Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 63 (1937)
Heft: 3

Artikel: L'ingénieur et les nouvelles mécaniques
Autor: Mercier, Robert
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-48430

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

63e année — 30 janvier 1937 — N° 3

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

ABONNEMENTS :
Suisse : 1 an, 12 francs
Etranger : 14 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 10 francs
Etranger : 12 francs
Prix du numéro :
75 centimes.
Pour les abonnements s'adresser à la librairie F. Rouge & Cie, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. — Organe de publication de la Commission centrale pour la navigation du Rhin.

COMITÉ DE RÉDACTION. — Président : R. Neeser, ingénieur, à Genève. — Membres : *Fribourg :* MM. L. Hertling, architecte ; A. Rossier, ingénieur ; *Vaud :* MM. C. Butticaz, ingénieur ; E. Elskes, ingénieur ; Epitaux, architecte ; E. Jost, architecte ; A. Paris, ingénieur ; Ch. Thévenaz, architecte ; *Genève :* MM. L. Archinard, ingénieur ; E. Odier, architecte ; Ch. Weibel, architecte ; *Neuchâtel :* MM. J. Béguin, architecte ; R. Guye, ingénieur ; A. Méan, ingénieur cantonal ; *Valais :* MM. J. Couchepin, ingénieur, à Martigny ; Haenny, ingénieur, à Sion.

Rédaction : H. Demierre, ingénieur, 11, Avenue des Mousquetaires, La Tour-de-Peilz.

ANNONCES
Le millimètre sur 1 colonne, largeur 47 mm. :
20 centimes.
Rabais pour annonces répétées.
Tarif spécial pour fractions de pages.
Régie des annonces :
Annonces Suisses S. A.
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)
Lausanne

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE
A. Dommer, ingénieur, président ; G. Epitaux, architecte ; M. Imer.

SOMMAIRE : *L'ingénieur et les nouvelles mécaniques*, par M. le Dr Robert Mercier, professeur à l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne. — *Mise en tension préalable des armatures du béton armé. Son principe, son calcul et ses applications* (suite et fin), par A. Paris, ingénieur civil, professeur à l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne. — *Concours d'idées pour la construction d'un bâtiment administratif et l'aménagement de ses abords, à Lausanne.* — Divers : *La construction navale.* — Sociétés : *Section genevoise de la Société suisse des ingénieurs et des architectes.* — Bibliographie. — Nouveautés. - Informations.

Exceptionnellement, ce numéro contient 16 pages « rédactionnelles ».

L'ingénieur et les nouvelles mécaniques[1],

par M. le Dr Robert MERCIER,
professeur à l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne.

Au cours de ces dernières années (et je pense à la période qui s'étend du commencement de notre siècle à nos jours) une série de *faits nouveaux* ont été enregistrés dans les annales de la physique. Et ces faits nouveaux, de par leur nature et leurs conséquences logiques, ont imposé aux physiciens un travail de revision des fondements de cette science, une nouvelle inspection des principes, ceci tout spécialement dans le domaine de la mécanique.

Et pourquoi spécialement là, dans ce corps de doctrines où les résultats acquis semblent l'être en toute sécurité ? Parce que la tendance prédominante des théories physiques nées à la fin du siècle dernier était justement de ramener à la mécanique le plus grand nombre possible des branches de la physique, ceci à l'aide d'hypothèses simples et dans le but d'obtenir une plus grande homogénéité dans les sciences.

Je m'explique : Rumford, puis Mayer et d'autres firent un premier pont entre le calorique et la mécanique. Plus tard, les travaux théoriques de Clausius, Maxwell, Boltzmann etc., étayées et confirmées par de nombreux résultats expérimentaux, permirent de considérer tous les phénomènes relatifs à la chaleur, comme la manifestation statistique d'un nombre énorme de particules extrêmement petites, tout simplement soumises aux lois de la mécanique des systèmes conservatifs. Ainsi les notions de pression, de dilatation, de changement d'état, d'échanges de chaleur, de chocs mous, etc. furent ramenés à celles purement mécaniques, de forces, de percussion, de mouvement, de vibrations, d'énergie cinétique ou potentielle. L'entropie même revêtit la forme d'une simple probabilité. La thermodynamique n'est donc plus qu'une *micromécanique* vue par le mauvais bout du microscope, si l'on peut dire. Ainsi naquirent les théories moléculaires de la matière.

Or, le résultat de ces travaux, cette « mécanisation » de la chaleur fut avantageux pour l'ingénieur à plusieurs titres : elle lui simplifia l'étude et l'assimilation de certains phénomènes qui, à première vue, n'avaient aucune relation avec son art ; elle le conduisit à la création de machines nouvelles et d'appareils de mesure perfectionnés. Je citerai comme exemple le contrôleur automatique et continu de la combustion dans les foyers, qui mesure la conductibilité thermique des gaz évacués ; la relation qui existe entre cette conductibilité et le poids moléculaire des gaz était connue des physiciens depuis longtemps, mais ce n'est que lorsque les théories moléculaires en donnèrent une explication intuitive et relativement simple (parce que mécanique), que l'ingénieur commença à s'y intéresser et à en trouver des applications. C'est par la même voie que s'introduisit en technique l'usage des pompes à vide très poussé dont on trouve des applications en radiotechnique et en électricité industrielle.

Jusque-là les théories cinétiques de la matière purent se développer sans qu'il fût nécessaire de modifier en rien les théorèmes fondamentaux de la mécanique. Mais

[1] Leçon inaugurale faite à l'Université de Lausanne, le 15 décembre 1936.

des recherches plus modernes ont montré que l'électricité devait avoir (tout comme la matière, d'après les théories moléculaires), une structure granulaire et que les grains d'électricité étaient également doués d'inertie. De plus ces grains d'électricité, ces *électrons* devaient avoir une certaine liberté de mouvement dans les conducteurs. La vérification expérimentale de ces deux faits est simple, du moins en principe : en imprimant à un conducteur une accélération intense, les électrons inertes et quasi libres restent, eux, au repos, c'est-à-dire prennent par rapport au conducteur une accélération opposée ; et ce mouvement relatif, qui est équivalent à un courant électrique peut être, non seulement *décelé* effectivement mais *mesuré*. Bref, une série de résultats positifs de cet ordre permettent d'affirmer, avec la certitude de nos autres connaissances scientifiques, que l'électricité, comme la matière possède une structure atomistique dont les éléments sont soumis aux lois générales de la mécanique. Il suffit d'admettre alors l'existence de forces de nature *gravifique*, *électrique* et *magnétique*, s'exerçant entre les grains de matière ou d'électricité, et agissant selon les lois de la mécanique et de l'électromagnétisme classique, pour retrouver (par voie logique) une belle série de lois expérimentales touchant un peu tous les domaines de la science.

Mais les « faits nouveaux » dont je parlais au début de cet exposé nous obligent à plus de prudence dans nos conclusions. Les bases solides de la mécanique classique sont à nouveau sujet à revision et à cet égard, nulle époque, depuis celle des Galilée et des Newton, ne fut aussi intéressante pour le mécanicien que celle que nous vivons encore actuellement.

Mon but est aujourd'hui, de faire comprendre en quoi l'immense échafaudage de la mécanique classique n'est pas parfait, malgré sa forme extrêmement mathématique ; quelles sont les modifications qu'il faut y apporter et enfin pourquoi l'ingénieur peut, lui qui semble le premier intéressé à cette évolution des principes, rester, s'il le désire, totalement indifférent à cette revision.

Sans m'attacher nullement à l'ordre chronologique de leur découverte je vais exposer rapidement quelques-uns des phénomènes qui ont épuisé les possibilités de la mécanique dite classique : et je range dans celle-ci la mécanique relativiste d'Einstein.

C'est tout d'abord *l'effet Compton*. De nombreuses expériences sur les interférences et les diffractions ont démontré à satiété la nature ondulatoire et les propriétés de périodicité de la lumière même lorsque l'intensité des faisceaux utilisés était extrêmement faible. Or Compton découvre que l'effet d'un pinceau monochromatique de rayons X sur une seule particule électrique est *totalement indépendant de l'intensité du faisceau* et de plus, identique à celui d'un choc. Dans cet effet, que l'on peut observer dans la chambre de Wilson, l'influx lumineux est dévié et la vitesse de l'électron en cause est modifiée en grandeur et en direction. Si l'électron est primitivement au repos, il est toujours projeté en avant (malgré la transversalité de la lumière !) et l'énergie lumineuse prend une direction qui peut être quelconque ; simultanément la fréquence de celle-ci diminue ; en quelque sorte la lumière change de couleur.

On a naturellement essayé de retrouver cet effet par le calcul, en partant de l'électromagnétisme de Maxwell, mais les détails du phénomène contredisent les prédictions théoriques. L'incompatibilité entre théorie et expérience devient critique lorsque l'électron est primitivement lié à un atome et que l'intensité du pinceau est très faible. L'électron acquiert effectivement non seulement une énergie suffisante pour s'échapper de l'atome mais encore il en est expulsé avec grande énergie cinétique. Dans certaines expériences, l'intensité du faisceau incident était telle qu'une accumulation d'énergie par une sorte de résonance était totalement exclue : l'électron aurait dû attendre quelques années avant d'avoir emprunté au faisceau incident l'énergie nécessaire à son départ... et l'effet était observé en quelques secondes...

Par contre le phénomène peut être entièrement expliqué, en attribuant au rayonnement monochromatique de fréquence ν une *structure granulaire* telle que toutes les particules lumineuses dont le faisceau est constitué soient identiques. En supposant, en outre, que chacun de ces grains de lumière, de ces *photons* se déplace avec la vitesse de la lumière C et possède une énergie cinétique E dépendant de la fréquence du rayonnement, on est conduit aux expressions suivantes pour la quantité de mouvement et pour la masse de ces particules.

$$mC = \frac{E}{C} \qquad m = \frac{E}{C^2} \qquad \boxed{E = h\nu}$$

h est un coefficient de valeur fixe et bien déterminée. L'effet Compton s'énonce ainsi : *un photon et un électron sont entrés en collision* et le choc fut élastique. La mécanique relativiste des percussions rend compte alors de tout le phénomène en ses détails et avec exactitude.

Ce qui peut sembler remarquable ici est que les théorèmes relatifs à la conservation des quantités de mouvement et de l'énergie sont encore parfaitement valables (en apparence tout au moins).

En deuxième lieu je citerai l'existence de ce que l'on a appelé les *ondes matérielles* ou de de Broglie. Ces ondes se manifestent par le fait qu'il est possible de répéter au moyen de jets monocinétiques d'atomes (d'hydrogène ou d'hélium) ou d'électrons, toutes les expériences de diffraction ou d'interférences devenues classiques en optique. Par exemple si l'on dirige sur un cristal un faisceau matériel, les atomes réfléchis ne le sont pas selon les lois de la mécanique classique : la répartition de leurs directions est en effet la même que si le faisceau était un faisceau lumineux, dont la longueur d'onde serait

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{mv}}$$

et qui aurait subi la diffraction sur le réseau spatial qui constitue le cristal. mv est dans cette formule la quantité de mouvement de la particule et h, la même constante que celle intervenant dans l'effet Compton.

On peut même, en poursuivant l'analogie encore plus loin, produire la réfraction de ces ondes matérielles et construire une optique complète d'un nouveau genre. Il existe actuellement des *microscopes à ondes matérielles* qui ont sur les microscopes optiques le grand avantage de travailler avec des longueurs d'ondes beaucoup plus petites que celle de la lumière visible ; leur pouvoir séparateur est alors bien supérieur et l'ingénieur a trouvé tout naturellement leur application en *microcristallographie.*

Le physicien, et le mécanicien, se trouvent donc devant le dualisme étrange suivant : Les rayons lumineux se comportent quelquefois comme des *corpuscules* soumis aux lois de la mécanique et pourtant leur nature *oscillatoire* est manifeste à d'autres occasions ; les particules matérielles ou électriques présentent d'ailleurs la même particularité.

On observe d'ailleurs d'autres anomalies tout aussi incompréhensibles à notre intuition. Une particule d'énergie donnée peut très bien, par exemple, passer d'un point à un autre de l'espace, même si entre ceux-ci se trouve une région dans laquelle le potentiel est bien supérieur à l'énergie de la particule : cela revient à dire que si un corps matériel pesant est mobile (sans frottement) sur une surface présentant une cuvette, il y a des chances pour que, lâché sans vitesse initiale d'un côté de cette concavité il remonte notablement plus haut de l'autre côté, *pourvu que sa masse soit très petite.* C'est-d'ailleurs un cas analogue qui se produit dans les phénomènes d'*émission électronique à froid* ou lors de la capture d'un rayon α par un noyau atomique.

Il semble donc que les principes de la mécanique classique aient perdu toute valeur et que deci delà un théorème ou un autre soit par hasard applicable. C'est devant cet état de chose que l'on se rend compte de la nécessité d'une refonte complète de la mécanique.

Mais, dira l'ingénieur, quelle est ma situation devant ce remaniement, et à qui se fier ? Aux expérimentateurs et théoriciens qui en quelques siècles ont construit la mécanique classique : aux Galilée, aux Newton, aux Lagrange ? ou bien à ceux qui par des critiques, fondées semble-t-il, mettent en doute des principes qui me paraissaient *clairs parce qu'intuitivement évidents ?*

La réponse à cet important problème nous sera donnée, et d'une façon très satisfaisante, par ceux-mêmes qui l'on fait surgir, par les physiciens.

En effet si, à l'échelle de l'atome, les phénomènes n'obéissent plus aux principes si bien établis (semblait-il) de la mécanique, cela provient de la nature des choses.

Les « faits nouveaux » nous montrent que nous nous faisions du monde extérieur une image erronée, incomplète. D'après celle-ci, nous pouvions, en principe, mesurer toutes les grandeurs physiques avec la précision que nous désirions : il suffisait de construire des instruments perfectionnés, sensibles et précis. Avec ceux-ci il était possible de déterminer la position et la vitesse de tous les objets faisant partie d'un système ; les lois de la mécanique nous donnaient ensuite le moyen de prédire tout ce qui se passerait ultérieurement ou de retrouver tout ce qui s'était passé postérieurement à nos mesures. Bref, en généralisant le procédé, rien ne nous empêchait de penser qu'un esprit suffisamment éclairé et subtil (un démon de Maxwell, par exemple) aurait pu, en vertu des lois rigides de la mécanique, embrasser en un instant toute l'histoire et tout le futur d'une tranche de l'univers, tout au moins.

Les faits nouveaux nous montrent de façon péremptoire qu'il n'en est rien et le *principe d'indétermination de Heisenberg* dont je veux parler, nous fait sentir immédiatement en quoi l'extrapolation n'est pas possible et où se trouvent nos limites naturelles.

Nous avions totalement oublié en postulant l'existence *d'instrument de mesure* à précision illimitée, que ceux-ci étaient construits avec les matériaux dont nous voulions établir les propriétés. Or, pour observer un phénomène, il faut faire agir sur celui-ci des éléments qui lui sont étrangers, il faut le *modifier* et en quelque sorte le *détruire.* Le raisonnement nous montre que, dans toute observation, la modification apportée par l'observateur n'est pas prévisible et qu'elle est d'autant plus importante que l'exactitude de la mesure croît. La modification porte justement sur la grandeur conjuguée à celle qui est mesurée au sens de la mécanique analytique. Ainsi toute expérience (même effectuée en pensée dans des conditions idéales) est entachée d'une imprécision. Il est impossible, par exemple, de mesurer simultanément avec toute l'exactitude désirable la position et la vitesse d'une particule, ou bien son énergie à une époque exactement définie.

Je m'en vais illustrer ce fait en considérant le cas suivant (très connu d'ailleurs) :

Pour observer le lieu où se trouve une *particule* (un électron par exemple), on peut utiliser un microscope à très fort grossissement. On obtiendra la meilleure définition de l'image en éclairant la particule avec de la lumière de longueur d'onde aussi petite que possible, car alors les effets gênants de la diffraction seront ramenés au minimum. On utilisera des rayons X par exemple. Mais sous leur influence, l'électron va subir l'effet Compton ; sa vitesse sera modifiée et pour déterminer cette variation, il faudrait savoir dans quelle direction le photon dévié s'est déplacé. Or tout ce que nous savons de lui est qu'il est entré dans l'objectif dont l'« ouverture numérique » a été choisie aussi grande que possible, créant ainsi une indétermination dans la direction du photon. Une étude détaillée montre que, dans les conditions optimum de précision, le produit des erreurs commises sur

la position, $\triangle x$, et sur la quantité de mouvement correspondante, $\triangle p_x$ de l'électron est au moins égal à la constante h :

$$\boxed{\triangle x \cdot \triangle p_x \geqq h}$$

Nous venons d'énoncer le *principe d'indétermination*, pour un cas particulier.

Nous voyons par ce qui précède qu'il ne nous est pas possible (et ceci est tout à fait général) de déterminer *simultanément* et *avec rigueur* la position et la quantité de mouvement d'une particule. Cela implique en fait l'impossibilité de démontrer expérimentalement la nature corpusculaire de cet objet, car une particule (selon notre intuition), doit être *quelque part* et posséder une vitesse bien définie ; choses que nous ne pouvons, en toute rigueur, par contrôler.

De même, la lumière n'est pas une onde telle que nous nous les représentons puisqu'elle peut, en un processus analogue à un choc, transmettre en une fois et en un lieu une quantité de mouvement qu'elle ne possède qu'à l'état dilué.

(A suivre.)

Mise en tension préalable des armatures du béton armé.

Son principe, son calcul et ses applications,

par

A. PARIS, ingénieur civil, professeur à l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne.

(Suite et fin.) [1]

3. Efforts statiques, alternés ou dynamiques.

Qu'il s'agisse de l'une ou de l'autre des méthodes de mise en tension préalable de l'armature, il en résulte une précontrainte du béton qui se combine aux actions du retrait, de la compression élastique et de la viscosité, de telle sorte que l'ensemble des efforts doit, si le procédé remplit son programme, évoluer dans la phase I du béton armé non distendu. M. Freyssinet illustre comme suit l'augmentation de raideur et de résistance du profil précontraint, relativement à celui de béton armé ordinaire.

Les deux phases de déformation du profil de béton armé, celle I du béton intact et censément tout à fait élastique, et celles $II\,a$ et b, qui admettent la région tendue plastique ou fissurée, conduisent à des valeurs très inégales du moment d'inertie et même du module d'élasticité instantané moyen, et par conséquent de leur produit, la raideur en système plan

$$D = E \times J.$$

Les contraintes sont aussi très différentes. Supposons en effet le cas concret d'un profil rectangulaire sollicité, en phase II_b, à

$$\sigma_b = 60 \text{ kg : cm}^2 \quad \text{et} \quad \sigma_a = 1200 \text{ kg : cm}^2$$

son axe neutre se place à

$$x = 0{,}33\, h' \qquad h' = h - a$$

son moment d'inertie sera, si l'on suppose $h' = 0{,}9\, h$, sur l'axe neutre

$$J_{II} = 0{,}036\, F_b \cdot h^2 \qquad F_b = b \cdot h$$

et son module d'élasticité représenté par

$$E_{II} = 1.$$

Si nous appliquons le même couple fléchissant au même profil, calculé cette fois en phase I du béton intact, nous trouvons

$$x = 0{,}53\, h \qquad J_I = 0{,}095\, F_b \cdot h^2$$
$$\sigma_b = 40 \text{ kg : cm}^2 \quad \sigma_a = 280 \text{ kg : cm}^2$$

d'où

$$E_I = \sim 1{,}1.$$

Si la phase II_b devait se réaliser entièrement, les raideurs définies ci-haut

$$E_I \cdot J_I = 1{,}1 \times 0{,}095 = 0{,}104$$
$$E_{II} \cdot J_{II} = 1{,}0 \times 0{,}036 = 0{,}036$$

se tiendraient dans le rapport approximatif de 3 à 1. La réalité est plus favorable au béton armé ordinaire, où la distension, qui remplace en général la fissure, n'attaque que la région des moments maxima ; le rapport effectif des raideurs descendra à 2 environ, tandis que celui des contraintes voisinera 1,5 pour le béton et 4 pour l'acier tendu.

Le relèvement de l'axe neutre au-dessus du centre de gravité des sections totales de béton armé, libres de précontrainte, provient de la distension et de la fissuration progressives de la région tendue. Une précontrainte suffisante place, au contraire, l'axe neutre en dessous du centre de gravité du béton entier, du côté de l'armature, quelle que soit la compacité du conglomérat ; il en résulte une diminution importante des contraintes du béton comprimé sous un couple fléchissant fixe. La capacité de résistance du profil est donc fortement augmentée, mais l'armature travaille intensément vu sa contrainte initiale, ce qui n'est admissible que grâce à l'emploi d'aciers à haute limite apparente.

En effet, supposons notre profil rectangulaire fléchi travaillant, en phase II_b, à

$\sigma_b = 50$ kg : cm² dans le béton comprimé
$\sigma_a = 1500$ kg : cm² dans l'acier tendu.

Son axe neutre se trouve au quart de la hauteur utile, à raison de

$$\xi = 0{,}25$$

si l'on admet le rapport d'équivalence

$$n = 10.$$

La résultante des contraintes de pression

$$D_{II} = \sum \triangle F_v \cdot \sigma_v$$

se place au tiers de la hauteur utile

$$x = \xi \cdot h'$$

c'est-à-dire à la distance

$$r_{II} = 0{,}917\, h'$$

de l'armature tendue.

[1] Voir *Bulletin technique* du 16 janvier 1937, page 14.