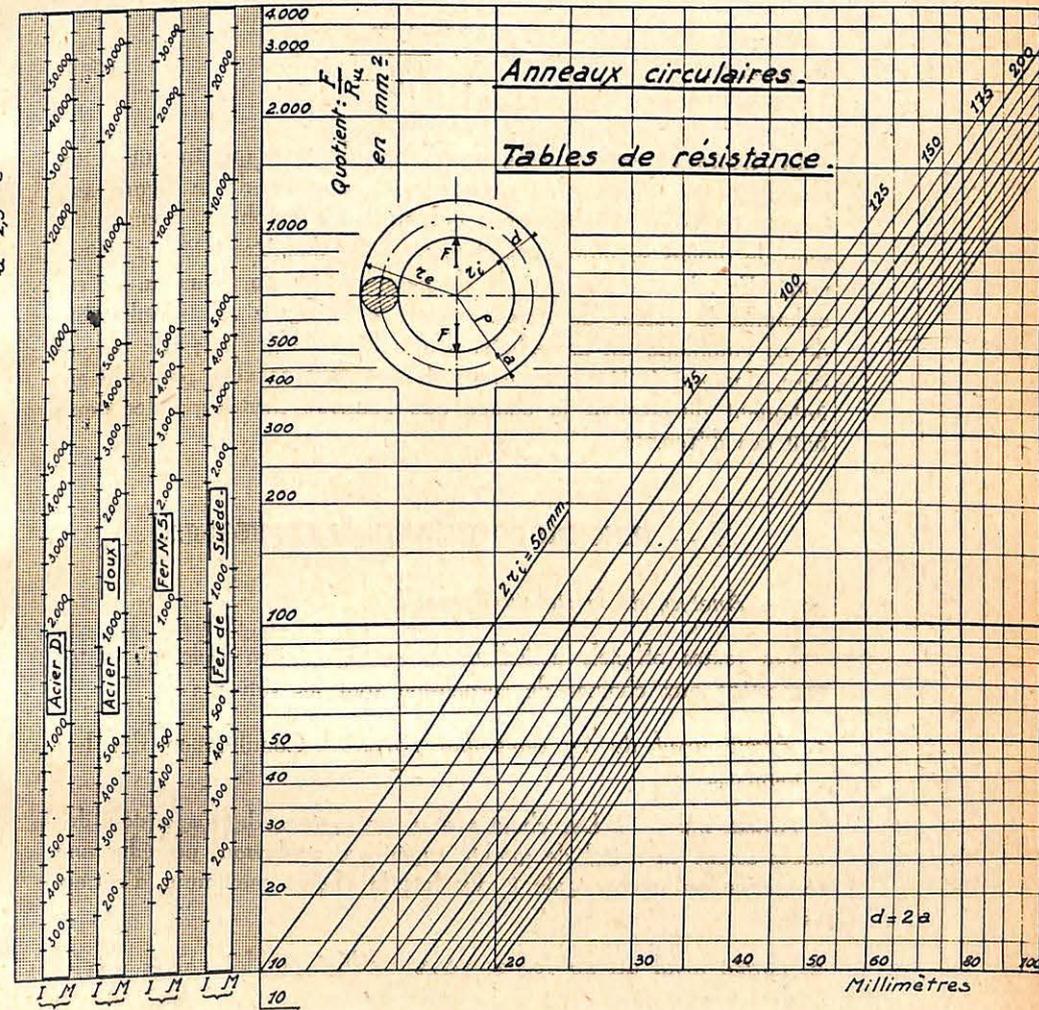


Fig. 45. Cas où $\lambda = \frac{r_i}{r_e} \leq 0,60$.

Anneaux circulaires.
Tables de résistance.

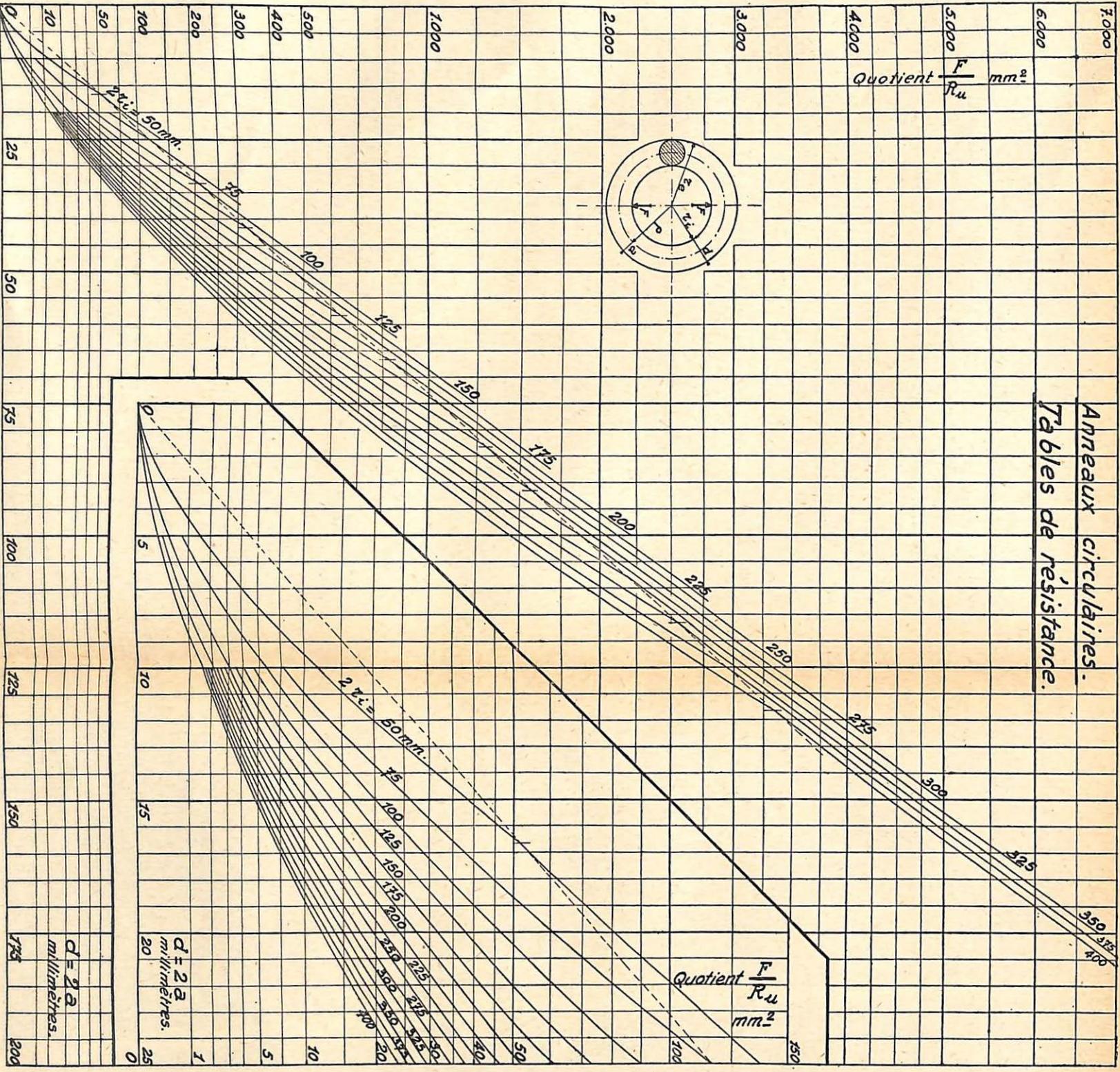


Fig. 42.

ou encore :

$$d = K_u \sqrt[3]{F \cdot (2 r_1)} \quad (64)$$

en posant .

$$K_u = \sqrt[3]{\frac{1,62}{R_u}} \quad (65)$$

La figure 45 est un diagramme logarithmique qui traduit cette formule; cette figure n'est qu'une transformation de la figure 42, compte tenu des simplifications indiquées. Ce graphique donne une série de droites se rapportant chacune à un diamètre intérieur déterminé. En abscisse est coté le diamètre du fer de l'anneau, et en ordonnée la valeur de F/R_u , comme à la figure 42. L'utilisation de ce graphique est immédiate. Outre l'échelle générale des ordonnées, donnant F/R_u , nous avons dessiné huit échelles particulières, indiquant directement la charge que l'anneau peut supporter dans huit cas différents.

B. — TENSION D'UTILISATION ADMISSIBLE

40. — *Analyse de la situation actuelle.*

Les textes officiels actuellement en vigueur en Belgique et se rapportant aux chaînes de suspension sont les suivants :

1. *Arrêté royal du 15 septembre 1919.* — Coordination des lois minières.

Article 25. — « Les chaînes et autres pièces de suspension des cages seront en métal de qualité supérieure et devront posséder une résistance au moins égale à dix fois la charge maximum d'extraction. »

2. *Arrêté royal du 20 février 1933,* modifié par les arrêtés royaux des 11 septembre 1933 et 12 mai 1938.

Cet arrêté royal portant réglementation des appareils de levage et chemins de fer aériens en usage dans les entreprises industrielles et commerciales autres que les travaux souterrains des mines, minières et carrières ne fait pas mention des coefficients de sécurité à admettre dans la construction de ces appareils.

5. *Arrêté royal du 11 juillet 1936.* — Essais et vérification des appareils de levage et engins fixes à bord des navires.

Article 1^{er}. — Avant mise en service :

« Les appareils de levage, appareils des navires et les engins fixes de bord considérés comme leurs accessoires, y compris les mâts de charge, les pivots, les taquets, les œillets ou autres accessoires, doivent, avant leur mise en service, être éprouvés avec une charge d'essai telle qu'elle est fixée ci-après :

Charge de sécurité :	Charge d'essai :
Jusque 20 tonnes . . .	25 % en plus.
De 20 à 50 tonnes . . .	5 tonnes en plus.
Plus de 50 tonnes . . .	10 % en plus. »

Article 3. — Essai préalable des engins mobiles :

« Aucune chaîne, anneau, crochet, manille, émerillon ou poulie ne peut être utilisée pour soulever ou descendre des charges avant d'avoir été essayé et vérifié avec une charge d'essai telle qu'elle est définie ci-après :

Engin :	Charge d'essai :
Chaîne	} 100 % en plus de la charge de sécurité.
Manille	
Anneau	
Crochet	
Emerillon	
Poulie à un réa	} 500 % en plus de la charge de sécurité.
Chaînes calibrées utilisées avec des poulies mues à la main, ainsi que les anneaux, crochets, manilles ou émerillons y attachés d'une manière permanente	} 50 % en plus de la charge de sécurité.
Poulies mues à la main et employées avec des chaînes calibrées et anneaux, crochets, manilles ou émerillons y attachés d'une manière permanente	} 50 % en plus de la charge de sécurité.

» Après avoir été essayés conformément aux prescriptions ci-dessus, tous engins de levage avec les engins accessoires et tous les engins mobiles seront inspectés, les réas et les axes des poulies étant démontés afin de vérifier si aucune pièce n'a été abîmée ou n'a subi de déformation permanente. »

Article 11. — Coefficient de sécurité :

« Il est recommandé d'utiliser au moins les coefficients de sécurité déterminés ci-après dans la construction des engins de levage :

Pour toute partie métallique d'un engin de levage :

Quand la charge de sécurité est de dix tonnes ou moins	5
Quand la charge est de plus de dix tonnes	4
Pour toute partie en bois (bois sain)	8
Pour les chaînes	4.5
Pour les câbles métalliques	5
Pour les câbles en fibre végétale :	7 »

Ces textes ne précisent pas quelle est la tension d'utilisation à introduire dans les formules de calcul des anneaux.

Pour les mines, on se borne à dire que la charge de rupture d'un anneau doit être au moins dix fois supérieure à la charge maximum d'utilisation. Les essais que nous avons décrits dans ce mémoire montrent que, même si l'anneau est soudé et que la soudure est relativement défectueuse, la charge de rupture est toujours plus de cinq fois supérieure à la charge qui produit les premières déformations permanentes, à condition que le métal soit resté ductile et n'ait donc pas été écroui en service prolongé. Les essais montrent, en outre, que cette dernière charge est au moins égale à celle calculée par les formules (57) ou (63) dans lesquelles on introduirait à la place de σ ou R_u la valeur de R_e , limite apparente d'élasticité de la matière de l'anneau essayée en traction simple.

Il en résulte que la prescription en vigueur pour les mines serait satisfaite si l'on prenait la charge d'utilisation calculée par la formule (60) ou la formule simplifiée (63), formules dans lesquelles on prendrait pour tension d'utilisation R_u au plus la moitié de la tension R_e , limite apparente d'élasticité de la matière.

Pour les anneaux des engins mobiles des navires, on se borne à une charge d'essai de 100 % supérieure à la charge d'utilisation prévue. On exige qu'après cet essai, il n'y ait aucune trace de

déformation permanente. On ne précise pas comment ni surtout avec quelle précision ce fait sera constaté. Toutefois, en principe, cela indique que le calcul ne peut pas se faire avec une tension d'utilisation R_u supérieure à la moitié de R_e .

Pour les éléments des engins fixes des navires, on prescrit une charge d'essai de 25 % supérieure à la charge d'utilisation si celle-ci est au plus égale à 20 tonnes; on exige une charge d'essai de 10 % supérieure à la charge d'utilisation si celle-ci est au moins égale à 50 tonnes; enfin, pour une charge comprise entre 20 et 50 tonnes, on impose une charge d'essai égale à la charge d'utilisation augmentée de 50 tonnes.

De tels essais ne peuvent avoir aucune signification réelle; en effet, les deux seules choses que l'on puisse constater au cours d'un tel essai sont, ou la rupture, ou l'apparition de déformations permanentes.

D'après les essais décrits dans le présent mémoire, un essai d'anneau de 50 tonnes, par exemple, éprouvé à une charge d'essai de $1,10 \times 50 = 55$ tonnes, et qui n'aurait pas montré de déformation permanente, ni de rupture, aurait cependant pu faire dépasser en traction la limite d'élasticité de la matière à l'endroit le plus sollicité. Il en résulterait que la charge d'utilisation, appliquée statiquement, pourrait pratiquement atteindre la charge limite d'élasticité, ce qui est évidemment inadmissible.

Il en serait presque de même pour l'anneau de moins de 20 tonnes essayé à 125 % de la charge d'utilisation.

C. — SOLUTION A ADOPTER

41. — Bases logiques de cette solution.

1. Existence d'une formule très simple .

$$d = K_u \cdot \sqrt[3]{F \cdot (2r_1)} \quad (64)$$

en posant :

$$K_u = \sqrt[3]{\frac{1,62}{R_u}} \quad (65)$$

traduite en graphique très simple (fig. 45), valable dans les limites de l'élasticité et conclue de raisonnements classiques de la résistance

des matériaux. Elle est remarquablement confirmée par des essais précis, tant mécaniques que photo-élastiques.

2. Absence d'une formule permettant d'estimer correctement la charge de rupture. On a toutefois la certitude expérimentale que la charge de rupture statique est au moins cinq fois supérieure à celle que donnerait la formule complète (57), dans laquelle la tension est remplacée par R_e , limite apparente d'élasticité de la matière en traction simple statique.

5. Nécessité, étant donné que la charge peut être appliquée brusquement sur l'anneau, de n'adopter comme charge d'utilisation statique prévue, que moins de la moitié de celle qui ferait atteindre à la tension maximum en traction, la limite apparente d'élasticité R_e .

4. Nécessité, pour tout engin sollicité par des charges fréquemment répétées (souvent appliquées brusquement), de n'adopter comme charge d'utilisation statique qu'une charge qui ne ferait pas dépasser à la tension maximum, en traction, la moitié de la limite d'endurance du métal, c'est-à-dire environ le tiers de R_e .

D. — CONCLUSION

42. — Les anneaux circulaires de section transversale circulaire sont à calculer au moyen des formules :

$$d = K_u \sqrt[3]{F \cdot (2 r_1)} \quad \text{ou} \quad F = \frac{d^3}{(2 r_1) \cdot K_u^3}$$

en posant :

$$K_u = \sqrt[3]{\frac{1,62}{R_u}}$$

ou du graphique figure 45.

La tension d'utilisation à adopter est :

pour les appareils miniers :

$$R_u = \frac{R_e}{5}$$

pour les appareils industriels et de marine :

$$R_u = \frac{R_e}{2,5}$$

Les essais avant mise en service doivent toujours être effectués au moyen d'une charge statique de 100 % supérieure à la charge d'utilisation. Après un tel essai, aucune déformation permanente ne peut être constatée à l'aide d'appareils de mesure donnant le 1/100 de millimètre.

Remarque. — D'après les essais, la charge d'utilisation statique calculée de cette manière est en sécurité sur la charge de rupture statique, d'au moins 10 pour les appareils miniers et d'au moins 8 pour les autres.

Tableau des valeurs caractéristiques utiles des principaux métaux employés pour les anneaux :

Matière	Tension de rupture R kg/mm ²	Tension limite apparente d'élasticité R_e kg/mm ²	Tension admissible R_u		Valeur de K_u	
			Mines $R_u = (1/3) R_e$ kg/mm ²	Industrie $R_u = (1/2,5) R_e$ kg/mm ²	Mines $\sqrt[3]{\frac{1,62}{R_u}}$ kg	Industrie $\sqrt[3]{\frac{1,62}{R_u}}$ kg
Fer de Suède . . .	33,0	22,0	7,5	8,8	0,605	0,570
Fer n° 5	56,0	25,9	8,6	10,4	0,574	0,558
Acier doux	44,0	28,0	9,5	11,2	0,559	0,525
Acier D traité. . . .	67,9	51,5	17,1	20,5	0,456	0,429

On pourrait s'étonner que, dans ces conclusions, il n'est pas fait allusion aux tensions élevées se produisant dans la zone du contact localisé de deux anneaux. Le calcul de ces tensions, dans les limites de l'élasticité, doit se faire comme il a été montré aux §§ 17 à 19.

On a vu que l'on doit considérer comme impossible d'éviter que la limite d'élasticité ne soit franchie dans la zone du contact localisé. Donc, dans cette zone, le métal est en déformation plastique et la région de contact s'étale sous la charge. Une telle situation n'est acceptable que pour une matière ductile; elle serait désastreuse pour une matière raide ou devenue telle. Dans cette région, la matière en

Le traitement subi par l'acier D est le suivant : trempé à l'eau à 875°, ensuite revenu à 625°.

Il est à remarquer que l'« Association des Industriels de Belgique » utilise depuis longtemps les valeurs suivantes de K_u :

Matière.	Mines.	Industrie.
Fer de Suède	0,580	0,550
Fer n° 5	0,550	{ 0,440 si $(2 r_1) < 200$ mm. 0,550 si $(2 r_1) \geq 200$ mm.

La charge qu'il est possible d'appliquer à un anneau donné ne sera pas fort différente, pour la plupart des cas, qu'elle soit calculée avec ces anciennes valeurs de K_u ou avec les nouvelles.

plasticité trouve sous elle une matière qui l'étreint. Il n'en est pas ainsi dans une zone sollicitée par traction.

Dans les anneaux en service industriel, on se trouve toujours dans le cas où $\lambda \leq 0,60$, et l'anneau est sollicité par traction générale; la région de plasticité par contact est donc toujours à l'intrados, tandis que la tension maximum de traction se produit toujours à l'extrados.

L'expérience semble montrer qu'il n'y a pas de rupture d'anneaux industriels, sans défauts, se produisant autrement qu'elle ne se produit en laboratoire, c'est-à-dire que la rupture n'est pas provoquée par l'effet des tensions élevées de la zone du contact.

Cette conclusion semble même pouvoir s'appliquer au cas des anneaux écrouis, dont la rupture débute aussi ailleurs que dans la zone du contact. Toutefois, il est indispensable, étant donnée l'importance des anneaux dans le dispositif mécanique auquel ils appartiennent, d'exiger que la matière de ces pièces garde toutes ses qualités de ductilité et ne soit pas écrouie par l'usage, à la suite d'actions excessives assez fréquemment répétées.

On sait, en effet, que les matières dont sont faits les anneaux peuvent, à la longue, s'écrouir gravement et prendre le caractère des matières absolument raides, auquel cas des ruptures sous charge réduite, et quasi sans déformations, sont à redouter.

Il est donc indispensable de maintenir formellement la pratique d'imposer un recuit périodique des anneaux.

Cette question de l'écrouissage des anneaux sera reprise dans une note ultérieure; elle revêt une importance primordiale, et les conclusions du présent mémoire ne sont applicables que si les anneaux ne sont pas écrouis.

Il est possible que s'impose ultérieurement, à cet égard, un contrôle par radiographie.

ANNEXE I

Formules des anneaux circulaires de section transversale rectangulaire, sollicités par deux forces diamétralement opposées, appliquées soit à l'intrados, soit à l'extrados, supposées d'une part uniformément réparties sur un certain arc et, d'autre part, concentrées, par la théorie de l'élasticité.

43. — Nous traitons ces problèmes par la théorie de l'élasticité. Les formules données précédemment d'après la théorie de l'élasticité ne concernaient que le cas de deux forces opposées, concentrées et appliquées à l'intrados, c'est-à-dire sollicitant l'anneau par une traction d'ensemble.

Les expressions générales valables quelle que soit la distribution des forces extérieures, en distribution symétrique cependant, sont :

$$\sigma_r = \frac{A_0}{r^2} + 2 C_0 + \sum_{n=2}^{\infty} [-n(n-1)r^{n-2}A_n - (n+1)(n-2)r^n B_n - n(n+1)r^{n-2}C_n - (n-1)(n+2)r^n D_n] \cos n\alpha \quad (66)$$

$$\sigma_a = -\frac{A_0}{r^2} + 2 C_0 + \sum_{n=2}^{\infty} [n(n-1)r^{n-2}A_n + (n+1)(n+2)r^n B_n + n(n+1)r^{n-2}C_n + (n-1)(n-2)r^n D_n] \cos n\alpha \quad (67)$$

$$\tau_{ra} = \sum_{n=2}^{\infty} [n(n-1)r^{n-2}A_n + n(n+1)r^n B_n - n(n+1)r^{n-2}C_n - n(n-1)r^n D_n] \sin n\alpha \quad (68)$$

Seules les valeurs paires de n sont à prendre en considération. Les valeurs des constantes A_n , B_n , C_n et D_n diffèrent suivant le genre de sollicitation extérieure en jeu.

Dans l'expression de ces constantes intervient le groupe :

$$Q_n = (1 - \lambda^{2n})^2 - n^2 \lambda^{2n-2} (1 - \lambda^2)^2 \quad (69)$$

avec :

$$\lambda = \frac{r_i}{r_e} \quad (70)$$

Ce groupe n'est pas influencé par le mode de charge.

44. — Ces formules deviennent les suivantes pour les quatre cas particuliers considérés :

Premier cas :

Deux forces extérieures F supposées uniformément distribuées radialement sur une certaine étendue angulaire β , et agissant à l'intrados, c'est-à-dire en traction générale (fig. 44) :

$$A_0 = -\frac{r_i}{\pi(1-\lambda)^2} \cdot F, \quad C_0 = \frac{\lambda}{2\pi(1-\lambda^2)r_e} \cdot \bar{F} \quad (71)$$

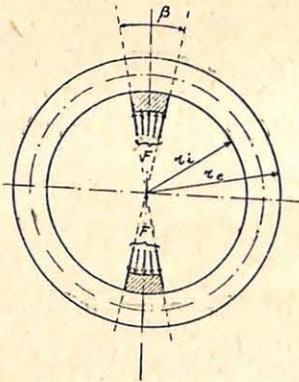


Fig. 44. — Anneau sollicité par une charge répartie à l'intrados.

Pour $n \geq 2$ et ayant des valeurs paires seulement :

$$A_n = (-1)^{(n/2)-1} \frac{F}{\pi r_i} \cdot r_e^{-n+2} \cdot \lambda^n \cdot \frac{n(1-\lambda^2) + \lambda^2(1-\lambda^{2n})}{(n-1)Q_n} \cdot \frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} \quad (72)$$

$$B_n = -(-1)^{(n/2)-1} \frac{F}{\pi r_i} \cdot r_e^{-n} \cdot \lambda^n \cdot \frac{n(1-\lambda^2) + (1-\lambda^{2n})}{(n+1)Q_n} \cdot \frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} \quad (73)$$

$$C_n = (-1)^{(n/2)-1} \frac{F}{\pi r_i} \cdot r_e^{n+2} \cdot \lambda^n \cdot \frac{n(1-\lambda^2)\lambda^{2n} + \lambda^2(1-\lambda^{2n})}{(n+1)Q_n} \cdot \frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} \quad (74)$$

$$D_n = -(-1)^{(n/2)-1} \frac{F}{\pi r_i} \cdot r_e^n \cdot \lambda^n \cdot \frac{n(1-\lambda^2)\lambda^{2n} + (1-\lambda^{2n})}{(n-1)Q_n} \cdot \frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} \quad (75)$$

Deuxième cas :

Deux forces extérieures F supposées uniformément distribuées radialement sur une étendue angulaire β , et agissant à l'extrados, c'est-à-dire en compression générale (fig. 45) :

$$A_0 = \frac{r_e \lambda^2}{\pi(1-\lambda^2)} \cdot F, \quad C_0 = -\frac{1}{2\pi(1-\lambda^2)r_e} \cdot F \quad (76)$$

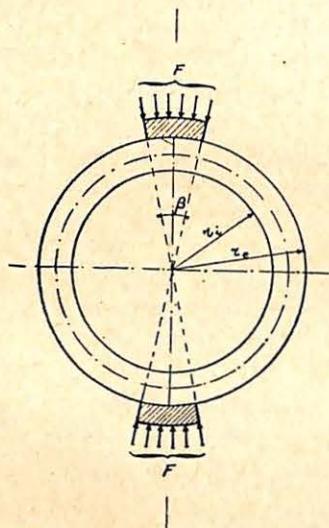


Fig. 45. — Anneau sollicité par une charge répartie à l'extrados.

Pour $n \geq 2$ et ayant des valeurs paires seulement :

$$A_n = -(-1)^{(n/2)-1} \frac{F}{\pi r_e} \cdot r_e^{-n+2} \cdot \frac{n(1-\lambda^2)\lambda^{2n} + (1-\lambda^{2n})}{(n-1)Q_n} \cdot \frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} \quad (77)$$

$$B_n = (-1)^{(n/2)-1} \frac{F}{\pi r_e} \cdot r_e^{-n} \cdot \frac{n(1-\lambda^2)\lambda^{2n-2} + (1-\lambda^{2n})}{(n+1)Q_n} \cdot \frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} \quad (78)$$

$$C_n = -(-1)^{(n/2)-1} \frac{F}{\pi r_e} \cdot r_e^{-n+2} \cdot \lambda^{2n} \cdot \frac{n(1-\lambda^2) + (1-\lambda^{2n})}{(n+1)Q_n} \cdot \frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} \quad (79)$$

$$D_n = (-1)^{(n/2)-1} \frac{F}{\pi r_e} \cdot r_e^{-n} \cdot \lambda^{2n-2} \cdot \frac{n(1-\lambda^2) + (1-\lambda^{2n})\lambda^2}{(n-1)Q_n} \cdot \frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} \quad (80)$$

Ce deuxième cas est fort apparenté au cas des essais effectués sur tuyaux cylindriques, avec interposition d'une barette en bois régnant sur un certain angle.

Troisième cas :

Deux forces extérieures F supposées concentrées et agissant à l'intrados, c'est-à-dire en traction générale.

Dans ce cas, l'angle β tend vers zéro, le groupe $\frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2}$ tend

vers 1, donc les formules du premier cas restent applicables, mais se simplifient en posant :

$$\frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} = 1 \quad (81)$$

Cela reproduit les formules déjà données antérieurement (formules 31 et 32 du § 12).

Quatrième cas :

Deux forces extérieures F supposées concentrées et agissant à l'extrados, c'est-à-dire en compression générale.

Dans ce cas, l'angle β tend vers zéro, le groupe $\frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2}$ tend

vers 1, donc les formules du deuxième cas restent applicables, mais se simplifient en posant :

$$\frac{\sin n \cdot \beta/2}{n \cdot \beta/2} = 1 \quad (82)$$

Exemples numérique :

a) La force intérieure est répartie sur un arc de 2° .

Les termes obtenus au n° 19 pour $n = 2, 4, 6, 8$ sont à multiplier respectivement par les coefficients réducteurs :

$$1 ; 1 ; 0,999 ; 0,998.$$

b) La force intérieure est répartie sur un arc de 10° .

Ces mêmes termes sont à multiplier respectivement par les coefficients réducteurs :

$$0,996 ; 0,979 ; 0,954 ; 0,920.$$

c) La force intérieure est répartie sur un arc de 15° .

Ces mêmes termes sont à multiplier respectivement par les coefficients réducteurs :

$$0,989 ; 0,954 ; 0,900 ; 0,827.$$

ANNEXE II

Application de la méthode de la résistance des matériaux à l'étude du maillon circulaire étauçonné, sollicité par deux forces radiales égales et opposées (fig. 46 et 47).

45. — La symétrie donne immédiatement :

$$T_0 = 0.$$

$$M_0 = 0.$$

$$T_A = -\frac{F}{2} \quad (\text{immédiatement à côté de la charge})$$

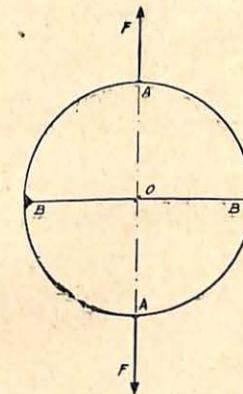


Fig. 46. — Maillon étauçonné (sollicitation d'ensemble).

Les équations d'équilibre statique donnent en outre :

$$2 \cdot N_A = -N_0.$$

Il y a donc deux inconnues hyperstatiques, par exemple : M_A et N_A .

Les équations de déformation donnent :

$$\begin{cases} \Delta \varphi_A - \Delta \varphi_O = 0, \\ \Delta x_A - \Delta x_O = 0. \end{cases}$$

L'étauçon n'est pas fléchi, il ne subit qu'un effort longitudinal.

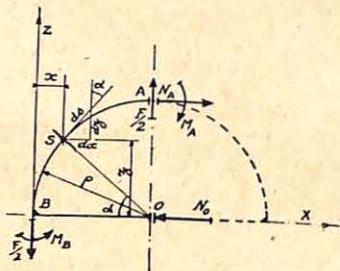


Fig. 47. — Maillon étauçoné (solicitation d'un quart du maillon).

La première équation de déformation revient à :

$$\Delta \varphi_A - \Delta \varphi_B = 0,$$

et elle donne :

$$\Delta \varphi_A - \Delta \varphi_B = \int_A^B \frac{M}{E.I} ds$$

L'équation devient :

$$\int_0^{\pi/2} [M_A + N_A \cdot \rho \cdot (1 - \sin \alpha) - \frac{F}{2} \cdot \rho \cdot \cos \alpha] \rho \cdot d\alpha = 0$$

$$M_A \cdot \rho \cdot \frac{\pi}{2} + N_A \cdot \rho^2 \cdot \frac{\pi}{2} - N_A \cdot \rho^2 \int_0^{\pi/2} \sin \alpha \cdot d\alpha - \frac{F}{2} \cdot \rho^2 \int_0^{\pi/2} \cos \alpha \cdot d\alpha = 0,$$

$$\frac{M_A}{\rho} \cdot \frac{\pi}{2} + N_A \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) - \frac{F}{2} = 0 \tag{83}$$

La seconde équation de déformation revient à :

$$\begin{aligned} \Delta x_A - \Delta x_O &= (z_A - z_B) \cdot \Delta \varphi_B + \int_B^A \frac{N}{E.\Omega} \cdot dx \\ &- \xi \int_B^A \frac{T}{G.\Omega} \cdot dz + \int_B^A (z_A - z) \cdot \frac{M}{E.I} \cdot ds \\ &+ \int_0^B \frac{N_0}{E.\Omega_0} (-dx) \end{aligned}$$

Par raison de symétrie :

$$\Delta \varphi_B = 0$$

La figure 47 montre que nous avons :

$$T = \frac{F}{2} \cdot \sin \alpha - N_A \cdot \cos \alpha$$

$$N = \frac{F}{2} \cdot \cos \alpha + N_A \cdot \sin \alpha$$

$$M = M_A - \frac{F}{2} \cdot \rho \cdot \cos \alpha + N_A \cdot \rho (1 - \sin \alpha)$$

$$dx = ds \cdot \sin \alpha = \rho \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha$$

$$dz = ds \cdot \cos \alpha = \rho \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha$$

$$ds = \rho \cdot d\alpha$$

Donc, l'équation devient :

$$\begin{aligned} \frac{M_A}{F \cdot \rho} \cdot \frac{\rho^2}{E \cdot I_a} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \\ + \frac{N_A}{F} \left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{E \cdot \Omega_a} + \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\xi}{G \cdot \Omega_a} + \frac{5\pi}{4} \cdot \frac{\rho^2}{E \cdot I_a} \right. \\ \left. - \frac{2\rho^2}{E \cdot I_a} + 2 \cdot \frac{1}{E \cdot \Omega_e} \right) \\ + \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{E \cdot \Omega_a} - \frac{1}{4} \cdot \frac{\xi}{G \cdot \Omega_a} - \frac{1}{4} \cdot \frac{\rho^2}{E \cdot I_a} \right) = 0. \end{aligned} \quad (84)$$

Les équations (83) et (84) associées forment un système permettant de trouver M_A et N_A . La question est ainsi résolue, et le résultat est le suivant :

$$\frac{M_A}{F \cdot \rho} = \frac{1}{\pi} - \frac{N_A}{F} \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) \quad (85)$$

$$\frac{N_A}{F} = \frac{-2 + 2\xi \cdot \frac{E}{G} + \frac{\rho^2 \cdot \Omega_a}{I_a} \cdot \left(\frac{8}{\pi} - 2 \right)}{\pi + \pi \cdot \xi \cdot \frac{E}{G} + \left(\pi - \frac{8}{\pi} \right) \cdot \frac{\rho^2 \cdot \Omega_a}{I_a} + 8 \frac{\Omega_a}{\Omega_e}} \quad (86)$$

46. — Le calcul montre qu'il y a dans chaque demi-anneau, d'un côté de l'étauçon, entre l'étauçon et la charge, deux points d'inflexion i_1 et i_2 (fig. 48).

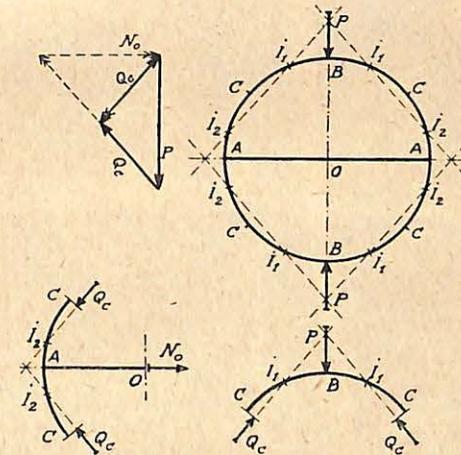


Fig. 48. — Maillon étauçonné.

Sollicitation et équilibre de diverses portions.

La photo-élasticité nous confirme bien ce résultat (photo P-40), et donne ces points très exactement à la place indiquée par la théorie.

Lorsqu'il y a ainsi deux points d'inflexion entre lesquels ne se trouve ni charge extérieure ni nœuds, dans cette partie-là de l'ensemble le polygone des poussées est la droite qui joint ces points d'inflexion. Leur connaissance permet donc de lever de suite l'étude complète de ce maillon étauçonné.

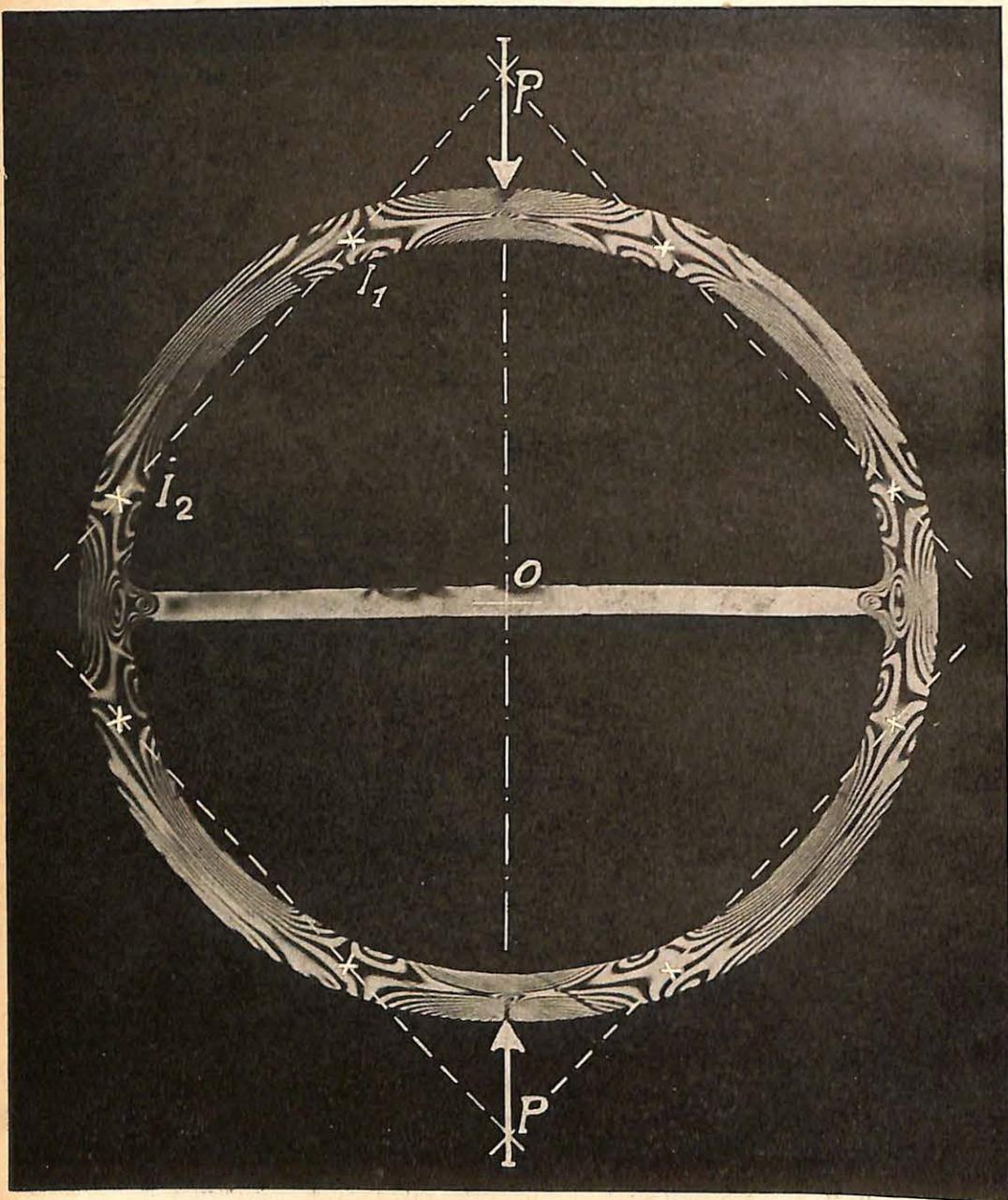


Photo P-40.
Maillon étauçonné.
Lignes isochromatiques et points d'inflexion.

L'Intervapeur Verviétoise ou La distribution urbaine de vapeur à Verviers

par
Paul HAIDANT,
Ingénieur Principal pour la Protection du Travail
et
Hector PAQUAY,
Ingénieur pour la Protection du Travail.

I. — SITUATION EXISTANT EN 1935

De nombreuses usines textiles rassemblées à Dison et à Verviers disposaient chacune d'une installation productrice de vapeur.

On sait que les usines textiles sont de grosses consommatrices de vapeur qu'elles utilisent pour le chauffage par barbotage ou par surface des bains de teinture ou d'apprêts, des lavoirs de laine, des séchoirs, etc., et pour le conditionnement de l'atmosphère des ateliers (chauffage, humidification dans les ateliers de tissage et de filature).

Les installations productrices de vapeur fonctionnaient à une pression d'environ 7 Kg/cm², la vapeur pouvant être détendue pour ses utilisations à basse pression.

Les chaudières utilisées étaient de modèles anciens, elles étaient chargées à la main, plusieurs d'entre elles devaient être renouvelées à bref délai.

La force motrice utilisée était fournie par l'électricité sauf dans quelques usines produisant elles-mêmes la puissance

qu'elles absorbaient. Les machines à vapeur employées ne marchaient pas en contre-pression ni avec soutirage.

De cette situation découlaient les éléments suivants :

1°) la production totale de la vapeur utilisée s'effectuait dans une centaine de chaudières d'anciens modèles, dépourvues d'organes de récupération et ayant un rendement moyen très faible (environ 50 %);

2°) pour une sécurité de marche donnée, chaque usine avait ou aurait dû avoir sa propre réserve de chaudières;

3°) chaque usine devait avoir un ou des chauffeurs livrés à leur propre initiative, les ingénieurs de l'industrie textile ne pouvant consacrer leur temps à la surveillance de la chauffe;

4°) une place importante et des capitaux élevés devaient être consacrés dans chaque usine à l'installation productrice de vapeur;

5°) le combustible utilisé devait avoir certaines qualités minima que ne requièrent pas les grosses chaudières à chauffe mécanique : (fusibilité des cendres, calibre du charbon, et teneur de celui-ci en matières volatiles). Par suite, ce combustible était relativement coûteux.

En outre, chaque usine prise en particulier, n'achetant que par quantités relativement faibles, il était impossible d'arriver au prix d'achat le plus économique pour le combustible rendu à l'usine;

6°) le nombre des foyers disséminés dans l'agglomération verviétoise était important et il y avait une quantité de fumée déversée dans l'atmosphère d'autant plus forte que le rendement était plus faible.

Les installations particulières étaient en outre, d'une capacité insuffisante pour pouvoir s'accommoder d'une installation de dépoussiérage;

7°) en période de crise, la seule chaudière de l'usine devait être tenue en marche permanente, si même on ne lui demandait qu'une production de vapeur très restreinte par rapport à sa production nominale.

Elle se trouvait donc dans les conditions de rendement

les plus mauvaises et elle exigeait néanmoins la présence du chauffeur.

Ce n'est donc pas sans raison qu'en connexion avec les spécialistes de la Société Intercommunale d'Electricité, les industriels verviétois envisagèrent la centralisation dans une seule usine de la production de toute la vapeur absorbée par les usines du bassin.

II. — CRITIQUE DE LA DISTRIBUTION URBAINE DE CHALEUR

La distribution de la chaleur par une grosse centrale offre les avantages suivants :

1°) La puissance totale de chauffe requise de cette centrale est nettement inférieure à la somme des puissances des installations indépendantes. En effet, une installation prise en particulier doit avoir une puissance mesurée par la plus forte pointe de consommation.

Si l'on alimente deux usines par une centrale, il est extrêmement probable que les pointes de ces deux usines ne se présenteront pas au même instant.

Il en résulte que la puissance de la centrale est inférieure à la somme des pointes des deux usines séparées et, par suite, inférieure à la somme des puissances de chauffe de ces deux usines.

Plus le nombre des usines groupées est élevé, plus la pointe résultante s'écarte de la somme des pointes des diverses usines prises séparément.

On se rend immédiatement compte de ce fait par la sommation des diagrammes de charge des usines.

Les minima de charge ne se présentant pas non plus d'une façon simultanée, il en découle que le minimum de charge des usines groupées est supérieur à la somme des minima des charges des usines prises séparément.

En conséquence, la charge de la centrale oscillera entre deux limites relativement rapprochées et l'installation pourra fonctionner en permanence avec un bon rendement. On sait, en effet, que le rendement d'une chaudière diminue d'autant

plus que son pourcentage de charge est plus faible et qu'à vide, il devient nul.

En résumé, la puissance de la centrale sera nettement inférieure à la somme des puissances des centrales isolées, ses variations de charge seront relativement beaucoup plus faibles et on se trouvera en permanence au voisinage de la marche au rendement maximum. On trouve ici une première raison de l'économie de combustible;

2°) La puissance globale à installer dans la centrale étant très élevée, on pourra y grouper un nombre relativement restreint d'unités de chauffe de forte puissance pourvues des meilleurs dispositifs de récupération : économiseurs, éventuellement réchauffeurs d'air.

Le prix global de ces installations sera certes moins élevé que celui des multiples petites unités réparties dans les usines et leur rendement pourra être très élevé grâce aux fortes puissances unitaires et aux récupérateurs de chaleur;

3°) La réserve nécessaire sera très réduite pour donner une sécurité absolue de production.

Si la puissance maximum de l'année peut être assurée par n unités identiques, en principe, il suffit d'avoir une seule unité supplémentaire qui permettrait de remplacer celle des n qui devrait être arrêtés ou même mise en réparation.

Dans une usine isolée n'ayant besoin que d'une seule chaudière de faibles dimensions, pour arriver à la même sécurité de marche, il en faudrait une seconde de même puissance.

Cela reviendrait donc à doubler le prix de l'installation, tandis que, dans le cas d'une centrale, la réserve n'augmente les immobilisations que du n^{me} du capital investi dans les chaudières.

Il en est de même pour les services auxiliaires.

Ceci réduit donc encore les immobilisations pour une sécurité de marche imposée.

Remarquons ici qu'il faudra réaliser un compromis entre le désir d'utiliser des unités de très forte puissance et de rendement très élevé et la nécessité d'avoir une réserve peu coûteuse.

Ce dernier point de vue envisagé seul imposerait que le

nombre n des unités soit très élevé afin que le prix de la seule unité de réserve, à peu près proportionnel à sa puissance, soit très faible.

On aurait alors un grand nombre d'unités de petite puissance dont le contrôle serait malaisé; elles occuperaient beaucoup de place et exigeraient un personnel important. Enfin, elles auraient inévitablement un rendement assez mauvais.

En général, on choisit $n = 3$ à 6 , c'est-à-dire que la puissance requise est développée par 3 à 6 chaudières et la chaudière de réserve a donc une puissance comprise entre le $1/3$ et le $1/6$ de la puissance requise;

4°) Les installations de la centrale seront conduites par un groupe d'ingénieurs et d'ouvriers spécialistes qui maintiendront constamment le rendement à une valeur optimale, tandis que, dans une usine isolée, pour une charge donnée de la chaudière, la consommation de charbon peut varier du simple au double ou même au triple suivant la qualité du chauffeur.

Un tel inconvénient ne peut se présenter dans une centrale bien conduite et pourvue de tous les appareils utiles de contrôle.

On trouve ici une deuxième raison de l'économie de combustible;

5°) L'achat du combustible par la centrale se fera par quantités très massives, son transport pourra se faire par trains ou par bateaux entiers, sa manutention se fera à l'aide d'appareils perfectionnés.

Tous ces éléments permettront d'obtenir un prix de revient aussi bas que possible à la centrale.

Le peu d'importance des installations individuelles ne permet pas de profiter des mêmes avantages.

C'est une troisième raison de l'économie sur le combustible;

6°) Les unités utilisées étant de forte puissance s'accommoderont parfaitement bien d'un combustible très quelconque.

Or, bien que l'emploi des combustibles de faible valeur se répande de plus en plus, on trouve encore un bénéfice important en y recourant lorsque la centrale ne se trouve pas à trop grande distance des charbonnages.

C'est le cas à Verviers où l'on pourra par conséquent utiliser du charbon très fin et très cendreux dont le prix de revient à la calorie utile est plus économique que celui des combustibles meilleurs et plus coûteux obligatoirement utilisés dans les petites installations.

C'est là une quatrième raison de l'économie sur le combustible;

7°) Au point de vue général, la quantité totale des fumées produites par une centrale sera moindre que celle des multiples installations individuelles puisque le rendement y est meilleur.

En outre, on y veille soigneusement à éviter toute production d'oxyde de carbone. Il en résultera que l'atmosphère gazeuse sera moins polluée par les gaz toxiques (oxyde de carbone, anhydride sulfureux).

Quant au déversement des poussières dans l'atmosphère, on pourra fortement le réduire par l'emploi de dépoussiéreurs très perfectionnés dont les petites installations n'auraient pu s'accommoder économiquement.

Ces dépoussiéreurs, s'ils fonctionnent à sec, permettront la réintroduction des suies dans le foyer de la chaudière, ce qui rend leur amortissement possible par la récupération des calories que cette réintroduction entraîne.

Cela permet également de fondre les cendres impalpables recueillies au dépoussiéreur et de les précipiter au cendrier sous forme granulaire, lors de l'emploi du charbon pulvérisé.

Au contraire, les nombreuses petites chaudières des installations individuelles multiplient leurs jets de fumées noires chaque fois qu'on les allume ou qu'on y introduit du charbon.

Malgré l'emploi du charbon pulvérisé, il semble donc qu'une centrale de chauffage urbain, qui ne donne que des fumées très claires, permet d'atténuer la pollution générale de l'atmosphère.

L'emploi d'une haute cheminée rendra les inconvénients de cette pollution tout à fait supportables, même au milieu d'une agglomération.

A cet égard, la manutention en plein air de fortes quantités de charbon poussiéreux exposera également la centrale à des

difficultés avec le voisinage si le combustible n'est pas assez humide.

Ces difficultés sont facilement surmontées;

8°) La centrale libère les industriels de tous les soucis relatifs à la production de vapeur. Il suffit qu'une vanne soit ouverte pour qu'ils soient assurés d'en recevoir à discrétion;

9°) L'installation d'une grosse centrale ne demande qu'un espace très réduit si on le compare à la somme des surfaces occupées par l'ensemble des installations individuelles. Ces surfaces peuvent être récupérées par les industriels;

10°) Le personnel total occupé dans une centrale est très réduit vis-à-vis de celui qui est occupé dans l'ensemble des installations individuelles de chauffe. Les dépenses de main-d'œuvre sont donc fortement comprimées;

11°) Techniquement, il serait toujours possible aux industriels de maintenir leurs machines à vapeur en fonctionnement, bien qu'ils soient dépourvus de leurs chaudières, puisqu'ils reçoivent de la vapeur ayant les mêmes caractéristiques que celle qu'ils produisaient eux-mêmes.

Pour la même raison, aucune modification ne devra être apportée au réseau de distribution de vapeur déjà existant dans les usines.

Cette condition, en plus de considérations relatives à la sécurité et aux frais de premier établissement, imposait d'ailleurs, à Verviers, de desservir les diverses usines en vapeur plutôt qu'en eau chaude sous pression;

12°) La souplesse requise des chaudières de la centrale sera nettement moindre que celle qui était nécessaire dans les installations individuelles puisque (voir le 1° du même chapitre) les variations de charge y sont beaucoup plus réduites.

Le volume d'eau contenue dans les chaudières pourra donc être relativement plus faible, ce qui amène une réduction de leur prix.

Chauffées au charbon pulvérisé, ces chaudières ne contenant qu'un poids d'eau très limité pourront être mises rapidement en pression et en marche, en cas de besoin. La chauffe

au charbon pulvérisé confère, en effet, une souplesse remarquable aux chaudières.

A cet égard, remarquons que le volant de vapeur contenu dans le réseau de distribution s'oppose encore à des à-coups trop brusques de la pression.

En outre, en maintenant systématiquement une pression légèrement supérieure à celle de l'utilisation dans tous les points du réseau, une légère chute de pression à la centrale ne pourrait occasionner aucune difficulté aux consommateurs chez lesquels la pression est maintenue automatiquement constante par des régulateurs;

13°) Par simple raccordement au réseau de distribution de chaleur, la centrale peut desservir les habitations particulières en chaleur pour le chauffage domestique. Elle dispose ainsi d'une nouvelle tranche de clientèle à laquelle elle pourra ne s'adresser que si sa réserve de puissance est très élevée.

Cette clientèle, appréciant beaucoup le confort qui lui serait assuré, pourrait payer la calorie fournie à un tarif nettement plus élevé que les industriels, mais elle ne consommerait de la chaleur en quantité appréciable que pendant la saison froide.

* * *

En résumé, si l'on n'envisage que la production de la chaleur tous les avantages sont en faveur de la centrale de chauffe vis-à-vis des installations individuelles : consommation de charbon nettement moins élevée, moindres dépenses de main-d'œuvre, amortissements plus faibles, frais d'entretien et de réparation réduits.

* * *

En regard de ces avantages, il faudra considérer les inconvénients résultant de l'obligation d'avoir un réseau de distribution de chaleur raccordant la centrale aux usines utilisatrices.

L'amortissement des sommes consacrées à ce réseau grèvera le prix de revient de la calorie vendue aux industriels d'une

façon d'autant plus importante que ces sommes seront plus élevées. Dans l'étude du réseau, il faudra donc s'attacher à en rendre le prix minimum tout en lui assurant une bonne longévité et une sécurité de service parfaite.

On conçoit, en effet, que la moindre défaillance du réseau aura des répercussions extrêmement graves dans les usines desservies.

L'emploi de la vapeur comme fluide véhiculant de la chaleur étant forcé à Verviers afin de ne pas imposer aux industriels d'apporter d'importantes modifications aux réseaux intérieurs de distribution dans leurs usines, nous n'envisagerons que le cas d'un réseau de distribution de vapeur.

Le prix du réseau dépendra en ordre principal de sa longueur et du diamètre des tuyauteries qui le composent.

En ordre accessoire, mais non négligeable, interviendront l'épaisseur des tuyauteries, les difficultés rencontrées lors des travaux de terrassement, les organes accessoires que la tuyauterie comporte : calorifuges, dispositifs compensateurs de dilatation, purgeurs, fosses de visite, vannes de sectionnement etc.

Ci-dessous, nous considérons succinctement chacun de ces facteurs :

1°) La longueur du réseau dépendra de la position relative de la centrale par rapport aux endroits d'utilisation de la vapeur.

A Verviers, ceux-ci sont situés le long de la Vesdre. On peut joindre ces endroits par une ligne se rapprochant assez fortement d'une ligne droite.

Pour raccourcir le réseau, la centrale doit se trouver à l'intérieur du tronçon de cette ligne droite qui joint les deux usines les plus éloignées.

Heureusement, à Verviers, on a pu disposer d'un emplacement favorable à cet égard. Afin de permettre l'alimentation en vapeur de toutes les usines desservies en cas de défaillance d'une tuyauterie, il est nécessaire de boucler le réseau, c'est-à-dire de raccorder chaque usine à la centrale par deux chemins différents.

C'est ce qui est déjà réalisé actuellement pour ce qui concerne la région Est et ce qui le sera prochainement pour la région Ouest.

Il va de soi que, dans un centre populeux comme Verviers, les tuyauteries ont dû être posées dans la voirie, qui n'offre pas toujours le plus court chemin d'un point à un autre et qui présente, comme nous le verrons dans la suite, certains inconvénients sérieux pour de tels travaux. En revanche, cela permettrait un raccordement aisé des habitations privées au réseau de distribution;

2°) La longueur du réseau et, par suite, les travaux de terrassement étant réduits au minimum, il importe que la section des conduites du fluide chaud soit aussi faible que possible afin de diminuer la consommation des produits calorifuges, de réduire la section des tranchées à creuser et des caniveaux qui recevront la tuyauterie.

Si l'on admet en première approximation que cette section est proportionnelle à la quantité de fluide à véhiculer, on conçoit qu'elle sera rendue aussi faible que possible si la centrale se trouve au « centre de gravité » des usines à alimenter, c'est-à-dire d'autant plus proche de ces usines que leur consommation est plus importante.

On trouverait ce centre de gravité sur la ligne droite joignant l'ensemble des usines à desservir en multipliant la consommation de chaque usine par sa distance à une extrémité du réseau, en faisant la somme de tous les produits ainsi obtenus et en divisant cette somme par la consommation totale de vapeur. On aurait ainsi la distance qui devrait exister entre la centrale et la même extrémité du réseau.

De nouveau, à Verviers, on a pu trouver un emplacement voisin de ce centre de gravité pour y installer la centrale et cet emplacement était commode pour un raccordement au chemin de fer (amenée du charbon).

En outre, il permettait une facile adduction de la quantité d'eau très importante demandée par la centrale.

L'emplacement de la centrale étant choisi, on peut calculer les quantités de vapeur qui passeront dans chaque tronçon de la tuyauterie.

Celle-ci étant ou devant être bouclée, les poids de vapeur varieront selon que l'on suppose l'alimentation du réseau faite par l'une ou par l'autre extrémité de la boucle ou par les deux extrémités simultanément. En cas de sectionnement dans la boucle, le débit normal d'un tronçon variera fortement.

On en déduit qu'il est nécessaire de déterminer la section d'un tronçon quelconque pour son débit maximum.

En réalité, à Verviers, on a fait choix d'une section constante pour les diverses conduites, ce qui offrait l'avantage de simplifier leur installation et de normaliser toutes les pièces qui en font partie.

Il restait alors à faire choix de la pression de vapeur à la centrale. La pression à l'entrée des usines desservies devant être de 7 Kg/cm² effectifs, on rencontrait ainsi une limite inférieure de la pression à réaliser à la centrale.

Plus la pression sera élevée à la centrale et plus les pertes de charge admissibles en conduite seront élevées et, par suite, plus la section des conduites pourra être faible puisque la vitesse tolérable est plus élevée.

Au point de vue de la chaleur transportée par un Kg. de vapeur, il faut observer que le choix de la pression a relativement peu d'influence si on admet qu'elle est saturée sèche : La formule de Zeuner indique que la chaleur totale d'une telle vapeur est de : $606,5 + 0,305 t$ si t est la température de saturation. Or, si p est la pression de saturation, on a :

$$t = 100 \sqrt[4]{\frac{p}{p_0}}, p \text{ étant comptée en Kg/cm}^2 \text{ absolus.}$$

La chaleur totale de la vapeur saturée sèche est donc :

$$606,5 + 30,5 \sqrt[4]{\frac{p}{p_0}}$$

et on voit que la chaleur totale varie très faiblement avec la pression.

Si la vapeur est saturée sèche au départ, elle se surchaufferait légèrement sous l'effet des pertes de charge, mais si l'on tient compte de faibles pertes de chaleur en conduite, on peut admettre approximativement que la vapeur partant sèche de la centrale arrivera sèche à l'usine qui l'utilise, si elle est surchauffée au départ, elle le restera à l'arrivée.

Ceci montre donc le peu d'importance du choix de la pression au départ sur la quantité de chaleur transmise par le réseau.

Or, le choix de cette pression aura une répercussion sur le prix des chaudières dont la production est indépendante de la pression et sur le prix des conduites : une pression élevée augmente le prix des chaudières, mais elle diminue la section des conduites de distribution en permettant une vitesse de circulation plus élevée.

Le compromis le plus économique a été recherché en tenant compte de l'augmentation de l'épaisseur des conduites avec la pression et celle-ci a été choisie à 20 Kg/cm² à la centrale, les chaudières étant timbrées à 25 Kg.

Pour la boucle de l'Est qui a un développement de 4,5 Km. on a choisi des tubes de 250 mm. de diamètre, pour celle de l'Ouest qui aura un développement de 6 Km., les tubes choisis ont un diamètre de 300 mm.

Remarquons que la diminution de pression à la centrale n'eût pas eu de répercussion importante sur l'épaisseur des conduites, car celle-ci donnée par :

$$e = \frac{p d}{2 R} \text{ cm, avec } p = \text{pression en Kg/cm}^2$$

d = diamètre en cm.

R = taux de travail du métal en KG/cm²

$$\text{donne } e = \frac{20 \times 30}{2 \times R} \text{ et } e = \frac{20 \times 25}{2 \times R}$$

Si l'on choisit un taux de travail très modéré de 6 Kg/cm², e'est-à-dire : $R = 600 \text{ Kg/cm}^2$, on trouve :

$$e = 0,5 \text{ cm. et } e = 0,4 \text{ cm.,}$$

e'est-à-dire des épaisseurs que l'on n'aurait pu réduire sans s'exposer à ce que les corrosions donnent rapidement lieu à des difficultés.

Le choix de la pression de 20 Kg/cm² à la centrale paraît donc avoir été heureux.

En conclusion, de ce paragraphe, signalons que, parmi les pressions possibles, on a fait choix de celle de 20 Kg/cm² à la centrale, ce qui a permis, sans porter le prix des chaudières à une valeur excessive, d'utiliser des tuyauteries de distribution de faible diamètre et de faible épaisseur;

3°) Le prix des travaux de terrassement à effectuer dépend évidemment de la longueur et de la section des tranchées à creuser.

La longueur des tranchées qui est la même que celle des tuyauteries a été réduite au minimum (voir le 1°).

La section des tranchées est conditionnée :

a) par la section de la tuyauterie;

b) par l'épaisseur du revêtement calorifuge;

c) par la nécessité de placer les tuyauteries dans des caniveaux.

La détermination de la section de la tuyauterie a été envisagée au 2°. Les deux autres points seront envisagés au 4°.

Nous nous bornerons ici à l'examen de quelques caractéristiques des travaux de terrassement.

Ceux-ci étant réalisés dans la voirie, la rencontre d'égouts, de câbles électriques et téléphoniques, de conduites d'eau était inévitable. Il a fallu commencer par les détourner, leur passage dans les caniveaux ne pouvant être envisagée car, malgré les précautions prises, les tuyauteries sont le siège de pertes de chaleur qui provoqueraient un échauffement inadmissible des câbles électriques et de l'eau alimentaire.

En outre, pour des raisons d'ordre administratif et technique, ces diverses conduites doivent rester indépendantes les unes des autres;

4°) La vapeur est produite dans des conditions très économiques à la centrale. Pour conserver le bénéfice de cette économie après le transport, il faut que celui-ci ne donne lieu qu'à des pertes très faibles de chaleur.

Cette condition impose l'emploi de calorifuges de très bonne qualité en épaisseurs très fortes. A Verviers, les calorifuges utilisés ont été la laine de laitier et la soie de verre en épaisseurs de 140 mm.

On sait que les isolants thermiques ne tiennent leurs propriétés que de l'air qu'ils maintiennent au repos dans des cellules de très faibles dimensions.

L'air ne peut alors transmettre la chaleur que par conduction et sa très faible conductibilité thermique confère toutes leurs qualités aux isolants.

Dans ces conditions, on conçoit que les calorifuges fibreux ne doivent être ni trop, ni trop peu tassés lors de leur mise en œuvre et qu'ils doivent être maintenus secs. Sinon, l'eau se substituerait à l'air emprisonné dans les cellules de l'isolant et, étant beaucoup meilleure conductrice que l'air, elle augmenterait les pertes de chaleur dans de fortes proportions.

C'est ce qui explique l'obligation d'installer les tuyauteries calorifugées dans des caniveaux qui maintiennent les calorifuges à l'abri du tassement par les terres et de l'humidité qu'elles pourraient apporter.

La conductibilité des calorifuges utilisés à Verviers varie entre 0,03 et 0,04 cal/m²/m/heure/° C à la température ambiante. Elle diminue lentement lorsque la température augmente.

Tenant compte des dimensions atteintes par les tuyauteries recouvertes de calorifuge, par les organes de support et d'ancrage des tuyauteries, on a donné aux caniveaux une section hexagonale dont le cercle inscrit a un diamètre d'environ 800 mm.

Le caniveau est formé de béton armé d'une épaisseur d'environ 120 mm. Il est formé de deux parties, dont seule la supérieure peut être enlevée. Les deux parties sont reliées par un joint étanche en matières plastiques. Les tronçons successifs du caniveau sont également reliés par des joints verticaux étanches, ces joints s'opposant à l'entrée de l'eau dans le caniveau.

L'espace restant libre dans celui-ci ne permet pas la visite sans démontage;

5°) L'emploi des calorifuges réduit les pertes de chaleur des tuyauteries à très peu de chose. On en déduit que le métal des tuyauteries se trouve à une température très voisine

de celle de la vapeur, c'est-à-dire environ 210° à proximité de la centrale si la vapeur y était saturée, en réalité environ 250° à cause de la surchauffe communiquée à la vapeur.

Les conduites étant installées à froid subiront donc une dilatation lorsqu'elles seront mises en température.

La dilatation linéaire de l'acier étant comprise entre 0,01 et 0,02 mm. par mètre et par degré centigrade, on en conclut que la dilatation en marche peut atteindre 3 mm. par mètre.

Si aucune disposition n'était prise pour absorber cette dilatation, si le flambage des conduites était impossible, le module d'élasticité étant de 20.000, on aurait, sous l'effet de

$$\text{cette dilatation une compression proportionnelle de } \frac{1000}{20.000 \times 3} =$$

$$\text{ou encore une contrainte de compression de } \frac{1.000}{1.000} =$$

60 Kg/mm².

La limite élastique de compression serait donc largement dépassée et les conduites subiraient des déformations susceptibles de les déjeter et même de les déchirer.

Il existe, par conséquent, une obligation de recourir à des dispositifs susceptibles de compenser ces dilatations sans faire naître des tensions anormales dans les conduites.

Les compensateurs de dilatation seront des organes capables de subir de fortes déformations élastiques sans grands efforts.

A cette fin, on utilise les dispositifs en lyre, en accordéon, en soufflet ou à contacts glissants.

Le premier est trop encombrant; le dernier tend à créer des fuites de vapeur, par défaut d'étanchéité des bourrages. Les deux autres donnent une étanchéité complète, mais celui à soufflet ne peut absorber par élément qu'une très faible dilatation.

C'est ce qui explique qu'à Verviers, on ait recouru au compensateur en accordéon capable d'absorber jusqu'à 100 mm. de dilatation en ne présentant qu'un faible encombrement.

Ces propriétés ont permis de n'en installer que tous les 30 mètres;

6°) Bien que les conduites soient calorifugées et alimentées en vapeur surchauffée qui ne pourra se condenser qu'après avoir perdu sa surchauffe, il se produit néanmoins une certaine condensation de vapeur dans les conduites. Cette condensation est relativement d'autant plus importante que la quantité de vapeur parcourant les conduites est plus faible, car alors, chaque kilogramme de vapeur y séjourne plus longtemps.

L'eau de condensation a tendance à se rassembler aux points bas des conduites et à créer des perturbations et des coups de bélier. En outre, elle occasionnerait des désagréments dans les usines desservies et fausserait les indications des compteurs qui y sont installés.

Il est donc indispensable d'installer des purgeurs d'eau aux points bas des conduites. L'eau de purge ne pouvant être admise dans les caniveaux devra être rejetée directement à la Vesdre;

7°) Pour répartir d'une façon égale les dilatations entre les divers compensateurs, il est indispensable d'ancrer les conduites de distance en distance et de permettre leur libre dilatation entre ces ancrages en les portant sur des rouleaux;

8°) Malgré toutes les précautions prises, il est possible qu'une conduite se déchire.

Afin d'éviter une fuite de vapeur extrêmement importante dans ce cas, ou même une chute de pression excessive, il faut que le tronçon défectueux puisse être isolé, autant que possible sans troubler l'alimentation des usines desservies.

Il est nécessaire, par suite, de pourvoir bon nombre de raccords de deux vannes de sectionnement, l'une en amont, l'autre en aval de chaque raccordement. La conduite étant bouclée, le sectionnement d'un tronçon défectueux à ses deux extrémités n'amènera de trouble chez un petit nombre de clients desservis.

Ces vannes devront toujours être installées dans des fosses de visite;

9°) Les caniveaux n'étant pas visitables, ainsi qu'on l'a vu

au 4°, des joints existant dans les conduites pourraient donner lieu à des fuites de vapeur que l'on ne pourrait facilement déceler.

La vapeur s'échappant ainsi se condenserait dans les caniveaux et mouillerait les calorifuges, altérant fortement leurs qualités.

Pour échapper à ce danger, on a supprimé tous les joints dans les conduites en assemblant les tuyaux par soudure.

A l'endroit des soudures et au moment de leur exécution, des anneaux de garde étaient placés à l'intérieur des tuyaux afin d'empêcher le métal en fusion de couler à l'intérieur et d'y former des bourrelets préjudiciables au bon écoulement de la vapeur.

REPERCUSSION DU MODE DE DISTRIBUTION DE LA VAPEUR SUR LES INSTALLATIONS DE LA CENTRALE

Ayant examiné les principales caractéristiques du réseau de distribution, nous pouvons nous demander s'il convient de reprendre les eaux provenant de la condensation de la vapeur et de les renvoyer à la centrale.

Ceci présenterait l'avantage de l'alimentation des chaudières en eau encore tiède et distillée et cela éviterait l'achat et le traitement de fortes quantités d'eau avant leur introduction dans les chaudières. Par contre, il faudrait installer des conduites de retour aussi longues que les conduites de vapeur.

Or, il faut observer :

1°) que la quantité de vapeur condensée dans les conduites est très faible;

2°) qu'une grosse partie de la vapeur est condensée par barbotage chez les clients et que son condensat est irrécupérable;

3°) que la reprise des eaux chez les clients exigerait une modification de leurs installations intérieures à laquelle certains s'opposeraient;

4°) que pour conserver la chaleur de l'eau condensée, il faudrait calorifuger les conduites de retour.

En conclusion, le bénéfice du retour des eaux à la centrale serait très limité et il justifie d'autant moins l'installation des conduites de retour d'eau qu'à Verviers, on dispose de l'eau de la Gileppe très pure et à des conditions très avantageuses.

Cette eau ne contient que 25 à 30 mgr. de sels par litre.

Par suite, son traitement chimique n'est pas indispensable, un dégazage parfait étant toutefois nécessaire afin d'éviter la production de corrosions dans les chaudières.

Pour ces raisons, on a renoncé au retour des eaux à la centrale. Toutefois, l'alimentation se faisant en eau froide, on a pu recourir à des économiseurs comme récupérateurs de la chaleur contenue dans les fumées qui abandonnent les chaudières.

En outre, les fumées produisent un léger réchauffement de l'air de combustion. On échappe ainsi aux difficultés que crée l'emploi de l'air trop chaud comme comburant : fusion des cendres, détérioration des réfractaires, obligation d'utiliser des foyers à parois refroidies réduisant la possibilité des faibles allures.

Dans ces conditions, on a pu utiliser des foyers de très fortes dimensions permettant d'assurer une combustion très complète.

III. — COMPTAGE DE LA CHALEUR REÇUE CHEZ LES CLIENTS

A l'arrivée chez les industriels, la vapeur est maintenue automatiquement à la pression de 7 Kg/cm² par un régulateur et elle est filtrée afin d'en éliminer les impuretés dont elle aurait pu se charger dans les conduites, surtout à la première mise en route.

Enfin, elle passe dans un compteur.

Celui-ci consiste soit en un débitmètre à diaphragme, soit encore en un débitmètre à flotteur.

Dans le premier type de compteur, l'orifice du diaphragme est constant et la perte de charge variable. On mesure cette dernière, qui est fonction du débit instantané, à l'aide d'un manomètre différentiel au mercure.

En montant dans une des branches du manomètre, la colonne de mercure court-circuite des résistances électriques établies de façon que le courant parcourant un circuit dans lequel est comprise la colonne de mercure soit proportionnel au débit instantané.

En mesurant la quantité d'électricité qui parcourt ce circuit dans un temps donné à l'aide d'un ampèreheuremètre, on aura mesuré simultanément la quantité de vapeur qui a traversé le compteur pendant le même temps. Cette quantité de vapeur pourra être lue directement grâce à une graduation appropriée de l'ampèreheuremètre.

Dans l'autre type de compteur, la vapeur passe verticalement en allant vers le haut dans un venturi où elle tient un flotteur en suspension aérodynamique.

Celui-ci obstrue d'autant plus la section du venturi que le débit instantané est plus faible, la section étant toujours dégagée de façon telle que la perte de charge reste constante.

La position occupée par le flotteur dans le venturi est donc fonction du débit de vapeur et celui-ci est mesuré, intégré et enregistré par un appareil électrique influencé par la position de la tige portant et guidant le flotteur.

La graduation de ces compteurs est établie pour un état donné de la vapeur à leur entrée. A Verviers, grâce aux régulateurs automatiques de pression, cet état de la vapeur ne varie pratiquement pas.

En conséquence, les indications des compteurs fourniront avec une précision très satisfaisante les quantités de vapeur et, par suite, de chaleur fournies aux usines desservies.

IV. — DESCRIPTION SOMMAIRE DES INSTALLATIONS DE LA CENTRALE

La chaufferie comporte quatre chaudières à trois corps capables de produire de 40 à 50 tonnes de vapeur par heure. Leur surface de chauffe est de 1.000 m² et leur timbre de 25 Kg/cm² effectifs.

Elles sont pourvues de surchauffeurs et de désurchauffeurs maintenant la température de la vapeur à 250° et elles comportent chacune un économiseur de 570 m².

La centrale reçoit son charbon par chemin de fer. Les wagons arrivent sur une double voie entre les trémies de la chaufferie et le pare à charbon. Leur déchargement dans le pare et l'alimentation des trémies se fait par deux portiques à grapin.

Des trémies, le charbon descend dans les broyeurs à charbon qui, au nombre de deux par chaudière, leur fournissent le pulvérin directement refoulé dans le foyer.

Celui-ci a un volume de 300 m³, ce qui correspond à une allure maximum de la combustion de 125.000 à 150.000 calories par heure et par m³ de foyer. Cette allure très modérée permet de réaliser une excellente combustion du charbon sans développer une température nuisible aux réfactaires qui sont d'ailleurs refroidis par une circulation d'air.

Les cendres tombent sur une sole tournante dont elles sont extraites à l'état pulvérulent par un soc fixe.

Après dépoussiérage électrique, les fumées sont évacuées à l'atmosphère par une cheminée de 100 m. de hauteur.

Le tirage naturel assuré par cette cheminée est insuffisant et l'on a dû recourir à des ventilateurs de tirage permettant un réglage continu de vitesse par accouplements hydrauliques.

Les services auxiliaires sont assurés, d'une façon très sûre, par quatre transformateurs de 1.000 K.V.A.

De multiples appareils de contrôle et d'enregistrement permettent aux chauffeurs d'effectuer au moment opportun toutes les manœuvres utiles et, pour les commandes essentielles, à l'aide de simples boutons-poussoirs.

Le dégazage de l'eau, poussé très loin afin d'éviter les corrosions des chaudières, réduit la teneur en oxygène à moins de 0,01 cm³ par litre d'eau à 40/50°.

V. — CONCLUSIONS

Tout en respectant la prudence qui s'imposait, les dirigeants de l'Intervapeur Verviétoise ont réalisé des installations très modernes, pourvues des perfectionnements imposés par une technique très sûre.

Rien n'a été négligé pour réaliser une sécurité de marche très grande et les meilleures précautions ont été prises pour éviter les accidents.

Ajoutons que la plus grande partie des installations a été fournie par l'industrie belge à laquelle il convient de rendre hommage.

On a donc réalisé à Verviers, un réseau de distribution de chaleur de très grosse puissance et, dans ce domaine, les ingénieurs belges se sont de nouveau montrés au moins les égaux des étrangers.

Avant de clôturer cette étude, je tiens à remercier vivement mon Collègue, M. l'Ingénieur Principal Haidant, pour l'aide efficace qu'il m'a fournie dans la recherche de la documentation nécessaire.

Je n'ai pas abordé ici l'étude du dépoussiérage qu'il s'est réservé de traiter personnellement.

L'Ingénieur pour la Protection du Travail,

(Sé). PAQUAY.

J'ai laissé le soin à mon Collègue, M. l'Ingénieur Paquay, de traiter la question de la distribution de vapeur d'une manière générale.

Je me suis réservé deux questions spéciales : la production du charbon pulvérisé et le dépoussiérage électrostatique.

MODE DE CHAUFFAGE

La Société Electrobél qui a présidé à l'étude technique de l'installation de l'Intervapeur Verviétoise a arrêté son choix sur le chauffage au charbon pulvérisé.

Ce mode de chauffage permet l'emploi avec rendement élevé de combustibles inférieurs de catégories très différentes pouvant aller jusqu'aux schlamms des charbons maigres.

Il est d'ailleurs toujours possible, suivant les prix du marché du charbon, de choisir le combustible assurant un prix de revient minimum de la tonne-vapeur.

Le chauffage au charbon pulvérisé présente les avantages suivants : grande souplesse de marche permettant de suivre immédiatement les plus grandes fluctuations de charge, grande rapidité de mise en service des unités.

SYSTEME D'ALIMENTATION. — BROYEURS

On a envisagé d'abord le système à alimentation indirecte avec centrale de pulvérisation, on s'est arrêté ensuite au système direct avec broyeur individuel.

Ce système moins coûteux, moins encombrant, présente comme avantage le fait que le broyeur effectue à la fois le séchage, le broyage et l'injection du combustible.

On a choisi le pulvérisateur sécheur de charbon, le « Résolutor » construit par la S. A. Belge Stein et Roubaix.

C'est un broyeur à choc à une seule roue de pulvérisation pourvu d'un sélecteur à air. Le principe essentiel de cet appareil est de ne laisser séjourner la matière dans le broyeur que le temps strictement nécessaire à sa pulvérisation et d'extraire, dès sa formation, toute particule ayant atteint le degré de finesse requis.

La puissance absorbée sert uniquement à la pulvérisation des produits n'ayant pas atteint la finesse voulue.

* * *

L'appareil comporte :

1°) *Un distributeur*

La matière est introduite dans le distributeur par quatre

vis d'Archimède enfermées dans une gaine étanche et mues par moteur électrique indépendant à vitesse variable.

Les matières et l'air primaire sont introduites dans le corps du broyeur par deux goulottes symétriques par rapport à l'axe du distributeur.

2°) *Un organe broyeur*

La pulvérisation est réalisée par choc sur la matière, de palettes ou marteaux tournant à grande vitesse à l'intérieur d'une chambre de boyage.

3°) *Un extracteur-séparateur*

La rotation des palettes produit une ventilation continue de la matière et refoule celle-ci par une base tangentielle dans le séparateur.

Sur l'arbre du rotor est disposé un ventilateur qui aspire, en haut du séparateur un mélange d'air et de poussières de matière, dont la finesse est exactement déterminée par le réglage combiné du séparateur d'air et du ventilateur d'aspiration.

Les particules trop grossières retournent dans le corps du broyeur par deux conduites symétriques, pour être broyées à nouveau. La base de refoulement du ventilateur est raccordée à la tuyauterie allant au lieu d'utilisation du produit.

L'appareil Resolutor ne présente aucun danger pour le personnel. Tout son circuit, en dehors des conduites de refoulement se trouve sous dépression, ce qui élimine toute possibilité de dégagement de poussières. Il ne produit que très peu de bruit.

Foyers. — Les foyers à charbon pulvérisé ont également été fournis par la S. A. Belge Stein et Roubaix. Ces foyers sont à murs creux sur les quatre faces, sans tubes ni écran horizontal. L'air secondaire y est insufflé dans les couloirs horizontaux par le mur arrière. Le débit de chaque couloir est contrôlé par une vanne.

L'air secondaire passe dans l'épaisseur du mur arrière et des murs latéraux avant de pénétrer dans le foyer par de nombreuses lumières aménagées dans le mur frontal.

Le cendrier, de forme tronconique, est muni d'un écran d'air destiné à refroidir les mâchefers se déposant sur ses parois inclinées.

Les brûleurs sont du type Lopulco au nombre de quatre et disposés dans une voûte plate suspendue, recouvrant la partie avant du foyer.

DECRASSAGE AUTOMATIQUE

Les quatre chaudières sont munies d'un système de décrassage automatique à sole tournante.

Ce dispositif a été imaginé et appliqué pour la première fois en Belgique par la Société Stein et Roubaix en 1932. Comme les chaudières sont munies de dépoussiéreurs électriques permettant de réaliser la réinjection totale des suies, presque toute la quantité de cendres (96 % environ) contenue dans le charbon est évacuée par le dispositif sous forme de mâchefers friables ou granulés, ne donnant lieu au moindre dégagement de poussière même à l'état parfaitement sec.

Les mâchefers sous cette forme peuvent être employés pour la réfection des routes et en mélange avec le ciment, servir dans la construction.

Les soles tournantes des décrasseurs, munies d'un soc fixe déversent les mâchefers sur une courroie transporteuse qui les conduit dans des wagons de chemin de fer ou dans des camions.

REINJECTION DES SUIES

La Société Stein et Roubaix a également appliqué à la Centrale d'Intervapeur une de ses dernières réalisations dans le domaine du charbon pulvérisé — la réinjection totale des suies.

Il est universellement connu que la suie constitue un des plus grands inconvénients du système de chauffage au charbon pulvérisé.

Cette suie en très grande quantité (80 % environ des cendres du combustible + le carbone ou les imbrûlés) se dépose en partie dans le circuit du parcours des gaz, le reste étant évacué par la cheminée.

La situation de cette centrale en plein centre de la ville, imposait la suppression de la poussière à la cheminée, aussi des capteurs électriques très efficaces ont été installés retenant pratiquement toute la poussière.

La quantité de poussière captée et déposée par les quatre chaudières en pleine charge est de l'ordre de 4 Tonnes/heure. Son évacuation à sec est pratiquement impossible.

La captation et l'évacuation par voie humide exige de grandes quantités d'eau, des bassins de décantation et sa réalisation à Verviers aurait présenté des difficultés techniques presque insurmontables.

La réinjection totale des suies captées dans les foyers au moyen de ventilateurs appropriés et de venturifs constitue une solution pratique et élégante du problème.

La suie, en passant par le feu, en plus de la recombustion du carbone (d'où augmentation du rendement), abandonne la cendre pure à l'état granulé ou aggloméré friable laquelle se dépose dans le cendrier.

Une partie de la cendre, restée à l'état menu, refait le trajet des gaz jusqu'aux dépoussiéreurs électriques où elle est de nouveau captée et insufflée dans le foyer à l'endroit le plus chaud de la flamme.

Ainsi la majeure quantité des cendres contenues dans le charbon finit par se déposer dans le cendrier sous forme granulée ou agglomérée.

LE DEPOUSSIERAGE ELECTROSTATIQUE

Le dépoussiérage des fumées industrielles provenant des foyers des chaudières à vapeur est un problème auquel de nombreux chercheurs ont tenté de donner une solution. Il semble qu'il soit aujourd'hui possible d'obtenir des résultats intéressants.

On peut grouper les principaux systèmes de la manière suivante :

1°) *Les dépoussiéreurs par voie sèche*, dont l'action est basée sur la force centrifuge et parmi lesquels nous citerons les appareils *Pirmath* (de la firme Pirson et Cie de Chênée),

les *turbo-capturs* de la Société des Etablissements E. Prat-Daniel de Paris;

2°) *Les dépoussiéreurs par voie humide* (système Louis Prat de la Société des cheminées Louis Prat de Paris, le système *Modave* de la Société des ateliers J. Hanrez à Monceau-sur-Sambre, etc.);

3°) *Les appareils mixtes* : par exemple le système Duplex, de la Société anonyme Belge Stein et Roubaix;

4°) *Les appareils électrostatiques* (Siemens, S. I. P. G., etc.).

L'installation de dépoussiérage qui a été réalisée à la Centrale de l'Intervapeur Verviétoise par la *Société de Purification industrielle des gaz* (S. I. P. G.), 173, boulevard Haussmann, à Paris (représentée à Bruxelles par la S. A. Metropolitan-Vickers, 54, chaussée de Charleroi) comporte quatre dépoussiéreurs électrostatiques.

Ces appareils sont destinés à épurer les gaz des fumées de quatre chaudières Smulders, type Stirling, chauffées au charbon pulvérisé et d'une production horaire unitaire de vapeur de 40 à 50 tonnes.

Chacun des quatre dépoussiéreurs électrostatiques S. P. I. G. doit remplir théoriquement les conditions de fonctionnement suivantes :

Débit horaire des gaz jusqu'à 113.000 m³
Température des gaz de 125 à 185° 6.

Teneurs en poussières par m³ de gaz ramené à 0° C et 760 mm. de mercure :

à l'entrée du dépoussiéreur	à la sortie du dépoussiéreur	Rendement
85 grammes	1 gramme	98,82 %
60 »	0,8 »	98,66 %
40 »	0,65 »	98,34 %
20 »	0,50 »	97,50 %

La perte de charge des gaz entre l'entrée et la sortie d'un dépoussiéreur est de 5 mm. d'eau environ pour un débit de 314 m³/seconde (113.640 m³ heure) à la température des gaz.

Le refroidissement des gaz entre l'entrée et la sortie d'un appareil est d'environ 10 % de la température des gaz à l'entrée, en admettant une température extérieure de 0° C.

Les suies précipitées dans les trémies des dépoussiéreurs sont réinjectées dans les foyers des chaudières afin de récupérer les imbrûlés qu'elles contiennent.

La consommation horaire d'énergie électrique d'un dépoussiéreur (redresseur, moteur, etc.) mesurée en basse tension est de 10 kilowatts/heure environ.

Nous donnerons, d'après une étude de M. Hayert, Administrateur-Directeur de la S. P. I. G., quelques indications sur le procédé électrostatique.

Déjà dans l'antiquité, on avait remarqué que les poussières étaient attirées par un bâton d'ambre frotté. Les physiciens Hohlfeld, Guitard, Oliver Lodge firent diverses expériences concluantes, mais ce fut le docteur Frédérik Cottrell, professeur de physique et de chimie à l'Université de Californie, qui fit entrer le procédé électrostatique dans le domaine des réalisations industrielles.

Il a d'ailleurs donné son nom au procédé. Celui-ci a été perfectionné en Allemagne par le Dr. Erwin Möller; en France, par MM. Saget, de la Compagnie Générale de Radiologie, sous le patronage des professeurs d'Arsonval et Bordas, par M. le professeur Pauthenier, de la Faculté des Sciences de Paris.

Le système de précipitation électrostatique a fait l'objet de nombreux brevets dans le monde entier.

THEORIE ET FONCTIONNEMENT

Sous l'influence d'un champ électrique, on obtient le déplacement des poussières en suspension dans un gaz.

En pratique, les poussières reçoivent leur charge principalement du gaz, celui-ci étant ionisé sur place par l'effet corona d'un fil fin porté à une haute tension continue à l'intérieur d'un tube. La tension du fil est de signe invariable et négative, le tube est relié à la terre et à la polarité positive. Le courant gazeux entre par une des extrémités de la canalisa-

tion que constitue le cylindre, les poussières chargées par ionisation du fil d'une quantité d'électricité de même signe sont soumises à l'action du champ radial qui existe entre le fil et le cylindre et sont précipitées sur ce dernier. Le courant gazeux sort du cylindre presque entièrement débarrassé des poussières.

L'efficacité d'un dépoussiéreur dépend du temps d'action du champ et de la vitesse transversale correspondante.

Une installation de dépoussiérage comporte :

- 1°) Le dépoussiéreur proprement dit;
- 2°) Le poste d'alimentation.

Le *dépoussiéreur* est constitué par des chambres en tôle ou en maçonnerie renfermant les éléments de précipitation.

Les électrodes positives sont constituées par des tubes disposés verticalement, d'un diamètre de 20 à 30 cm. et d'une hauteur de 3 à 4 mètres. Les grandes installations, peuvent comporter plusieurs centaines de tubes.

Les électrodes négatives sont constituées par des fils fins ou des tiges d'acier de forme spéciale pouvant supporter des températures de 600° C. Ces fils sont fixés sur un cadre rigide et tendus par des contrepoids.

Pour faire tomber les poussières adhérant aux parois, on dispose, à Verviers, d'un système automatique de frappe des tubes et des fils.

Le *poste d'alimentation* doit permettre d'alimenter les chambres de précipitation par du courant continu à haute tension ayant une différence de potentiel comprise entre 50.000 et 100.000 volts, pour un débit de 100 à 500 milliampères.

Le courant continu peut être produit soit par des soupapes à gaz ou à émission thermo-ionique, soit par des redresseurs statiques.

En pratique, on se sert de préférence du commutateur tournant synchrone. Un poste comprend normalement :

- a) Un transformateur monophasé à 60.000 volts;
- b) Un autotransformateur à plots permettant d'obtenir la variation de tension;

- c) Un redresseur tournant entraîné par un moteur synchrone tétrapolaire à stator décalable;
- d) L'appareillage de protection et de commande;
- e) Des dispositifs d'élimination des parasites radiophoniques.

La puissance des transformateurs varie de 15 à 30 K. V. A. La puissance absorbée est d'environ 1/2 Kw-heure pour 3.600 m³ de gaz traités,

Le rendement, selon les constructeurs, atteindrait dans bien des cas 90 à 95 %.

Ce procédé s'applique non seulement au dépoussiérage de fumées des chaudières à vapeur, mais aussi dans les cimenteries; aux gaz de grillage provenant des fours à pyrite ou à blende; dans les usines métallurgiques traitant le plomb, l'étain, le cuivre, le zinc, l'argent; les fabriques d'engrais pour la récupération du carbonate de chaux; la fabrication de l'acide chlorhydrique, de l'acide nitrique, de l'acide phosphorique, etc.

* * *

Nous avons estimé devoir documenté nos collègues et le public au sujet de cette extraordinaire réalisation technique qu'est l'Intervapeur Verviétoise.

L'ingénieur peut étudier là-bas d'importantes applications de la thermodynamique, de la physique, de la chimie. Il y verra comment par l'examen rationnel des faits, on arrive aujourd'hui à limiter la peine des hommes non seulement dans le temps mais aussi dans l'espace.

Que l'on compare les chauffeurs des locomotives ou d'anciennes chaudières, fiévreux, haletants, le corps tendu, la figure noire de suie avec les chauffeurs des chaudières modernes à chargement automatique ou à charbon pulvérisé.

Ces derniers sont de véritables techniciens avec une mission plus intellectuelle que manuelle : ils examinent l'allure des flammes, ils contrôlent des pyromètres, des débitmètres, des manomètres, des diagrammes de consommation.

Ils n'ont plus à charger d'énormes quantités de charbon

dans le foyer avec l'effort unique et épuisant de leurs seuls bras...

D'autre part, en distribuant la vapeur dans les usines, on réalise une concentration d'énergie favorable au rendement.

On peut aussi entrevoir le moment où le pauvre comme le riche pourra, grâce à la distribution de vapeur à domicile, jouir des bienfaits du chauffage central.

Nous estimons, d'autre part, qu'il est plus aisé de réaliser un dépoussiérage scientifique en grand dans un ou plusieurs établissements importants que de l'imposer à d'innombrables petits fabricants qui ne disposent que d'une chaudière modeste et dont les moyens financiers sont limités.

Telle qu'elle fonctionne actuellement, la centrale *L'Intervapeur Verviétoise* est une œuvre scientifique de premier ordre.

Qu'il nous soit permis de remercier M. Snoeck, Ingénieur-Directeur de l'Intervapeur; M. Halzer, Ingénieur, Chef de Service à la Société d'Electricité de l'Est de la Belgique, pour la complaisance avec laquelle ils nous ont renseignés et pour les nombreux documents que, grâce à eux, nous avons pu consulter.

L'Ingénieur Principal
pour la Protection du Travail,
(Sé). HAIDANT.

DOCUMENTS ADMINISTRATIFS

MINISTÈRE DU TRAVAIL
ET DE LA PRÉVOYANCE SOCIALE

Etablissements classés comme dangereux, insalubres ou incommodes. — Modification de rubriques.

Le Secrétaire Général du Ministère du Travail et de la Prévoyance Sociale,

Vu l'arrêté royal du 10 août 1933, concernant la police des établissements classés comme dangereux, insalubres ou incommodes;

Vu l'arrêté royal du 15 octobre 1933, modifié notamment par celui du 26 octobre 1939 et portant classification des établissements dangereux, insalubres ou incommodes et spécialement les rubriques suivantes :

Automobiles, motocyclettes et autres véhicules du même genre munis de moteurs à explosion ou à combustion interne (garages d') où la quantité totale des liquides inflammables ou combustibles contenus dans les réservoirs des divers véhicules remisés, est :	Danger d'incendie, odeur désagréable, bruit.	
a) de 50 à 300 litres . . .		2
b) de plus de 300 litres . . .		1
Gaz comprimés, liquéfiés ou maintenus dissous à une pression supérieure à 1 kg./cm ² à l'exception des gaz butane et propane :	Danger d'explosion.	
a) dépôts de 10 à 20 réceptifs		2
b) dépôts de plus de 20 réceptifs		1

Gaz butane et propane liqué- fiés (dépôts de) contenant:	Danger d'explosion.	
a) de 100 à 600 kg. de gaz .	2	—
b) de plus de 600 kg. de gaz	1	—

Vu l'avis du service technique pour la protection du travail, chargé de la surveillance des établissements classés comme dangereux insalubres ou incommodes;

Considérant que l'extension croissante de l'usage de combustibles gazeux pour l'alimentation des moteurs de véhicules automobiles est de nature à provoquer dans les garages et dépôts de récipients contenant des gaz comprimés, liquéfiés ou dissous sous pression, des inconvénients et dangers nouveaux; qu'il paraît opportun de modifier les rubriques susvisées en tenant compte de l'application des derniers procédés techniques;

Vu la loi du 10 mai 1940, relative aux délégations de pouvoirs en temps de guerre, et notamment l'article 5 de cette loi;

Vu l'impossibilité de recourir à l'autorité supérieure,

Arrête :

Article premier. — La rubrique figurant à l'arrêté royal susvisé du 15 octobre 1933, modifiée par l'arrêté du 26 octobre 1939, et visant les garages d'automobiles, motocyclettes et autres véhicules du même genre munis de moteurs à explosion ou à combustion interne est remplacée par la suivante :

Désignation des industries, dépôts etc., dangereux, insalubres ou incommodes.	Indication de la nature de Classe leurs inconvénients.	Services à consulter à l'occasion de l'instruc- tion de demandes d'autorisation.
—	—	—
Automobiles (garages d') :	Danger d'incendie,	
a) pour 2 à 5 véhicules . . .	2 odeur désagréa-	—
b) pour plus de 5 véhicules.	1 ble, bruit.	—

Art. 2. — Les rubriques figurant à l'arrêté royal susvisé du 15 octobre 1933, modifiées par l'arrêté du 26 octobre 1939, et visant les dépôts de gaz comprimés, liquéfiés ou maintenus dis-

sous sous pression, ainsi que les dépôts de gaz butane et propane, sont remplacées par la rubrique unique suivante :

Désignation des industries, dépôts etc., dangereux, insalubres ou incommodes.	Indication de la nature de Classe leurs inconvénients.	Services à consulter à l'occasion de l'instruc- tion de demandes d'autorisation.
—	—	—
Gaz comprimés liquéfiés ou maintenus dissous sous une pression supérieure à 1 kg./ cm ² (dépôts de récipients de), d'une capacité totale en litres d'eau de 500 litres et plus.	1 Danger d'explosion et d'échappement de gaz.	—

Bruxelles, le 29 novembre 1940.

VERWILGHEN.

MINISTERE DES AFFAIRES ECONOMIQUES
ET MINISTERE
DU TRAVAIL ET DE LA PREVOYANCE SOCIALE

Tutelle sanitaire

Arrêté du 3 décembre 1940 applicable aux travailleurs des mines, minières et carrières souterraines, pris en exécution de l'article premier, alinéa 3, de l'arrêté royal du 17 avril 1940, concernant la tutelle sanitaire des adolescents au travail.

Le Secrétaire Général du Ministère des Affaires Economiques, et

Le Secrétaire Général du Ministère du Travail et de la Prévoyance Sociale,

Vu l'arrêté royal du 17 avril 1940, remplaçant les dispositions des arrêtés royaux des 28 septembre 1936, 15 décembre 1938 et 13 décembre 1939, concernant la tutelle sanitaire des adolescents au travail

Vu, plus spécialement, la prescription de l'article premier, alinéa 3, de cet arrêté, suivant laquelle les dispositions nouvelles ne sont pas applicables aux travailleurs des mines, minières et carrières souterraines, lesquels feront l'objet, à cet égard, d'un règlement particulier;

Vu l'article 76 des lois minières coordonnées par l'arrêté royal du 15 septembre 1919;

Vu l'avis du Conseil des Mines, en date des 4, 11 et 18 octobre 1940;

Revu l'avis du Conseil Supérieur d'Hygiène;

Vu la loi du 10 mai 1940, relative aux délégations de pouvoirs en temps de guerre;

Considérant qu'il convient de faire bénéficier les travailleurs des mines, minières et carrières souterraines, d'une tutelle sanitaire exercée en principe, suivant les mêmes modalités que celles fixées par l'arrêté royal précité du 17 avril 1940;

Vu l'impossibilité de recourir à l'autorité supérieure,

Arrêtent :

Article premier. — Les prescriptions des articles 2 à 10 de l'arrêté royal du 17 avril 1940, remplaçant les dispositions des arrêtés royaux des 28 septembre 1936, 15 décembre 1938 et 13 décembre 1939, concernant la tutelle sanitaire des adolescents au travail, sont rendues applicables aux adolescents de moins de 18 ans, sans distinction, occupés tant dans les travaux souterrains que dans les dépendances superficielles des mines, minières et carrières souterraines.

Art. 2. — Les médecins pour la protection du travail sont spécialement chargés de surveiller cette application.

Art. 3. — Des dérogations à ces prescriptions, pour des durées de trois ans au maximum, toujours révocables mais aussi renouvelables après examen, peuvent être accordées par les ingénieurs en chef-directeurs des arrondissements miniers, sur avis du médecin pour la protection du travail.

Le chef du département compétent statuera après avoir pris l'avis de l'inspecteur général des mines et de l'inspecteur général, chef du Service médical pour la protection du travail, sur les pourvois auxquels donneraient lieu les décisions des ingénieurs en chef-directeurs des arrondissements miniers.

Art. 4. — Les infractions aux prescriptions du présent arrêté, ainsi que les infractions aux conditions des autorisations qui auraient été accordées d'y déroger, seront poursuivies et punies conformément aux articles 130 et 131 des lois minières coordonnées par l'arrêté royal du 15 septembre 1919.

La constatation, par procès-verbal, des infractions commises est réservée aux ingénieurs des mines, qui entendront au préalable le médecin pour la protection du travail, chef de district.

Bruxelles, le 3 décembre 1940.

Le Secrétaire Général du Ministère des Affaires Economiques :
V. LEEMANS.

*Le Secrétaire Général
du Ministère du Travail et de la Prévoyance Sociale :*
VERWILGHEN.

DIRECTION GENERALE DES MINES

Circulaires Ministérielles

Puits et circulation du personnel dans les puits.

N° 13 F/5350

Bruxelles, le 9 mars 1940.

Monsieur l'Ingénieur en Chef,

Un accident grave est survenu récemment dans un charbonnage du bassin de Charleroi, dans les circonstances résumées ci-après :

Au moment où il sortait de la cage, à un envoi, un repasseur de puits a été tué par une brique qui s'est détachée de la tonne du puits.

L'espace existant entre la cage et la couronne de l'envoi était de 0^m48.

En vue d'éviter le renouvellement d'un accident de ce genre, la direction du charbonnage a été invitée à réduire l'espace existant entre la cage et la couronne de l'envoi en y établissant un hourd à toit.

D'autre part, M. l'Inspecteur Général des Mines a émis l'avis suivant, auquel je me rallie :

« Il est indispensable que, pour tout envoi, l'espace compris entre la couronne de l'envoi et la cage soit fermé par un hourd à toit, destiné à protéger contre la chute de pierres, briques, etc... le personnel entrant dans la cage ou en sortant, soit encageant ou dégageant des wagonnets. »

Vous voudrez bien porter ce qui précède à la connaissance de MM. les Ingénieurs et délégués sous vos ordres, ainsi qu'à celle des exploitants que la chose concerne.

Au nom du Ministre :

Le Directeur Général des Mines,
G. RAVEN.

N° 13 F/5373.

Bruxelles, le 1^{er} août 1940.

Monsieur l'Ingénieur en Chef,

Un câble métallique plat équipant un puits de retour d'air fermé par clapets Briart s'est rompu il y a quelque temps dans les principales circonstances suivantes :

La rupture a eu lieu immédiatement au-dessus de la patte, au moment du soulèvement au fond, d'une cage chargée.

La section de rupture correspond au point où le câble se pliait sur lui-même chaque fois que la cage était posée sur les taquets hydrauliques du fond.

Elle correspond également à la ligne d'appui du chapeau que la patte du câble soulevait avant que le clapet lui-même ne fût entraîné par les chaînettes de suspension de la cage.

Elle correspond en outre aux quelques décimètres de câble masqués par le clapet et qui, pour cette raison, échappaient normalement à l'examen des visiteurs de câbles.

Enfin, le dernier renouvellement de la patte datait de plus de trois mois.

En vue de prévenir le retour d'accidents de l'espèce, M. l'Ingénieur en chef-Directeur de l'arrondissement minier a émis l'avis qu'il est indispensable de visiter les pattes à l'endroit éventuellement masqué par le chapeau du clapet Briart à l'arrivée de la cage à la surface.

Il s'est exprimé à ce sujet comme suit : « A cette fin, le chapeau doit être soulevé pour mettre à jour la portion qu'il masque

et qui est précisément la plus exposée à s'abîmer par les replis de la patte sur la cage durant les manœuvres de celle-ci à l'étage du fond ».

Je me suis rallié à cet avis.

Vous voudrez bien porter ce qui précède à la connaissance de MM. les Ingénieurs et Délégués sous vos ordres, ainsi qu'à celle des exploitants des mines de votre arrondissement.

Le Directeur Général des Mines,
G. RAVEN.

Explorations du sous-sol

N° 4 c/8.

Bruxelles, le 29 mars 1940.

Monsieur l'Ingénieur en Chef,

Un arrêté royal et un arrêté ministériel, l'un et l'autre en date du 5 janvier 1940, publiés au *Moniteur Belge* des 20 et 28 janvier 1940, pp. 242-243 et 353, ont fixé les mesures d'exécution de l'arrêté royal du 28 novembre 1939, publié au *Moniteur Belge* du 8 décembre 1939, pp. 8364-8365, portant obligation de déclarer les explorations du sous-sol.

Les arrêtés d'exécution définissent la part d'intervention des arrondissements miniers dans cette réglementation nouvelle. Il est bien évident que celle-ci n'abroge en rien les prescriptions en vigueur relatives à la police des mines. Elle ne s'applique d'ailleurs pas aux travaux d'exploitation ou de préparation proprement dits. Elle vise les travaux qui ont pour but une connaissance plus étendue ou plus précise de la constitution des gisements, tels que sondages profonds, même simplement destinés à définir l'épaisseur ou la constitution des « morts terrains » au sens le plus large de ce terme, ravales importantes de puits, galeries

poussées en reconnaissance en terrains neufs ou insuffisamment explorés.

Il conviendra que vous me fassiez parvenir copie conforme, en deux exemplaires, des déclarations qui vous seront adressées afin que le Service géologique, alerté par mes soins, vous prête son concours dans la récolte des renseignements utiles à la confection de la carte géologique, y compris la carte des mines, et à celle de la carte hydrologique.

De mon côté, je vous communiquerai les déclarations qui, adressées à l'Administration Centrale des Mines, auront trait à des territoires concédés et seront de nature à intéresser les exploitations minières.

Vous aurez soin d'accuser réception des informations qui vous parviendront directement et de tenir dans un registre spécial l'inventaire de toutes les déclarations, en distinguant spécialement celles de caractère confidentiel.

Il conviendra également de signaler particulièrement ces dernières à l'attention des membres de votre personnel et plus spécialement à celle des Ingénieurs qui assumeront la surveillance des travaux s'y rapportant, de manière qu'ils connaissent nettement la responsabilité qu'ils encourraient s'ils manquaient de discrétion.

En tous cas, c'est-à-dire de façon générale, il y aura lieu quant aux explorations du sous-sol de s'en tenir à la règle ordinaire en matière de travaux miniers, de ne rien divulguer sans l'accord préalable des exploitants.

Cependant vous aurez soin de mentionner dans vos rapports semestriels les principaux résultats d'ordre tant géologique qu'hydrologique (ces derniers pouvant être d'importance extrême pour la sécurité des exploitations) obtenus grâce aux explorations du sous-sol et de reproduire sous forme de notes annexes ceux qui pourraient être publiés dans les *Annales des Mines de Belgique*.

Quant à la constatation des infractions, elle sera faite suivant les règles habituelles.

Pour le Ministre :
Le Directeur Général des Mines,
G. RAVEN.

N° 4 c/23.

Bruxelles, le 31 décembre 1940.

Monsieur l'Ingénieur en Chef,

En complément à ma circulaire n° 4 c/8 en date du 29 mars 1940, concernant les dispositions nouvelles prises au sujet de l'obligation de déclarer les explorations du sous-sol (arrêtés royaux des 23 novembre 1939 et 5 janvier 1940 et arrêté ministériel du 5 janvier 1940), j'ai l'honneur d'attirer votre attention et, par votre intermédiaire, celle des exploitants de mines, sur l'interprétation qu'il convient de donner à l'article premier de l'arrêté royal du 28 novembre 1939, en ce qui concerne tant les puits que les galeries à travers-bancs.

Pour ce qui est des puits, il faut tenir comme « reprise par voie d'extension » leur recarrage méthodique par augmentation notable de la section transversale sur une hauteur importante.

Nombreux sont, en effet, les puits anciens dont on ne possède qu'une coupe sommaire, voire même aucune coupe. Sans parler de l'intérêt que pareil document présente toujours, surtout au bout de quelques années, pour la surveillance et l'entretien du puits, il faut remarquer qu'une coupe détaillée permet souvent de préciser de façon plus correcte les allures du gisement par définition ou rectification de la synonymie des veines et veinettes traversées ou par localisation plus exacte du passage des failles et autres accidents.

Quant aux galeries à travers-bancs, il y a lieu de les considérer comme d'exploration, non seulement lorsqu'elles pénètrent en dehors du territoire concédé par voie de percement d'esponte, mais encore quand elles sont poussées en terrains neufs ou mal connus, par exemple à la recherche de nouvelles veines de houille.

Le Directeur Général des Mines,
G. RAVEN.

AMBTELIJKE BESCHEIDEN

MINISTERIE VAN ARBEID EN SOCIALE VOORZORG

Als gevaarlijk, ongezond of hinderlijk ingedeelde inrichtingen. — Wijziging van rubrieken.

De Secretaris Generaal van het Ministerie van
Arbeid en Sociale Voorzorg ,

Gelet op het koninklijk besluit van 10 Augustus 1933, betreffende de politie der als gevaarlijk, ongezond of hinderlijk ingedeelde inrichtingen ;

Gelet op het koninklijk besluit dd.15 October 1933, ondermeer gewijzigd bij dit van 26 October 1939, en houdende classificatie der als gevaarlijk, ongezond of hinderlijk ingedeelde inrichtingen en vooral op de volgende rubrieken :

Autos, motorvoertuigen en andere dergelijke voertuigen met explosiemotoren met inwendige verbranding (bergplaatsen voor) waar de totale hoeveelheid ontvlambare of brandbare vloeistoffen en de vergaarbakken van de daar geborgen voertuigen te samen bedraagt :	Brandgevaar, on-aangename reuk, gerucht.
---	--

- | | | |
|---------------------------|---|---|
| a) van 50 tot 300 liter . | 2 | — |
| b) meer dan 300 liter . . | 1 | — |

Gassen (opslagruimten van) samengeperst, vloeibaargemaakt of in oplossing gehouden onder de drukking van meer dan 1 kg./cm ² , met uitzondering van butaangas en propaangas :	Ontploffingsgevaar.
--	---------------------

a) opslagruimten van 10 tot 20 vaten.	2	—
b) opslagruimten van meer dan 20 vaten.	1	—
Gas (opslagruimten voor vloeibaargemaakt propaan- en butaan-) van :		Gevaar voor brand, en ontploffing.
a) 100 à 600 kg. gas.	2	—
b) meer dan 600 kg. gas.	1	—

Gelet op het advies van den technischen dienst voor arbeidsbescherming, belast met het toezicht op de als gevaarlijk, ongezond of hinderlijk ingedeelde inrichtingen;

Overwegende dat de bestendige uitbreiding van het gebruik van gasbrandstoffen voor het alimenteren der motoren van autovoertuigen van den aard is om in de bergplaatsen voor autos en in de opslagruimten van recipiënten voor het inhouden van samengeperste, vloeibaargemaakte of onder drukking opgelost gehouden gassen, nieuwe gevaren en ongemakken te veroorzaken; dat het gepast blijkt bovenbedoelde rubrieken te wijzigen, onder inachtneming van de toepassing der nieuwste technische procédés;

Gelet op de wet van 10 Mei 1940, betreffende overdracht van bevoegdheid in oorlogstijd en namelijk op artikel 5 daarvan;

Gelet op de onmogelijkheid de hoogere overheid te laten beslissen,

Besluit :

Artikel één. — De in bovenbedoeld koninklijk besluit dd. 15 October 1933 voorkomende rubriek, gewijzigd bij het besluit dd. 26 October 1939, en betreffende de bergplaatsen voor autos, motorfietsen en andere dergelijke voertuigen met explosiemotoren of motoren met inwendige verbranding wordt door de volgende rubriek **vervangen** :

Opgave van de inrichtingen bedrijven, opslagruimten, enz., als gevaarlijk, ongezond of hinderlijk geacht.	Klasse	Opgave van den aard der ongemakken.	Diensten die te raadplegen zijn ter gelegenheid van het onderzoek der vergunning- aanvragen.
—	—	—	—
Autos (bergplaatsen voor) :			
a) van 2 tot 5 voertuigen;		Brandgevaar, on-	—
b) van meer dan 5 voertuigen.	2	aangename reuk,	—
	1	gerucht.	—

Art. 2. — De in bovenbedoeld koninklijk besluit dd. 15 October 1933 voorkomende rubrieken, gewijzigd bij het besluit dd. 26 October 1939, en betreffende de opslagruimten voor samengeperste vloeibaargemaakte of onder drukking opgelost gehouden gassen, alsook de opslagruimten voor butaan- en propaangas worden vervangen door de volgende eenige rubriek :

Opgave van de inrichtingen bedrijven, opslagruimten, enz., als gevaarlijk, ongezond of hinderlijk geacht.	Klasse	Opgave van den aard der ongemakken.	Diensten die te raadplegen zijn ter gelegenheid van het onderzoek der vergunning- aanvragen.
—	—	—	—
Gassen onder een drukking van meer dan 1 kg/cm ² samengeperst, vloeibaargemaakt of in oplossing gehouden (opslagruimten van recipiënten voor) met een gezamenlijk waterinhoudsvermogen van 500 liter en meer.	1	Gevaar voor ontploffing en voor ontsnapping der gassen.	—

VERWILGHEN.

Brussel, den 29^e November 1940.

MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN
EN MINISTERIE VAN ARBEID EN SOCIALE VOORZORG

Medisch toezicht

Besluit van 3 December 1940 toepasselijk op de arbeiders der mijnen, graverijen en ondergrondse groeven, getroffen ter uitvoering van artikel één, alinea 3, van het koninklijk besluit van 17 April 1940, betreffende het medisch toezicht op de jongearbeiders.

De Secretaris Generaal van het Ministerie van Economische Zaken, en

De Secretaris Generaal van het Ministerie van Arbeid en Sociale Voorzorg,

Gelet op het koninklijk besluit van 17 April 1940, waarbij de beschikkingen worden vervangen van de koninklijke besluiten van 28 September 1936, 15 December 1938 et 13 December 1939, betreffende het medisch toezicht op de jonge arbeiders;

Gelet inzonderheid, op het bepaalde in artikel één, alinea 3, van dit besluit, volgens hetwelk de bepalingen van dit besluit niet toepasselijk zijn op de werklieden van de mijnen, graverijen en ondergrondse groeven, voor wie daaromtrent een bijzonder reglement zal worden gemaakt;

Gelet op artikel 76 der bij koninklijk besluit van 15 September 1919 samengeordende mijnwetten;

Gelet op het advies van den Mynraad, in datum van 4, 11 en 18 October 1940;

Herzien het advies van den Hoogen Gezondheidsraad;

Gelet op de wet van 10 Mei 1940 betreffende overdracht van bevoegdheid in oorlogstijd;

Overwegende dat het behoort aan de arbeiders der mijnen, graverijen en ondergrondse groeven het voordeel te verschaffen van een medisch toezicht dat, in principe, zal uitgeoefend worden volgens dezelfde modaliteiten als deze die bij meergenoemd koninklijk besluit van 17 April 1940 vastgesteld zijn;

Gezien het onmogelijk is op de hoogere overheid beroep te doen,

Besluiten :

Artikel één. — De voorschriften van artikelen 2 à 10 van het koninklijk besluit van 17 April 1940, ter vervanging van de schikkingen der koninklijke besluiten van 28 September 1936, 15 December 1938 en 13 December 1939, betreffende het medisch toezicht op de jonge arbeiders worden toepasselijk op de jonge lieden beneden 18 jaar zonder onderscheiding, die gebezigd zijn zoowel in de ondergrondse werken als in de bovengrondse aanhoorigheden der mijnen, graverijen en ondergrondse groeven.

Art. 2. — De geneesheeren voor de arbeidsbescherming zijn bijzonder belast met het toezicht op deze toepassing.

Art. 3. — De hoofdingenieurs-directeurs der mijnarrondissementen kunnen, op advies van den geneesheer voor de arbeidsbescherming van deze voorschriften afwijkingen verleenen, die voor een termijn van hoogstens drie jaar gelden en die steeds herroepbaar maar ook na onderzoek hernieuwbaar zijn.

Het hoofd van het bevoegd departement zal beslissen, na het advies te hebben ingewonnen van den inspecteur generaal der mijnen en van den inspecteur generaal, hoofd van den medischen dienst voor de arbeidsbescherming, over de beroepen waartoe de beslissingen van de hoofdingenieurs-directeurs der mijnarrondissementen zouden aanleiding geven.

Art. 4. — De inbreuken op de voorschriften van dit besluit, alsmede de inbreuken op de voorwaarden der machtelingen die zouden verleend zijn er van af te wijken, worden vervolgd en gestraft overeenkomstig artikelen 130 en 131 der bij koninklijk besluit van 15 September 1919 samengeordende mijnwetten.

De vaststelling bij proces-vebaal, der gepleegde inbreuken wordt voorbehouden voor de ingenieurs van het mijnwezen, welke vooraf den geneesheer voor de arbeidsbescherming, districthoofd, zullen hooren.

Brussel, den 3^e December 1940.

*De Secretaris Generaal
van het Ministerie van Economische Zaken :*

V. LEEMANS.

*De Secretaris Generaal
van het Ministerie van Arbeid en Sociale Voorzorg :*

VERWILGHEN.

ALGEMEENE DIRECTIE VAN HET MIJNWEZEN

Ministerieele Omzendbrieven

De toegangswegen en de schachten

N^o 13 F/5350.

Brussel, den 9^e Maart 1940.

Mijnheer de Hoofdingenieur,

Een zwaar ongeval heeft zich onlangs in een kolenmijn van het bekken van Charleroi voorgedaan, in de volgende omstandigheden :

Op het oogenblik dat hij op een laadplaats, uit een kooi kwam, werd een werkmán gedood door een baksteen die van de schachtbekleding losgegaan was.

De ruimte tusschen de kooi en de kruin der laadplaats bedroeg 0^m48.

Om de hernaling van dergelijke ongevallen te vermijden werd aan het Bestuur der Kolenmijn aanbevolen deze ruimte te verminderen, door het aanbrenge van een beschermingsvloer.

Anderdeels heeft de H. Inspecteur-Generaal der Mijnen het volgend advies uitgebracht, waarbij ik mij aansluit :

« Bij elke laadplaats moet de ruimte tusschen de kruin van de laadplaats en de kooi noodzakelijk door een beschermingsvloer afgesloten zijn, waarbij het personeel dat in of uit de kooi treedt, of dat de kooi laadt of lost, tegen neervallende steenen, baksteen, enz... beveiligd wordt ».

Gelieve de HH. Ingenieurs en Afgevaardigden van uw arron-

dissement, alsmede de exploitanten die deze zaak aanbelangt in kennis te stellen van het voorgaande.

Voor den Minister :

De Directeur-Generaal van het Mijnwezen :

G. RAVEN.

N^o 13 F/5373.

Brussel, den 1^o Augustus 1940.

Heer Hoofdingenieur,

Een platte metalen kabel waarmede een schacht voor lucht-afvoer gesloten door kleppen van het stelsel Briart uitgerust was, is voor eenigen tijd in de volgende bijzondere omstandigheden gebroken.

De breuk deed zich voor onmiddellijk boven de kabellus, op den oogenblik dat in den ondergrond een geladen kooi opgetrokken werd.

Het breukvlak komt overeen met de plaats waar de kabel werd geplooid telkens wanneer de kooi op de hydraulische kooirusten van den ondergrond werd geplaatst.

Het komt insgelijks overeen met de steunlijn van de kap welke de lussen van den kabel oplicht, vooraleer de klep zelf door de ophangkettingen der kooi mede opgeheven wordt.

Het komt daarenboven overeen met de enkele decimeters kabel, welke verborgen zijn onder de klep en dewelke, uit dien hoofde, gewoonlijk ontsnappen aan het nazicht der kabelonderzoekers.

De laatste hernieuwing van de kabellus dateerde van over meer dan drie maanden.

Met het inzicht te voorkomen dat dergelijke ongevallen zich opnieuw zouden voordoen, heeft de Heer Hoofdingenieur-Directeur van het Mijnnarrondissement het advies geuit dat het volstrekt

noodzakelijk is de lus van den kabel na te zien op de plaats welke desgevallend door de kabelkap van de Briart klep verborgen is, wanneer de kooi aan den bovengrond komt.

Hij heeft zich als volgt uitgedrukt : « A cette fin, le chapeau doit être soulevé pour mettre à jour la portion qu'il masque et qui est précisément la plus exposée à s'abîmer par les replis de la patte sur la cage durant les manœuvres de celle-ci à l'étage du fond ».

Ik heb mij bij dit advies aangesloten.

Gelieve wat voorafgaat ter kennis te brengen van de Heeren Ingenieurs en Afgevaardigden van uw arrondissement en van de mijnuitbaters van uw arrondissement.

De Directeur-Generaal van het Mijnwezen :

Secretaris-Generaal a.i.,

G. RAVEN.

Ondergrondse onderzoeken

N^o 4 c/8.

Brussel, den 29^o Maart 1940.

Heer Hoofdingenieur,

Een koninklijk besluit en een ministerieel besluit beiden van 5 Januari 1940, door het *Belgisch Staatsblad* van 20 en 28 Januari 1940, blz. 242, 243 en 353, bekend gemaakt, hebben de uitvoeringsbepalingen vastgesteld van het koninklijk besluit dd. 28 November 1939, door het *Belgisch Staatsblad* van 8 December 1939, blz. 8364-8365 gepubliceerd, houdende verplichting der ondergrondsonderzoeken aan te geven.

De uitvoeringsbesluiten bepalen de tusschenkomst der mijnarrondissementen, bij deze nieuwe reglementeering. Het spreekt van zelf dat deze geen enkel der vigeerende voorschriften inzake mijnpolitie intrekt. Trouwens, is zij niet toepasselijk op exploitatiewerken of op eigenlijke voorbereiding. Zij beoogt de werken die tot doel hebben een meer uitgebreide en nauwkeuriger kennis der samenstelling der mijnbeddingen zooals: diepe sondeeringen, zelfs alleenlijk bestemd tot het bepalen der dikte of samenstelling der dekterreinen in den breedsten zin dezer bewoording, belangrijke uitdieping der putten, uitgedolven gaanderijen in nieuwe of onvoldoende onderzochte gronden.

Het zou betamen dat U mij in dubbel exemplaar een eensluitend afschrift liet geworden der aangiften die U zullen toekomen, ten einde de Aardkundigen Dienst, door mij op de hoogte gesteld, toe te laten U zijn bemiddeling te verleen tot het verzamelen der nuttige gegevens tot het opmaken der aardkundige kaart, de mijnkaart inbegrepen en tot deze der hydrologische kaart.

Van mijn kant zal ik U de verklaringen mededeelen aan het Hoofdbestuur van het Mijnwezen overgemaakt, die betrekking hebben op geconcedeerde gronden, en die de mijnexploitaties kunnen aanbelangen.

Gelieve de ontvangst te melden van de verklaringen die U rechtstreeks zullen toekomen en in speciaal register den inventaris te houden van al de verklaringen, bijzonder rekening houdende van deze die als vertrouwelijk te beschouwen zijn.

Het zal insgelijks passen de leden van uw personeel, en meer bijzonder de Ingenieurs die het toezicht over deze werken uitoefenen, attent te maken op deze vertrouwelijke verklaringen, opdat zij duidelijk hun verantwoordelijkheid zouden kennen indien zij niet bescheiden zouden zijn.

In alle gevallen, t.t.z. bijna in 't algemeen, zal men, wat betreft de grondonderzoekingen, rekening houden met den gewonen regel inzake mijnwerken, van niets ruchtbaar te maken zonder voorafgaande toelating der ontginners.

Nochtans dient U in uwe halfjaarlijksche verslagen de bijzonderste resultaten door de grondonderzoekingen bekomen te melden, zoowel van aardkundigen als van hydrologischen aard (deze laatste kunnen zeer belangrijk zijn voor de veiligheid der exploi-

taties) en onder bijgevoegde nota's, diegene die voor de *Annales des Mines de Belgique* dienen gepubliceerd

Het vaststellen der overtredingen dient volgens de gewone regels gedaan.

Namens den Minister :

De Directeur-Generaal van het Mijnwezen :

G. RAVEN.

N^r 4 c/23.

Brusel, den 31ⁿ December 1940.

Heer Hoofdingenieur,

Ten titel van bijvoegsel bij mijn omzendbrief n^r 4 c/8, van 29 Maart 1940, aangaande de nieuwe bepalingen nopens de verplichting de grondonderzoekingen aan te geven (koninklijke besluiten van 28 November 1939 en 5 Januari 1940 en ministerieel besluit van 5 Januari 1940), heb ik de eer U en door uwe bemiddeling, de bedrijfsleiders attent te maken op de behoorlijke opvatting van artikel één van het koninklijk besluit van 28 November 1939, wat schachten en steengangen betreft.

Aangaande de schachten, dienen het verbouwen als « hervattingen bij uitbreiding » beschouwd, als deze werken op eene belangrijke hoogte en met eene opmerkelijke uitbreiding van de doorsnede methodisch uitgevoerd worden.

Er zijn inderdaad vele oude schachten waarvan het aardkundige profiel slechts in zijne hoofdtrekken, of wel volstrekt niet bekend is. Ongeacht het belang dat zulk een profiel, altijd maar bijzonderlijk na eenige jaren, bezit, voor het onderhoud en het toezicht van de schacht, dient opgemerkt dat een nauwkeurig profiel der schacht, een verbeterde kennis der gesteldheid van de mijnbeddingen dikwijls toelaat (vaststelling of verbetering der benamingen van de aangesneden lagen en riffels; nauwkeuriger plaatsbepaling van verschuivingen en andere storingen).

Aangaande de steengangen, moeten ze als onderzoekingsgaanderijen beschouwd worden niet alleen als ze met doorbraak dan den grensmuur buiten het vergund mijnveld uitgevoerd worden, maar ook als ze in nieuwe of onvoldoende onderzochte terreinen uitgedolven worden, bijvoorbeeld om nieuwe koollagen te ontdekken.

De Directeur-Generaal van het Mijnwezen :

G. RAVEN.

ANNALES DES MINES DE BELGIQUE

TOME XLI. — ANNÉE 1940

TABLE ALPHABETIQUE DES AUTEURS

ANCIAUX, H., Ingénieur en chef-Directeur des Mines,
à Bruxelles.

*Belgique. — L'industrie charbonnière pendant
l'année 1939. — Statistique provisoire et vue
d'ensemble sur l'exploitation (en collaboration
avec M. RAVEN, G.)* 247 I

Annexes :

*Résultats de l'exploitation des mines de houille
en 1939* 270 I

Récapitulation des résultats par tonne depuis 1927 271 I

BLANJEAN, L., Ingénieur civil mécanicien et électri-
cien, Chargé de recherches du Fonds National
de la Recherche Scientifique.

*Etude d'anneaux circulaires à forte courbure rela-
tive sollicités par deux forces diamétralement
opposées* 775 IV

BREYRE, H., Ingénieur en chef-Directeur des Mines,
Administrateur-Directeur de l'Institut National
des Mines, à Frameries-Paturages, Professeur à
l'Université de Liège.

*Rapport sur les travaux de 1939 de l'Institut
National des Mines* 1 I

Annexes :

<i>Application de l'interféromètre aux analyses des grisous et autres gaz de mines</i> (par VAN OUDENHOVE, F., Ingénieur chimiste et NENQUIN, G.)	109	I
<i>Examen de quelques masques à poussières</i> (deuxième note) (par FRIPIAT, J., Ingénieur principal des Mines, attaché à l'Institut National des Mines)	145	I
<i>Contribution à l'étude spectrographique du mécanisme de la combustion du méthane</i> (par COPPENS, L., Docteur en sciences, Attaché à l'Institut National des Mines)	177	I
COPPENS, L., Docteur en sciences, Attaché à l'Institut National des Mines de Frameries-Paturages.		
<i>Contribution à l'étude spectrographique du mécanisme de la combustion du méthane</i>	177	I
FIRKET, V., Inspecteur général honoraire des Mines, à Liège.		
<i>Utilisation des combustibles</i> , par A. SIRON	577	II
FRIPIAT, J., Ingénieur principal des Mines, Attaché à l'Institut National des Mines de Frameries-Paturages.		
<i>Examen de quelques masques à poussières</i> (deuxième note)	145	I
GÉRARD, P., Ingénieur principal des Mines, à Hasselt.		
<i>Note sur l'activité des mines de houille du Bassin du Nord de la Belgique pendant le second semestre 1939</i>	443	II

HAIDANT, P., Ingénieur principal pour la protection du Travail.		
<i>L'intervapeur verviétoise ou la distribution urbaine de vapeur à Verviers</i> (en collaboration avec PAQUAY, H.)	921	IV
HOCEDEZ, A., Conseiller au Conseil des Mines, à Bruxelles.		
<i>Table alphabétique des matières traitées dans les avis du Conseil des Mines du 1^{er} janvier 1934 au 31 décembre 1938</i> (en collaboration avec JOLY, L.)	481	II
<i>Jurisprudence du Conseil des Mines, tome XVI, première partie, année 1939</i> (en collaboration avec JOLY, L.)	641	III
JOLY, L., Président du Conseil des Mines, à Bruxelles.		
<i>Table alphabétique des matières traitées dans les avis du Conseil des Mines du 1^{er} janvier 1934 au 31 décembre 1938</i> (en collaboration avec HOCEDEZ, A.)	481	II
<i>Jurisprudence du Conseil des Mines, tome XVI, première partie, année 1939</i> (en collaboration avec HOCEDEZ, A.)	641	III
I EVARLET, H., Ingénieur en chef-Directeur honoraire des Mines, Chef honoraire du Service des Explosifs.		
<i>Liste chronologique des fabriques belges d'explosifs</i>	395	II
MEYERS, A., Ingénieur en chef-Directeur des Mines, à Hasselt.		
<i>Note sur l'activité des mines de houille du Bassin du Nord de la Belgique pendant le premier semestre 1939</i>	223	I

NENQUIN, G., Chimiste assistant, Attaché à l'Institut National des Mines de Frameries-Paturages. <i>L'application de l'interféromètre aux analyses des grisous et autres gaz de mines (en collaboration avec VAN OUDENHOVEN, F.)</i>	109	I
PAQUAY, H., Ingénieur pour la Protection du Travail. <i>L'intervapeur verviétoise ou la distribution urbaine de vapeur à Verviers (en collaboration avec HAIDANT, P.)</i>	921	IV
PAQUES, G., Ingénieur principal des Mines, à Bruxelles. <i>Dégagement instantané de grisou du 21 septembre 1938 au siège Louis Lambert des Charbonnages d'Henrics-Pommerœul</i>	209	I
<i>La catastrophe du 1^{er} novembre 1939 au siège n° 3 (Grand-Trait) des Charbonnages de l'Agrappe-Escouffiaux, à Frameries</i>	619	III
RAVEN, G., Directeur général des Mines, à Bruxelles. <i>Belgique. — L'industrie charbonnière pendant l'année 1939. — Statistique provisoire et vue d'ensemble sur l'exploitation (en collaboration avec ANCIAUX, H.)</i>	247	I
Annexes :		
<i>Résultats de l'exploitation des mines de houille en 1939</i>	270	I
<i>Récapitulation des résultats par tonne depuis 1927</i>	271	I
VAN OUDENHOVEN, F., Ingénieur chimiste, Attaché à l'Institut National des Mines de Frameries-Paturages. <i>L'application de l'interféromètre aux analyses des grisous et autres gaz de mines (en collaboration avec NENQUIN, G.)</i>	109	I

TABLE GENERALE DES MATIERES

—

**INSTITUT NATIONAL DES MINES
A FRAMERIES-PATURAGES**

Rapport sur les travaux de l'année 1939	A. BREYRE	1	I
Conseil d'administration de l'Institut. — Nomination de membres (Arrêté royal du 17 février 1940)		328	I

NOTES DIVERSES

Application de l'interféromètre aux analyses des grisous et autres gaz de mines	F. VAN OUDENHOVEN et G. NENQUIN	109	I
Examen de quelques masques à poussières (seconde note)	J. FRIPIAT	145	I
Contribution à l'étude spectrographique du mécanisme de la combustion du méthane	L. COPPENS	177	I
Dégagement instantané de grisou du 21 septembre 1938 au siège Louis Lambert des Charbonnages d'Henrics-Pommerœul	G. PAQUES	209	I
Sur l'activité des mines de houille du Bassin du Nord de la Belgique pendant le premier semestre 1939	A. MEYERS	223	I

Liste chronologique des fabriques belges d'explosifs	H. LEVARLET	395	II
Sur l'activité des mines de houille du Bassin du Nord de la Belgique pendant le second semestre 1939	P. GÉRARD	443	II
La catastrophe du 1 ^{er} novembre 1939 au siège n° 3 (Grand-Trait) des Charbonnages de l'Agrappe Escouffiaux, à Frameries	G. PAQUES	619	III
Etude d'anneaux circulaires à forte courbure relative sollicités par deux force diamétralement opposées	L. BLANJEAN	775	IV
L'Intervapeur verviétoise ou la distribution urbaine de vapeur à Verviers	P. HAIDANT et H. PAQUAY	921	IV

CONSEIL DES MINES

Table alphabétique des matières traitées dans les avis du Conseil des Mines du 1 ^{er} janvier 1934 au 31 décembre 1938	L. JOLY et A. HOCEDEZ	481	II
Jurisprudence du Conseil des Mines, tome XVI, première partie, année 1939	L. JOLY et A. HOCEDEZ	641	III

STATISTIQUES

Belgique. — L'industrie charbonnière pendant l'année 1939. — Statistique provisoire et vue d'ensemble sur l'exploitation	G. RAVEN et H. ANCIAUX	247	I
--	---------------------------	-----	---

Annexes :

Résultats de l'exploitation des mines de houille en 1939	270	I
Récapitulation des résultats par tonne depuis 1927	271	I
Tableau des mines de houille en activité dans le Royaume de Belgique au 1 ^{er} janvier 1940	529	II

BIBLIOGRAPHIE

Formulaire de construction mécanique, par R. Fontaine	273	I
Formulaire du bâtiment et des travaux publics, par H. Ancely	274	I
Utilisation des combustibles, par A. Siron	577	II
	V. FIRKET	

DIVERS

<i>Association Belge de Standardisation :</i>		
Dimensions linéaires nominales pour la mécanique	275	I

DOCUMENTS ADMINISTRATIFS

<i>Législation minière :</i>		
Arrêté royal du 5 janvier 1940 portant obligation de déclarer les explorations du sous-sol. — Arrêté d'exécution	323	I
Application de l'Arrêté royal du 28 novembre 1939	325	I
Circulaire ministérielle du 29 mars 1940	959	IV
Circulaire du Directeur général des Mines du 31 décembre 1940	961	IV

Législation sociale :

CONGES PAYES

- Arrêté royal du 29 août 1939* permettant, en cas de renforcement ou de mobilisation de l'armée, de déroger aux prescriptions de la loi du 8 juillet 1936 modifiée par celle du 29 août 1938 concernant les congés annuels payés 291 I
- Arrêté du 12 septembre 1940* instituant une caisse particulière de congés payés pour l'industrie du zinc et des autres métaux non ferreux 751 III

PAIEMENT DES SALAIRES

- Loi du 22 mars 1940* modifiant et complétant la loi du 16 août 1887 portant réglementation du paiement des salaires des ouvriers 297 I

PREMIERS SOINS MEDICAUX

- Arrêté royal du 13 janvier 1940* prescrivant les moyens de premiers soins médicaux dans les entreprises industrielles et commerciales ainsi que dans les services et établissements publics et d'utilité publique 299 I
- Arrêté royal du 16 janvier 1940* prescrivant les mesures destinées à assurer les premiers soins médicaux aux blessés ou malades des mines, minières et carrières souterraines 313 I

TUTELLE SANITAIRE

- Arrêté royal du 17 avril 1940* remplaçant les dispositions des arrêtés royaux des 28 septembre 1936, 15 décembre 1938 et 13 décembre 1939 concernant la tutelle sanitaire des adolescents au travail . . . 581 II
- Arrêté du 3 décembre 1940* applicable aux travailleurs des mines, minières et carrières souterraines, pris en exécution de l'article premier, alinéa 3, de l'arrêté royal du 17 avril 1940 concernant la tutelle sanitaire des adolescents au travail 955 IV

Soins immédiats en cas d'accidents de travail :

- Arrêté du 17 août 1940*, modifiant l'arrêté ministériel du 10 mars 1932 relatif aux boîtes de secours pour soins immédiats en cas d'accidents du travail . . . 749 III

Durée du travail :

- Arrêté royal du 3 février 1940* : Durée du travail souterrain dans les mines de houille :
- Rapport au Roi 293 I
- Texte de l'Arrêté 295 I

POLICE DES MINES

Tenue des plans de mines :

- Arrêté royal du 20 avril 1940* abrogeant les dispositions de l'article 5bis introduites par l'arrêté royal du 15 mars 1927 dans les prescriptions du règlement général de police des mines du 28 avril 1884 relatives à la tenue des plans de mines et les remplaçant par des dispositions nouvelles 587 II

Voies d'accès et puits :

- Arrêté royal du 24 avril 1940* complétant les dispositions de l'article 49 de l'arrêté royal du 10 décembre 1910 sur les voies d'accès, les puits, et la circulation du personnel dans les puits, article modifié par l'arrêté royal du 29 septembre 1930 589 II
- Circulaire ministérielle du 9 mars 1940* 957 IV
- Circulaire du Directeur général des Mines du 1^{er} août 1940* 958 IV

Explosifs :

- Cartouches gainées. — *Arrêté ministériel du 29 avril 1940* 747 III

ETABLISSEMENTS CLASSES

<i>Arrêté royal du 26 octobre 1939: Modification, adjonction et suppression de rubriques</i>	277	I
<i>Arrêté du 29 novembre 1940: Modification de rubriques</i>	951	IV

APPAREILS A VAPEUR

<i>Arrêté royal du 7 février 1940, nommant les membres de la Commission consultative permanente pour les appareils à vapeur, pour la période triennale 1940-1942</i>	326	I
--	-----	---

DOMMAGES HOUILLERS

<i>Arrêté royal du 22 février 1940 pris en exécution de l'article 2 de la loi du 12 juillet 1939 instituant un Fonds National de garantie des dommages houillers. — Fixation de la composition du comité permanent des dommages miniers</i>	330	I
---	-----	---

PERSONNEL

Répartition du personnel et du service des mines. — Noms et lieux de résidence des fonctionnaires au 1 ^{er} avril 1940	601	II
---	-----	----

ARRETES SPECIAUX

Extraits d'arrêtés pris en 1939 concernant les mines .	393	I
--	-----	---

AMBTELIJKE BESCHEIDEN

Mijnwetgeving :

<i>Koninklijk besluit id. 5 Januari 1940, houdende de verplichting de ondergrond onderzoekingen te verklaren. — Uitvoeringsbesluit</i>	381	I
<i>Ministerieel besluit id. 5 Januari 1940 : Uitvoering van het koninklijk besluit id. 28 November 1939 .</i>	384	I

<i>Ministerieele omzendbrief van 29 Maart 1940</i>	971	IV
<i>Omzendbrief van den Directeur-Generaal van het Mijnwezen id. 31 December 1940</i>	973	IV

Sociale wetgeving :

BETAALDE VERLOFDAGEN

<i>Koninklijk besluit i.d. 29 Augustus 1939 machtiging verleend in geval van versterking of van mobilisatie van het leger af te wijken van de voorschriften der wet van 8 Juli 1936, gewijzigd bij deze van 20 Augustus 1938, betreffende de jaarlijksche betaalde verlofdagen</i>	349	I
<i>Besluit van 12 September 1940 tot oprichting van een particuliere kas voor betaalde verlofdagen in de zink- en andere nietijzer-metalenijverheid</i>	765	III

UITBETALING VAN HET LOON

<i>Wet i.d. 22 Maart 1940 tot wijziging en aanvulling der wet van 16 Augustus 1887 tot regeling van de uitbetaling van het loon der arbeiders</i>	355	I
---	-----	---

EERSTE MEDISCHE HULPMIDDELEN

<i>Koninklijk besluit i.d. 13 Januari 1940 tot voorschrijving van de eerste medische hulpmiddelen in de handels- en nijverheidsondernemingen, alsmede in de openbare diensten en inrichtingen of diensten en inrichtingen van algemeen nut</i>	357	I
<i>Koninklijk besluit i.d. 16 Januari 1940, tot voorschrijving van de maatregelen bestemd om aan de gekwetsten of zieken van de mijnen, graverijen en ondergrondse groeven de eerste medische hulpmiddelen te verzekeren</i>	372	I

MEDISCH TOEZICHT

<i>Koninklijk besluit van 17 April 1940 tot vervanging van de bepalingen van de koninklijke besluiten van</i>		
---	--	--

28 September 1936, 15 December 1938 en 13 December 1939 betreffende het medisch toezicht op de jonge arbeiders	591	II
<i>Besluit van 3 December 1940 toepasselijk op de arbeiders der mijnen, graverijen en ondergrondsche groeven, getroffen ter uitvoering van artikel één, al. 3, van het koninklijk besluit van 17 April 1940, betreffende het medisch toezicht op de jonge arbeiders</i>	967	IV
<i>Onmiddellijke zorgen inzake arbeidsongevallen :</i>		
<i>Besluit i.d. 17 Augustus 1940 tot wijziging van het ministerieel besluit van 10 Maart 1932 betreffende de verbandtrommels voor onmiddellijke zorgen inzake arbeidsongevallen</i>	763	III

ARBEIDSDUUR

<i>Koninklijk besluit van 3 Februari 1940. — Ondergrondsche arbeidsduur in de steenkolenmijnen :</i>		
Verslag aan den Koning	351	I
Tekst van het besluit	353	I

MIJNPOLITIE

<i>Opmaken der mijnkaarten :</i>		
<i>Koninklijk besluit van 20 April 1940, de bepalingen van artikel 5bis intrekken bij koninklijk besluit van 15 Maart 1927, gevoegd bij de voorschriften van het algemeen reglement der mijnpolitie van 28 April 1889, betreffende het opmaken der mijnkaarten en ze door nieuwe bepalingen vervangende</i>	597	II
<i>Toegangswegen en schachten :</i>		
<i>Koninklijk besluit van 24 April 1940 tot aanvulling van de bepalingen van artikel 49 van het koninklijk besluit i.d. 10 December 1910, gewijzigd bij koninklijk besluit van 29 September 1940, op de toegangswegen, de schachten en het verkeer van het personeel in de mijnschachten</i>	599	II

<i>Ministerieele omzendbrief van 9 Maart 1940</i>	969	IV
<i>Omzendbrief van den Directeur-Generaal van het Mijnwezen van 1. Augustus 1940</i>	970	IV
<i>Springstoffen :</i>		
<i>Patronen vervat in omhulsels. — Ministerieel besluit van 29 April 1940</i>	761	III

INGEDEELTE INRICHTINGEN

<i>Koninklijk besluit van 26 October 1939 : Wijziging, bijvoeging en intrekking van rubrieken</i>	333	I
<i>Besluit van 29 November 1940 : Wijzigingen van rubrieken</i>	963	IV

STOOMTOESTELLEN

<i>Koninklijk besluit i.d. 7 Februari 1940 tot benoeming der leden van de Vast commissie van advies inzake stoomtoestellen voor het driejarig tijdperk 1940-1942</i>	385	I
--	-----	---

KOLENMIJNSCHADE

<i>Koninklijk besluit i.d. 22 Februari 1940 genomen in uitvoering van artikel 2 van de wet van 12 Juli 1939, houdende oprichting van een Nationaal Waarborgfonds inzake kolenmijnschade. — Vaststelling van de samenstelling van het Vast Mijnschadecomité</i>	389	I
--	-----	---

TABLES DES MATIÈRES

Table alphabétique des auteurs	975	IV
Table générale des matières	979	IV

SOMMAIRE DE LA 4^me LIVRAISON, TOME XLI

NOTES DIVERSES

- Etude d'anneaux circulaires à forte courbure relative sollicités par deux forces diamétralement opposées 775
L. BLANJEAN.
- L'Intervapeur verviétoise ou la distribution urbaine de vapeur à Verviers 921
P. HAIDANT
et H. PAQUAY.

DOCUMENTS ADMINISTRATIFS

DEPARTEMENT DU TRAVAIL ET DE LA PREVOYANCE SOCIALE

ETABLISSEMENTS CLASSES

- Arrêté du 29 novembre 1940* : Modification de rubriques 951

MINISTERE DU TRAVAIL ET DE LA PREVOYANCE SOCIALE
ET MINISTERE DES AFFAIRES ECONOMIQUES,

TUTELLE SANITAIRE

- Arrêté du 3 décembre 1940*, applicable aux travailleurs des mines, minières et carrières souterraines pris en exécution de l'article premier, alinéa 3, de l'arrêté royal du 17 avril 1940 concernant la tutelle sanitaire des adolescents au travail 955

DIRECTION GÉNÉRALE DES MINES

CIRCULAIRES MINISTERIELLES

- Puits et circulation du personnel dans les puits :*
- Circulaire ministérielle du 9 mars 1940 957
- Circulaire du Directeur général des Mines du 1^{er} août 1940 958
- Explorations du sous-sol :*
- Circulaire ministérielle du 29 mars 1940 959
- Circulaire du Directeur général des Mines du 31 décembre 1940 961

AMBTELIJKE BESCHEIDEN

MINISTERIE VAN ARBEID EN SOCIALE VOORZORG

INGEDEELTE INRICHTINGEN

Besluit van 29 November 1940 : Wijziging van rubrieken 963

**MINISTERIE VAN ARBEID EN SOCIALE VOORZORG
EN MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN**

MEDISCH TOEZICHT

Besluit van 3 December 1940 toepasselijk op de arbeiders der mijnen, graverijen en ondergrondse groeven, getroffen ter uitvoering van artikel één, alinea 3, van het koninklijk besluit van 17 April 1940 betreffende het medisch toezicht op de jonge arbeiders 967

ALGEMEENE DIRECTIE VAN HET MIJNWEZEN

MINISTERIEELE OMZENDBRIEVEN

De toegangswegen en de schachten :

Ministerieele omzendbrief van 9 Maart 1940 969

Omzendbrief van den Directeur-Generaal van het Mijnwezen van 1 Augustus 1940 970

Ondergrondse onderzoekingen :

Ministerieele omzendbrief van 29 Maart 1940 971

Omzendbrief van den Directeur-Generaal van het Mijnwezen van 31 December 1940 973

TABLES DES MATIERES

Table alphabétique des auteurs 975

Table générale des matières 979



ATELIERS BALANT

12, RUE CHISAIRE - MONS — Tél. : 111

Pompes à vapeur et à air comprimé

Matériel de Mines et de Carrières - Fabrication et Réparation de toutes pièces
Pièces de rechange toujours en stock

SOCIETE GENERALE DE MATERIEL D'ENTREPRENEURS

57, RUE DE L'EVEQUE, ANVERS

Tél. : Anvers 345.59 - 345.99 Adr. télégr. : « Thommen » Anvers
Usines et Fonderies à Hérenthals

MATERIEL MODERNE POUR TRAVAUX PUBLICS ET PRIVES

Bétonnières mécaniques « ROLL », « NEO-ROLL », « NEO-KIP »
Monte-charges « EXE » et « BOB » fixes et mobiles, d'une puissance
de 250 à 1,000 kg. — Grues à Tour, d'une puissance de 250 à 3,000 kg.
Grues « DERRICK » pour charges de 250 à 10,000 kg. — Treuils à
moteurs et à main, de toute puissance. — Doseurs de gravier, sable
et ciment. — Transporteurs à ruban et à godets. — Mâts et Eléva-
teurs à béton. — Vibro-finisseries pour routes et pistes cyclables
en béton. — Matériel complet pour la construction de routes en
béton et en asphalte. — Rouleaux-compresseurs automatiques « DIE-
SEL ». — Vibrateurs électriques et mécaniques pour tous produits en
béton. — Presses « AMA » à main et à moteur, pour agglomérés
pleins ou creux. — Presses à dalles « AMA ». — Loco-tracteurs, à
huile lourde, pour voie étroite. — Broyeurs. — Pompes à diaphrag-
mes et centrifuges. — Moteurs. — Compresseurs rotatifs. — Petit
outillage pour bétonneurs.

