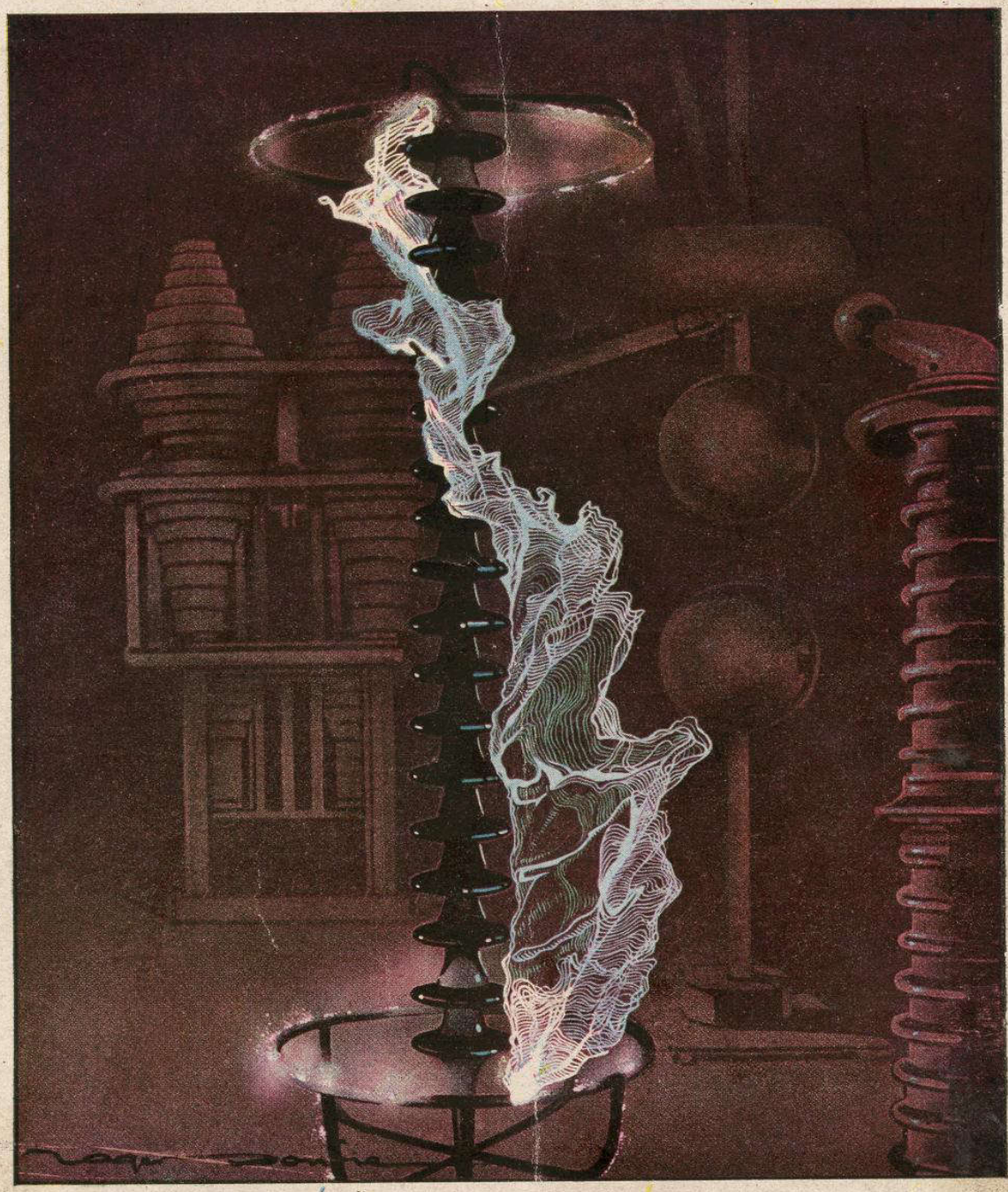
NOVEMBRE 1944 N° 326

SCIENCE ET VIE



10 FRANCS

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

SCIENCE ET VIE

Tome LXVI - N° 326 — Novembre 1944

SOMMAIRE

★ Vers les transports d'énergie à 400 000 volts, par Maurice Rousselier 133

★ Le frein de bouche et les progrès de l'armement du char et de l'avion, par Camille Rougeron..... 143

★ Comment se développe l'être vivant, par A. Vandel.. 154

★ La reproduction du relief superficiel au moyen de décharges électriques, par Armand de Gramond..... 165

★ La photographie en infrarouge révèle certaines maladies des plantes, par Maurice Déribéré..... 169

★ Les A Côté de la Science, par V. Rubor..... 171

Les tensions des lignes de transport de force atteignent exceptionnellement 285 000 volts aux Etats-Unis et 380 000 volts en Allemagne. Mais la France est encore le seul pays possédant un véritable réseau d'interconnexion à 220 000 volts, assurant les grands transports d'échange d'énergie entre régions productrices et consommatrices de son territoire. L'appareillage électrique et en particulier les isolants sont soumis, sous de telles tensions, à des contraintes sévères auxquelles ils doivent résister dans les conditions les plus dures qui peuvent se présenter en pratique. L'essai du matériel s'effectue dans des laboratoires spécialisés, équipés pour des tensions industrielles nominales deux ou trois fois plus grandes lorsqu'on opère à la fréquence industrielle, et encore supérieures pour des essais de choc de très brèves durées, de l'ordre de la microseconde. La couverture du présent numéro représente l'amorçage d'un arc sous 50 périodes par seconde, lors d'essais de contournement d'une chaîne de 18 isolateurs pour très haute tension. Le voltage atteint dans cet essai dépasse 1 000 000 volts. (Voir l'article sur les transports d'énergie à très haute tension page 133 de ce numéro.)

« Science et Vie », magazine mensuel des Sciences et de leurs applications à la vie moderne. Rédaction, Administration, Publicité : actuellement 3, rue d'Alsace-Lorraine, Toulouse. Chèque postal : numéro 184.05 Toulouse. Téléphone : 230-27.

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays. *Copyright by* « Science et Vie », Novembre mil neuf cent quarante-quatre. Registre de Commerce : Toulouse 3235 B.

Abonnements : France et Colonies, un an : cent dix francs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

VERS LES TRANSPORTS D'ÉNERGIE A 400 000 VOLTS

par Maurice ROUSSELIER

L'interconnexion des réseaux de distribution a permis la collaboration rationnelle des ressources énergétiques nationales (houille noire et houille blanche). Au fur et à mesure de l'accroissement des puissances et des distances à couvrir entre les centres de production et les centres de consommation, des problèmes nouveaux ont surgi dont la solution s'est avérée de plus en plus délicate. L'élévation progressive de la tension en particulier s'est révélée indispensable au maintien de conditions de transport acceptables du point de vue économique. On est ainsi passé, en France, de 18 000 volts en 1896, pour une des premières lignes installées, longue seulement de 60 km, à 110 000 volts en 1919, à 150 000 volts en 1921 et à 220 000 volts en 1931. Déjà ce super-réseau est dépassé : avec l'augmentation remarquablement uniforme de la consommation des grands centres industriels, la tension « économique » apparaît aujourd'hui de l'ordre de 280 000 volts. Elle atteindrait 400 000 volts dans vingt ans si la prépondérance de plus en plus grande de la production hydraulique sur celle des centrales thermiques, en augmentant l'énergie transportée, ne devait réduire ce délai. L'adoption d'une telle tension ne semble pas au-dessus des possibilités de la technique actuelle, tant pour les lignes proprement dites (pylônes isolateurs, conducteurs), que pour l'appareillage (transformateurs, disjoncteurs, etc...). Il s'agira vraisemblablement là encore de courant alternatif; mais il est nécessaire d'évoquer dans ce domaine les progrès effectués, grâce aux mutateurs à valves électroniques, par le courant continu à très haute tension, actuellement expérimenté dans divers pays et qui semble convenir particulièrement aux transports massifs d'énergie transcontinentaux.

L'ÉTAT actuel du réseau français de lignes de transports d'énergie à haute tension est l'aboutissement d'une longue évolution. Initialement, soit vers le début de ce siècle, la *distribution* était assurée par une poussière de petits réseaux constitués principalement de *secteurs urbains* alimentés en courant continu par des centrales thermiques. Par exemple, la ville de Paris ne possédait pas moins de *seize* réseaux indépendants. C'est avec les premières usines hydroélectriques éloignées des centres de consommation, à des distances qui furent au début de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres, qu'apparurent les lignes de *transport* d'énergie proprement dites.

L'interconnexion et le développement des réseaux de transport

L'interconnexion (1) des réseaux de transport d'énergie fut d'abord réalisée à l'échelle *locale* par la conjugaison d'une usine hydraulique et d'une usine thermique, la seconde permettant de suppléer aux irrégularités de production de la première; puis à l'échelle régionale, en reliant un *complexe régional* d'usines thermiques et hydrauliques.

L'interconnexion *nationale* des systèmes régionaux permit à ces réseaux de débiter les uns dans les autres et d'associer notamment les différents régimes hydrauliques des grandes régions de production, qui se complètent parfois remarquablement.

Il devint dès lors possible d'utiliser à plein les ressources hydrauliques et de sélectionner les usines produisant au tarif le plus économique, soit, dans l'ordre : usines au « fil de l'eau », usines à réservoir, centrales thermiques modernes à rendement élevé et centrales thermiques à rendement moindre.

D'un autre côté, on peut réduire, toutes choses égales par ailleurs, les puissances à envisager pour satisfaire à la *pointe* de consommation la plus élevée. On constate en effet que la pointe globale instantanée pour plusieurs consommateurs de caractère différent : force motrice, éclairage, appareils électro-domestiques, etc., est inférieure à la somme des pointes pour chacun d'eux.

En revanche, l'énergie « circulant » davantage et de plus en plus loin, les *pertes en ligne* augmentent : elles sont passées en France de 25 % en 1928 à 31 % en 1939, soit plus de 3 milliards de kilowatts-heure cette année-là. Il est vrai qu'elles sont imputables pour moitié aux réseaux de distribution basse tension, qui sont de plus en plus surchargés et ne correspondent plus à nos besoins actuels. Mais les avantages l'ont de loin emporté sur les inconvénients et les pertes ont été récupérées, et au delà, par une utilisation presque parfaite de l'énergie disponible dans les usines hydrauli-

(1) Voir : « Qu'est-ce que l'interconnexion? » (*Science et Vie*, n° 292, décembre 1941, p. 321).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

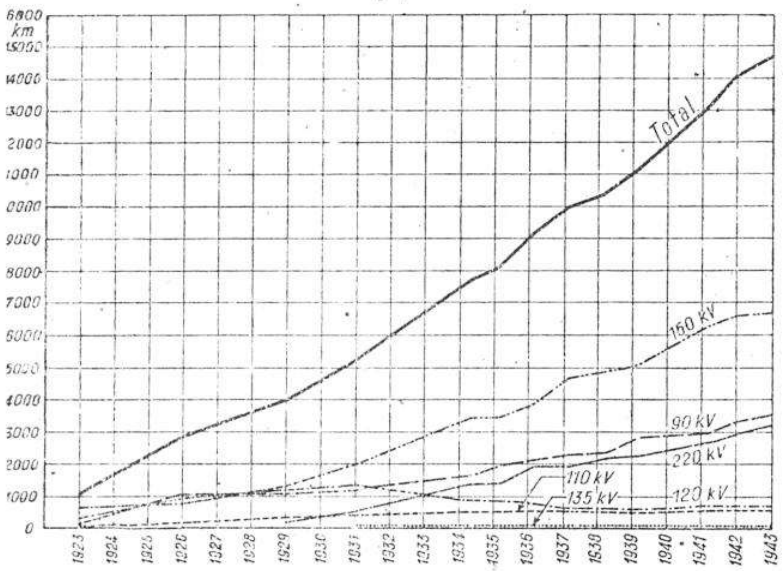


FIG. 1. — COMMENT S'EST ACCRU LE RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉNERGIE EN FRANCE DE 1923 A 1943

Les ordonnées représentent les longueurs de files des pylones, classées suivant leurs tensions possibles.

ques (le coefficient d'utilisation de l'eau a atteint 97 % en 1942).

L'abaissement constant du prix de revient moyen (rapporté à un étalon de base) du kilowatt-heure au cours de ces dernières années, est dû pour une bonne part à l'interconnexion. Elle a rendu possibles des transferts d'énergie sur des distances telles qu'ils n'auraient sans doute pas été économiquement viables sans des avantages corrélatifs dans l'utilisation : c'est un point que nous n'avons pas voulu omettre avant d'aborder le problème de l'élévation des tensions tel qu'il se pose actuellement.

L'augmentation des tensions, conséquence de l'accroissement des distances et des puissances

Malgré l'énorme investissement de capitaux que représente la construction de lignes à longue distance, ainsi que les pertes en ligne dont nous avons donné une idée plus haut, on a été amené à alimenter les centres de consommation par des usines de plus en plus éloignées, installées là où les conditions d'établissement s'avèrent les plus économiques. Ce phénomène est encore accéléré par l'interconnexion, comme nous venons de le dire : il tend à se créer dans le réseau de véritables courants de transport permanents qui en modifient profondément le caractère primitif. C'est ainsi que les Pyrénées exportent actuellement de l'énergie vers la région parisienne située à 800 km. Les transports « directs » c'est-à-dire ne bénéficiant pas d'un réseau préétabli pour des besoins d'interconnexion, se limitent à des portées plus modestes : citons aux Etats-Unis le Boulder Dam qui livre son énergie à Los Angeles, à la distance de 500 km.

Les usines thermiques sont plus généralement placées près des centres de consommation (région parisienne) ; mais si le transport du charbon se révèle moins économique que le transport du courant, il peut devenir plus rationnel de les installer sur le carreau de la mine (Silésie).

L'augmentation des *puissances* transportées résulte du développement général de la consommation (la consommation française est passée de 11 milliards de kilowatts-heure en 1928 à 17 milliards en 1939), et aussi de la *concentration* des génératrices en usines gigantesques qui permettent d'abaisser le prix de revient de l'énergie.

En France, une usine est prévue pour un équipement de 500 000 kilowatts, une autre totalisera plus d'un million de kilowatts. A l'étranger, le Dnieprostroï (1) disposait de 600 000 kW ; le Boulder Dam (2), sur le Colorado, atteint l'énorme puissance de 1 300 000 kW, soit près de la moitié de la puissance des usines hydroélectriques françaises.

D'où vient la nécessité d'augmenter la tension de service, corrélativement à l'accroissement de distance et à l'accroissement de puissance?

On sait que la puissance transportée est égale, au facteur de puissance près, au produit de la tension par l'intensité ; tout accroissement de puissance s'obtient donc par l'augmentation de l'un de ces deux termes. Si l'on choisit l'intensité, il faut, pour maintenir les pertes en

(1) Voir : « La centrale hydroélectrique la plus puissante du monde » *(Science et Vie,* n° 176, février 1932, p. 91).

(2) Voir : « Les grands travaux américains » *(Science et Vie,* n° 264, juin 1939, p. 491).

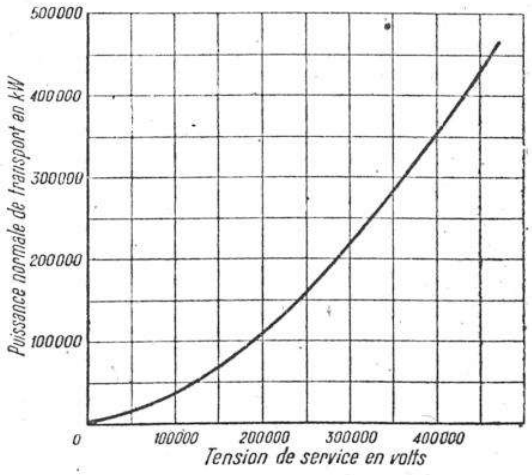


FIG. 2. — COURBE DONNANT LA PUISSANCE NORMALE DE TRANSPORT EN FONCTION DE LA TENSION

Cette courbe résulte d'une étude économique serrée effectuée pour une distance de transport de 300 km (la distance de transport influe d'ailleurs relativement peu sur la « tension économique » à adopter pour une puissance déterminée). On voit qu'en passant de 220 kV à 400 kV, la puissance transportée peut être sensiblement triplée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ligne par effet Joule (proportionnelles à la résistance ohmique de la ligne) à un taux acceptable, ainsi que pour éviter des chutes de tension en ligne (également proportionnelles à la résistance ohmique) trop élevées qui entraîneraient des variations inadmissibles de la tension d'utilisation avec la charge, diminuer la résistance des conducteurs, c'est-à-dire augmenter leur section. L'augmentation de la tension n'entraîne qu'un accroissement des dimensions des isolateurs et de leur espacement : on comprend que cette dépense croisse beaucoup moins rapidement avec la puissance transportée que la dépense de métal conducteur, qui tend très vite, pour les tensions moyennes, à devenir la partie principale du coût de la ligne.

Ainsi qu'il est souvent de règle dans les réalisations humaines, les solutions *techniques* sont guidées par le facteur *économique* : rien n'empêcherait théoriquement de transporter une puissance quelconque avec une faible tension. Pratiquement il y a des « tensions économiques » dont la figure 2 donne une idée, et des « portées économiques » dont on ne peut guère s'écarter et qui résultent d'un calcul serré des prix de revient. C'est ainsi qu'une ligne à 150 kilovolts peut transporter en principe 60 000 kW à 250 km ; une ligne de 250 kilovolts peut transporter trois fois plus loin une puissance deux fois plus grande, pour un coût d'établissement au kilomètre de 50 % plus élevé.

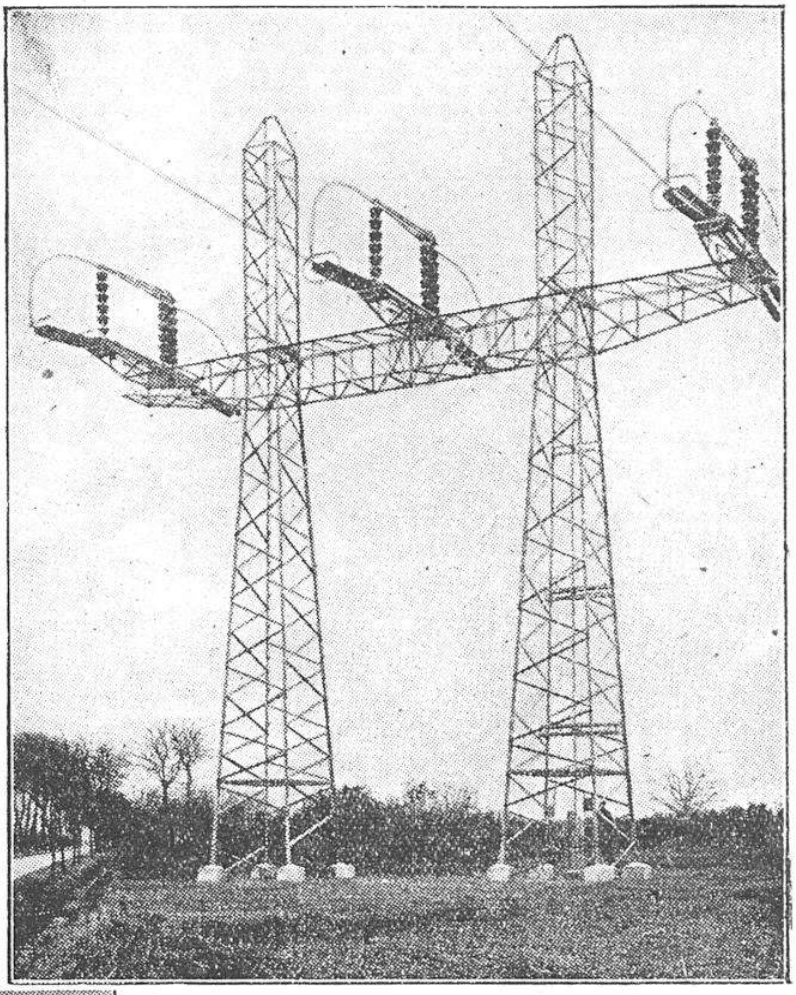


FIG. 3. — PYLONE DE SECTIONNEMENT AVEC CHAINE DOUBLE D'ANCRAGE D'UNE LIGNE A 220 000 VOLTS (ISOLATEURS COMPAGNIE ÉLECTRO-CÉRAMIQUE)

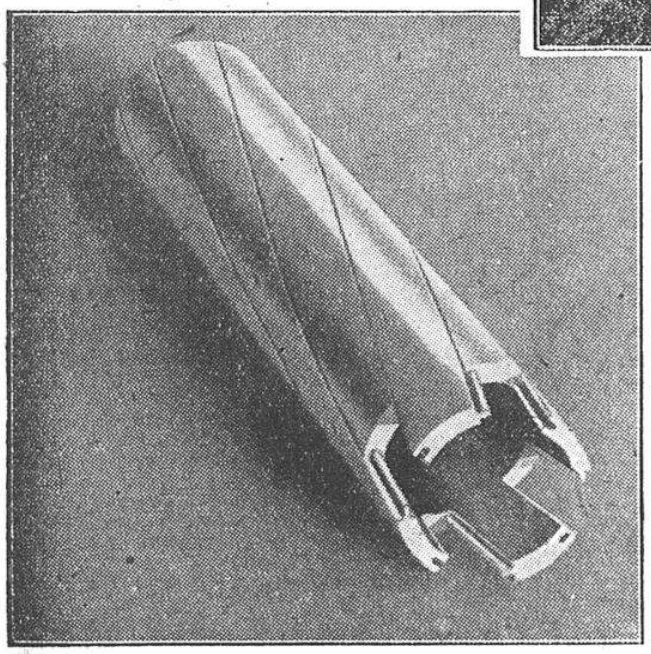


FIG. 4. — TRONÇON DE CONDUCTEUR CREUX POUR LA TRÈS HAUTE TENSION, SUPÉRIEURE A 250 KV

Les segments qui constituent le câble, formés de fils plats à profil légèrement incurvé, comportent sur l'un de leurs flancs une rainure et sur l'autre une languette. Leur câblage s'effectue aisément en engageant la languette d'un segment dans la rainure du segment voisin. Bien que l'assemblage soit réalisé par un sertissage énergique, les éléments constituants peuvent glisser longitudinalement les uns sur les autres, ce qui confère au câble une grande flexibilité. (Tréfileries du Havre.)

Les étapes de la réalisation des lignes

Avant d'examiner les raisons qui font prévoir la construction à brève échéance de lignes à 400 000 volts, il n'est pas inutile de faire le point sur les progrès effectués en matière de transport d'énergie : ils sont moins connus du public, plus obscurs, que ceux de l'automobile ou de l'aviation, mais non moins prodigieux.

Une des premières lignes de transport en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courant alternatif fut établie en 1896 par la Société Méridionale de Transport de Force entre Axat et Fabrègues, près de Carcassonne. D'une longueur de 60 km, elle était installée sur poteaux en bois; les conducteurs étaient en cuivre et les portées ne dépassaient guère 60 mètres.

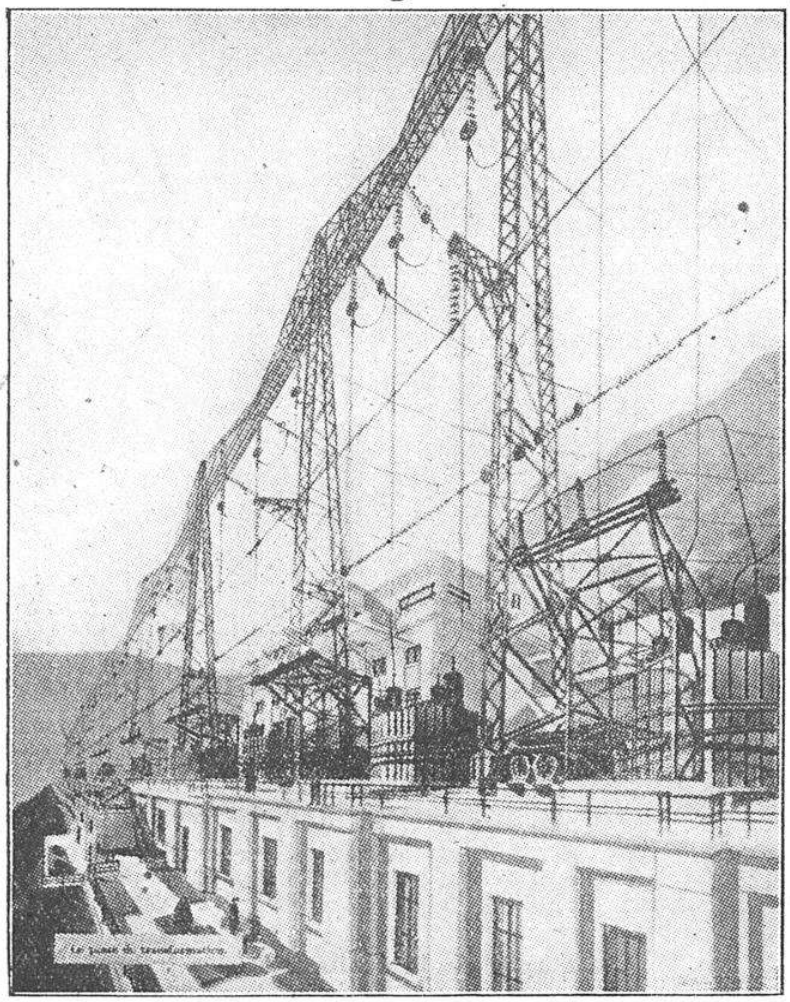


FIG. 5. — VUE EXTÉRIEURE D'UN POSTE DE TRANSFORMATION

Cette station comporte sept transformateurs de 33 000 kilovolts-ampères chacun, 15 000, 150 000 et 220 000 volts. (Société Savoisienne de Constructions Electriques.)

La tension de service était de 18 000 volts. C'était une réalisation hardie pour l'époque : la mise en service, devant un aéropage sceptique, fut d'autant plus émouvante qu'une nichée de rats provoqua un court-circuit malencontreux dans le transformateur! (Depuis on constata que les pannes causées par les animaux étaient fréquentes et qu'il convenait de s'en préserver soigneusement.)

Depuis ces temps héroïques, les tensions n'ont cessé de croître, au fur et à mesure des progrès de la technique. En France, la première ligne à 110 000 volts fut mise en service en 1919, celle de 150 000 volts en 1921, celle de 220 000 volts (1) en 1931. Parallèlement les Etats-Unis inauguraient une ligne à 285 000 volts en 1936, alors que l'Allemagne réalisait une ligne d'interconnexion à 380 000 volts avec la Pologne. Il s'agit là toutefois de réalisations *isolées* qui n'ont pas été intégrées dans un réseau d'interconnexion : nous verrons plus loin quelles sont les difficultés rencontrées dans la stabilisation des réseaux, où la synchronisation et la stabilité sont plus difficiles à obtenir que dans les lignes uniques.

Le réseau français (dont le « bouclage » final date de 1936) demeure actuellement le seul réseau à 220 kilovolts existant au monde, que l'on a dénommé *super-réseau*. Il va être complété à bref délai, et assurer les grands transports d'échange de région à région, qui, récemment encore, nécessitaient le passage par des tensions multiples (90, 120, 150 kilovolts). La longueur des lignes à 220 kilovolts représente à elle seule 87 % du réseau général, dont le développement est de 12 000 km, soit de 22 km par 1 000 km² (2). Bien entendu, ces chiffres ne comprennent ni les sous-réseaux régionaux (tension inférieure à 100 000 volts) ni les réseaux de *distribution* haute et basse tension dont la densité est de plus de 1 000 km par 1 000 km².

Le choix d'un nouvel échelon de tension

Le problème des grands transports d'énergie en France se présente en gros de la façon suivante : une « zone sud » (Alpes, Pyrénées, Massif Central) exporte ses excédents d'énergie hydraulique vers une « zone nord » (principalement région parisienne, la région Nord proprement dite paraissant devoir rester longtemps encore consommatrice d'énergie thermique). Il s'agit donc d'évaluer les besoins de liaisons *futurs* entre ces deux zones, compte tenu du développement à prévoir de l'équipement hydraulique et de la consommation.

On a constaté que depuis 20 ans l'accroissement de la consommation des grandes zones était remarquablement uniforme, et suivait une loi sensiblement linéaire. Si l'on admet que le 220 kilovolts représentait la tension économique des « liaisons Nord-Sud » au moment de sa mise en service (1931), la tension économique actuelle devrait être de l'ordre de 280 kilovolts, et la tension de 400 kilovolts devrait correspondre à nos besoins dans une vingtaine d'années seulement.

En fait, il faut se garder de faire un pas en avant trop mesquin : si l'on devait adopter une tension de l'ordre de 300 kilovolts, il serait

(1) Voir : « La première ligne à 220 000 volts » (*Science et Vie*, n° 188, février 1933, p. 119).

(2) La densité du réseau de transport des Etats-Unis était de 5 km par 1 000 km² en 1936.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vraisemblablement plus rationnel de doubler, tripler, etc., les lignes de 220 kilovolts ou de construire des lignes à 6 fils, plutôt que d'adopter un nouvel appareillage qui serait trop étriqué un jour ou l'autre. D'un autre côté, voir trop grand conduit à des charges économiques inutilement lourdes...

... Il y a donc dans le choix d'un nouvel échelon de tension une part de prophétie, ou d'intuition, difficile à justifier de façon rigoureuse. Mais il y a aussi un facteur que nous avons négligé jusqu'ici : c'est la prépondérance du développement de l'énergie hydraulique sur celui de l'énergie thermique, qui doit entraîner un nouvel accroissement d'énergie transportée. On a pu calculer qu'un nouveau programme d'équipement hydraulique de 4 milliards de kilowatts-heure serait suffisant pour justifier l'échelon à 400 kilovolts, lequel permettrait d'économiser annuellement 400 millions de kilowatts-heure de pertes en ligne sur un équipement à 220 kilovolts. Or il y a actuellement en projet plus de 3 milliards de kilowatts-heure prêts à démarrer dès que les circonstances économiques le permettront. C'est donc dans un délai de huit, dix ans au plus, même en tenant compte des sujétions de reconstruction économique, que le 400 kilovolts deviendra une nécessité immédiate (1).

(1) Notons qu'un problème analogue se pose pour les distributions basse tension. L'emploi du 220/380 V au lieu du 110/220 V actuellement utilisé résoudrait la question de la surcharge des réseaux basse tension. En revanche, il nécessiterait un renouvellement complet de l'appareillage (notamment domestique) et des lignes intérieures.

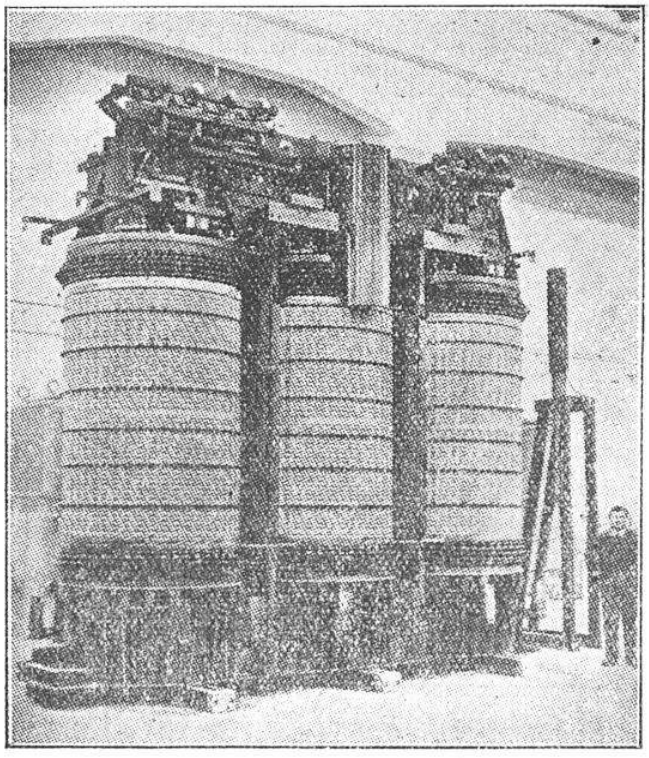


FIG. 6. — VUE DE LA PARTIE ACTIVE D'UN TRANSFORMATEUR (SOCIÉTÉ SAVOISIENNE DE CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES)

On aperçoit les trois noyaux du circuit magnétique de ce transformateur dont l'isolement a été calculé pour satisfaire à un essai de tension de 441 000 volts.

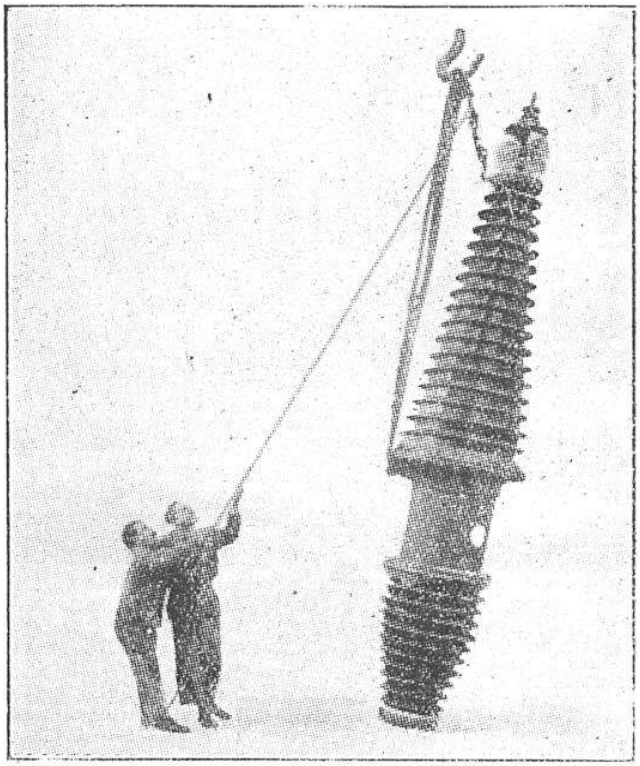


FIG. 7. — ISOLATEUR DE TRAVERSÉE A 220 000 VOLTS (CONSTRUCTION ALSTHOM ; ISOLANTS Cie ÉLECTRO-CÉRAMIQUE)

On voit les proportions que prennent les isolateurs lorsque la tension de service atteint des valeurs élevées.

Mais l'emploi d'une tension de l'ordre de 400 kilovolts soulève toute une série de problèmes techniques en matière de lignes, transformateurs, etc. que nous allons examiner successivement.

La technique des lignes

Il n'y a que peu de chose à dire sur les progrès à réaliser sur les *pylônes*, où la construction en treillis métallique permet toutes les hauteurs et toutes les portées avec une grande légèreté (un pylône pour 150 kilovolts, portée 750 m, hauteur 25 m, pèse environ 5 tonnes). Citons le cas, assez fréquent dans les réalisations actuelles, où les pylônes sont calculés pour une ligne à tension supérieure. La nouvelle artère à 220 kilovolts reliant le massif Central à Paris sera une ligne à six fils dont les pylônes pourront porter éventuellement 3 fils à 400 kilovolts. La ligne Gothard-Simplon a ses pylônes calculés pour 300 kilovolts.

Les *conducteurs* en cuivre sont à peu près universellement remplacés par des conducteurs en *aluminium-acier* comportant plusieurs filins d'aluminium pur toronés avec un câble d'acier, ou en *almelec*, alliage à 98 % d'aluminium

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

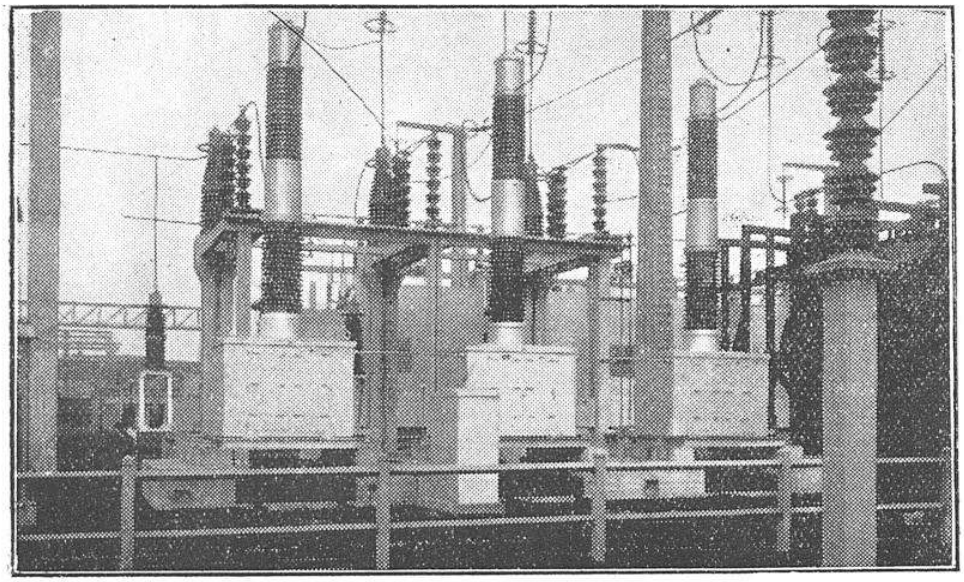


FIG. 8. — INTERRUPTEUR TRIPOLAIRE A FAIBLE VOLUME D'HUILE ET A IMPULSION CENTRALE POUR 220 KILOVOLTS, 500 AMPÈRES, POUVOIR DE COUPURE 2 500 000 KILOVOLTS-AMPÈRES (ALSTHOM)

possédant des caractéristiques mécaniques améliorées, voisines de celle du cuivre. Malgré leur résistivité plus importante, leur emploi est finalement plus économique, tant en raison de la différence de prix de l'aluminium et du cuivre, que des portées que permet leur légèreté, ce qui se traduit par une économie sensible sur les pylônes. On atteint couramment des portées de 600 à 1 000 m, et dans certains cas 1 200 m et plus.

Au delà d'une tension voisine de 250 kilovolts, *l'effet corona* (1) tend à faire adopter une nouvelle structure de câble. Déjà sensible vers 120 kilovolts, l'effet corona se manifeste par l'ionisation de l'air autour du conducteur et par une perte d'énergie; il est d'autant plus sensible que le diamètre du conducteur est plus petit. On y remédie en augmentant l'écartement et le diamètre des fils Pour les très hautes tensions on tend à adopter les câbles *creux*, dont le diamètre extérieur est de l'ordre de deux fois celui du câble plein pour une même section de métal. Ils sont constitués, soit par des fils toronés sur une spirale creuse, soit par des torons méplats convenablement profilés et assemblés en spirale creuse par rainure et languette.

La céramique constituant les *isolateurs* a fait l'objet d'études continues pour en améliorer les caractéristiques mécaniques et électriques. Ces caractéristiques ne sont en effet nullement indépendantes, et la tension disruptive (ou de percement) de l'isolant est d'autant plus basse que l'isolant est soumis à un effort mécanique plus élevé. Là encore, les problèmes soulevés par des tensions de l'ordre de 400 kilovolts ont été résolus en laboratoire d'essai, où s'effectuent notamment des essais de contournement par temps humide, verglas, etc., avec des tensions atteignant 500 000 volts.

(1) A distinguer nettement de « l'effet de peau » ou « skin effect » qui n'est sensible qu'en haute fréquence et très hautes tensions.

L'appareillage haute-tension : les transformateurs

Les qualités que l'on exige des gros transformateurs qui élèvent ou abaissent la tension au niveau voulu sont principalement : un bon rendement et une grande sécurité. Les rendements ont été améliorés par l'utilisation de formes d'enroulement plus étudiées, et l'emploi de nouvelles tôles au silicium réduisant de 60 % les pertes par hystérisis et courants de Foucault.

Malgré les rendements élevés que l'on obtient couramment (ils atteignent 99 %) un gros transformateur de 60 000 kilovolts-ampères, par exemple, doit finalement évacuer en chaleur une puissance de l'ordre de 500 kilowatts. Cette énergie représente 400 millions de calories à l'heure, soit de quoi porter à ébullition 3 500 litres d'eau.

Pour les transformateurs de moyenne puis-

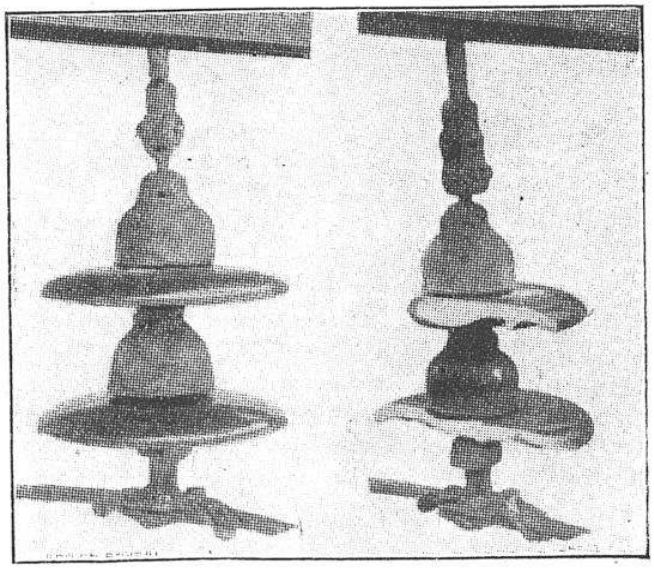


FIG. 9. — EFFETS MÉCANIQUES DE COURTS-CIRCUITS SUR DES ISOLATEURS

Pour un courant d'arc de 5 000 ampères, on voit que l'isolateur de gauche, soumis à un court-circuit de 0,08 seconde, n'a pas souffert, tandis que celui de droite, pour lequel le court-circuit a duré 1,6 seconde, a été fortement endommagé. C'est un des facteurs qui militent en faveur de disjoncteurs à coupure aussi rapide que possible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

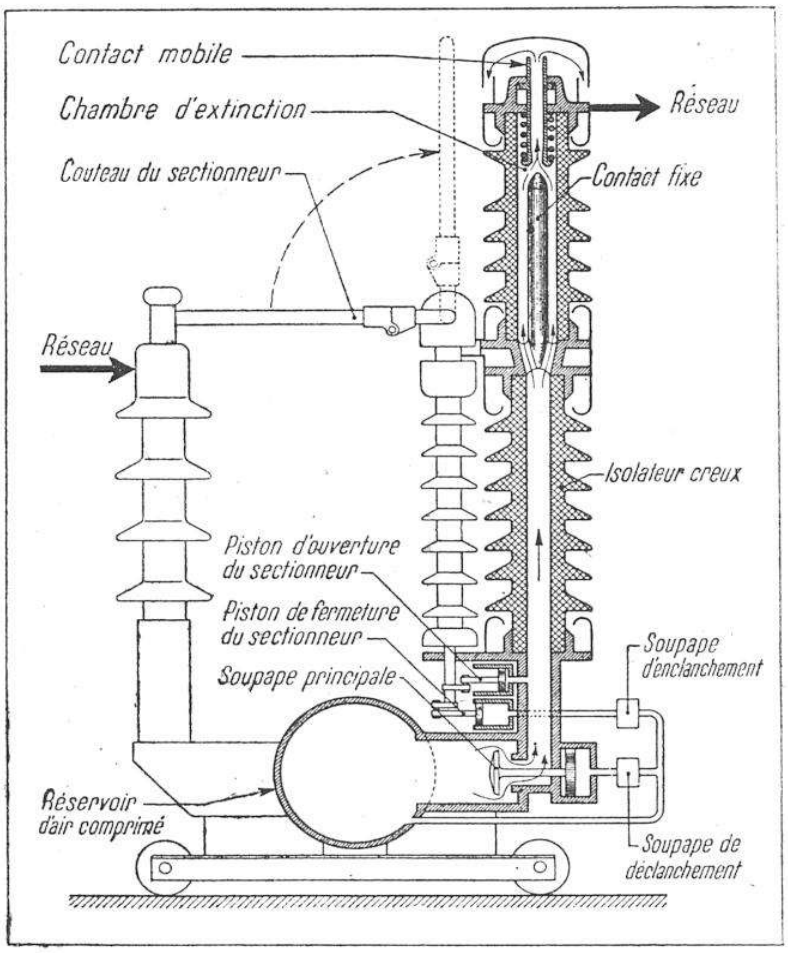


FIG. 10. — SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UN DISJONCTEUR PNEUMATIQUE SYSTÈME BROWN BOVERI

La figure représente le dispositif de coupure pour une phase du réseau, le disjoncteur tripolaire comportant trois ensembles identiques. Il comporte essentiellement un sectionneur dont le couteau est en série avec les contacts de rupture, lesquels sont enfermés au sommet de la colonne isolante, dans la chambre d'extinction. La manœuvre de l'appareil est obtenue par action de l'air comprimé venant du réservoir placé à la base. Deux soupapes, commandées électriquement, provoquent, l'une l'enclanchement, l'autre le déclanchement. La première permet à l'air comprimé d'agir sur le piston dont le mouvement commande la fermeture du sectionneur. La deuxième dirige l'air comprimé sur le piston de la soupape principale qui, en s'ouvrant, met le réservoir en communication avec la colonne isolante creuse. L'air soulève le contact mobile à la partie supérieure, entoure et refroidit l'arc qui s'éteint au premier passage par zéro de l'intensité. L'air agit aussi sur le piston d'ouverture du sectionneur, qui se relève avec un certain retard. Lorsque le disjoncteur est équipé pour réenclanchement rapide sur court-circuit, la première coupure provisoire est opérée seulement dans la chambre d'extinction et uniquement sur le pôle correspondant à la phase accidentée. Au bout d'un temps déterminé, le dispositif de coupure se referme. Si le défaut sur la ligne a disparu, le service est maintenu. Si, au contraire, le défaut persiste, le disjoncteur opère alors seulement la coupure définitive sur les trois pôles du triphasé. (Document Compagnie Electro-Mécanique.)

sance, la circulation d'huile par *convection* suffit pour transmettre la chaleur aux parois qui l'évacuent à leur tour dans l'atmosphère par des ailettes; pour les grosses unités, d'autant plus difficiles à refroidir que la surface extérieure est relativement plus petite, on a recours à la circulation d'eau avec radiateurs, ou à la circulation d'huile avec passage dans la saumure réfrigérée. L'échauffement de l'huile, surtout l'échauffement local, est contrôlé de façon à éviter une polymérisation, qui entraînerait la destruction des propriétés isolantes et l'amorçage d'un arc.

L'obstacle le plus grave à la construction de puissants transformateurs à la très haute tension, consiste dans l'*encombrement* des appareils qui doivent être montés en usine : aussi tend-on de plus en plus à réduire l'importance unitaire des transformateurs en utilisant trois appareils monophasés. A titre d'exemple, un transformateur 60 000/150 000 volts de 30 000 kilovolts-ampère pèse 100 tonnes et ne contient pas moins de 25 tonnes d'huile; son encombrement est de 6,50 m × 6,50 m × 4,70 m. On atteint là à peu près la limite des possibilités de transport.

Les entrées de poste, les départs de ligne, et d'une manière générale toutes les connexions d'un grand poste de transformation sont depuis longtemps étudiées en laboratoire d'essai sous des tensions supérieures à 400 000 volts : il ne se posera donc guère que des question de dimensionnement dans l'adaptation des installations actuelles à une tension supérieure.

La protection et les disjoncteurs

La protection contre les surintensités, qui proviennent généralement de perturbations atmosphériques (foudre) ne pose aucun problème particulier pour les très hautes tensions : rappelons qu'elle est résolue par des selfs amortissant le front de l'onde perturbatrice et des parafoudres d'écoulement à « cornes » permettant une autoextinction de l'arc.

Le *disjoncteur* réalise la protection contre les « surintensités » et joue un rôle analogue au fusible des installations basse tension : la difficulté en haute tension réside dans l'extinction rapide de l'arc de coupure, et aussi dans l'évacuation de l'énergie calorifique dégagée. Les anciens disjoncteurs étaient des « monstres » nés par extrapolations successives du petit disjoncteur basse tension : on arrivait à 20 tonnes d'huile par pôle, soit 60 tonnes au total, avec des énergies de *commande* de plusieurs dizaines de kilowatts. On réalise actuellement des disjoncteurs *pneumatiques* avec soufflage de l'arc (utilisés surtout pour les moyennes tensions) et des disjoncteurs à *faible volume d'huile* où le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bain d'huile a pu être réduit dans le rapport de 20 à 1.

Un grand progrès a été réalisé par le disjoncteur à *déclenchement ultra rapide* (1), aujourd'hui universellement adopté sur les réseaux de transport à 150 et 220 kilovolts, qui permet de rétablir le courant aussitôt après la fin de la perturbation, sans que la synchronisation des réseaux soit affectée. La plupart des perturbations sont en effet à caractère *transitoire* (de l'ordre de quelques centièmes de seconde). On arrive actuellement à couper en quelques « cycles » de un cinquantième de seconde, alors qu'en 1930 encore, la durée de coupure était de l'ordre de la seconde. Le réenclenchement ne peut toutefois se produire avant la *déionisation* du diélectrique traversé par l'arc pour que l'appareil retrouve son état initial, sinon il pourrait se produire de nouveaux déclenchements intempestifs. Il y a donc là deux facteurs contradictoires : d'une part il faut un rétablissement rapide pour ne pas perdre le synchronisme, et d'autre part l'ionisation est d'autant plus complète que la tension de service est plus élevée.

Quoi qu'il en soit, plusieurs solutions pour accélérer la déionisation ont été adoptées par les constructeurs, et les disjoncteurs à 500 000 volts de tension nominale sont une réalité concrète : un prototype était déjà présenté à l'Exposition de Paris de 1937.

Nous ne quitterons pas ce sujet sans indiquer à quel extraordinaire stade de perfection en est arrivée la protection des lignes : les relais de protection commandant les disjoncteurs sont devenus de véritables robots réalisant des mesures de réactance, de déséquilibrage, de surtension; ils échangent leurs résultats par courants porteurs de haute fréquence utilisant la ligne elle-même, et décident s'il y a lieu de disjoncter telle ou telle section de réseau.

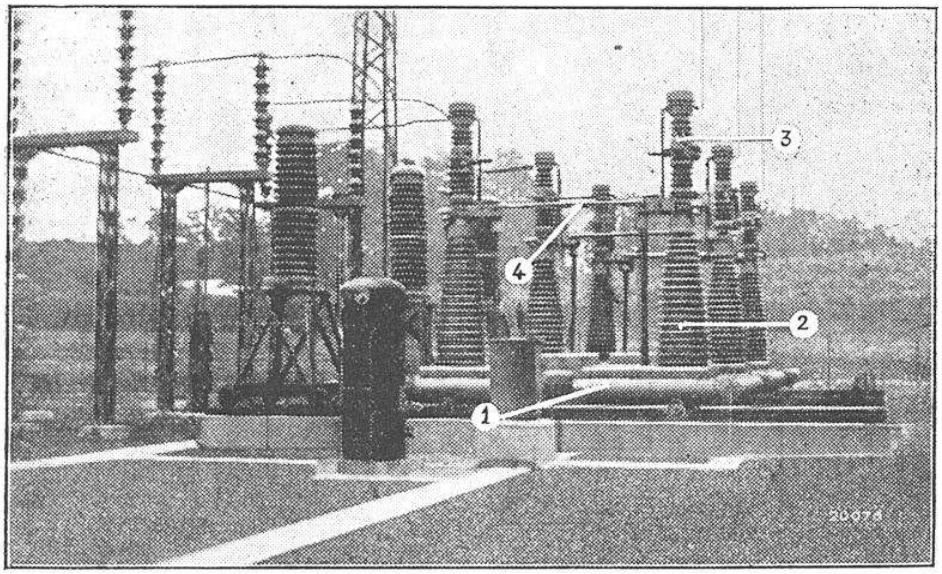


FIG. 11. — DISJONCTEUR PNEUMATIQUE SYSTÈME BROWN BOVERI POUR RÉSEAU A 220 000 VOLTS; POUVOIR DE COUPURE 2 500 000 KILOVOLTS-AMPÈRES

Ce disjoncteur fonctionne comme l'indique le schéma figure 10, mais, comme tous les appareils de ce système prévus pour des tensions supérieures à 110 000 volts, il comporte plusieurs chambres de coupure placées en série dans la même colonne isolante creuse. Cet appareil triphasé possède par phase : 1. Un réservoir d'air comprimé; 2. Une colonne isolante creuse; 3. Une colonne de chambres d'extinction; 4. Un sectionneur. (Document Compagnie Electro-Mécanique.)

La stabilité

Les phénomènes d'instabilité apparaissent sur les lignes suffisamment longues, dont l'impédance propre s'oppose en quelque sorte à l'appoint de puissance (ou puissance *synchronisante*) nécessaire à la régulation. Il s'agit là d'un phénomène très complexe : disons seulement que l'on s'attache à réduire l'impédance de la ligne (qui se comporte alors comme une ligne plus courte) par des bobines d'inductance en dérivation et des capacités en série, ou encore par des compensateurs synchrones, qui, on le sait, équivalent à une capacité.

La régulation en très haute tension n'imposerait aucune condition technique nouvelle, ni même aucune dépense supplémentaire, rapportée au kilowatt de puissance transportée. Il n'en serait pas de même s'il devait être nécessaire, sur les futurs circuits à 400 kilovolts, d'adopter plusieurs échelons de transformation entre les génératrices et la ligne, introduisant des impédances supplémentaires. Or le raccordement direct des centrales au réseau 400 kilovolts ne sera possible que pour de très grosses puissances, assez rares à l'échelle géographique française malgré la tendance à la concentration de puissance. Aussi le tracé de circuits à 400 kilovolts serait-il vraisemblablement appelé à desservir les centrales très puissantes, de l'ordre de quelques centaines de milliers de kilowatts.

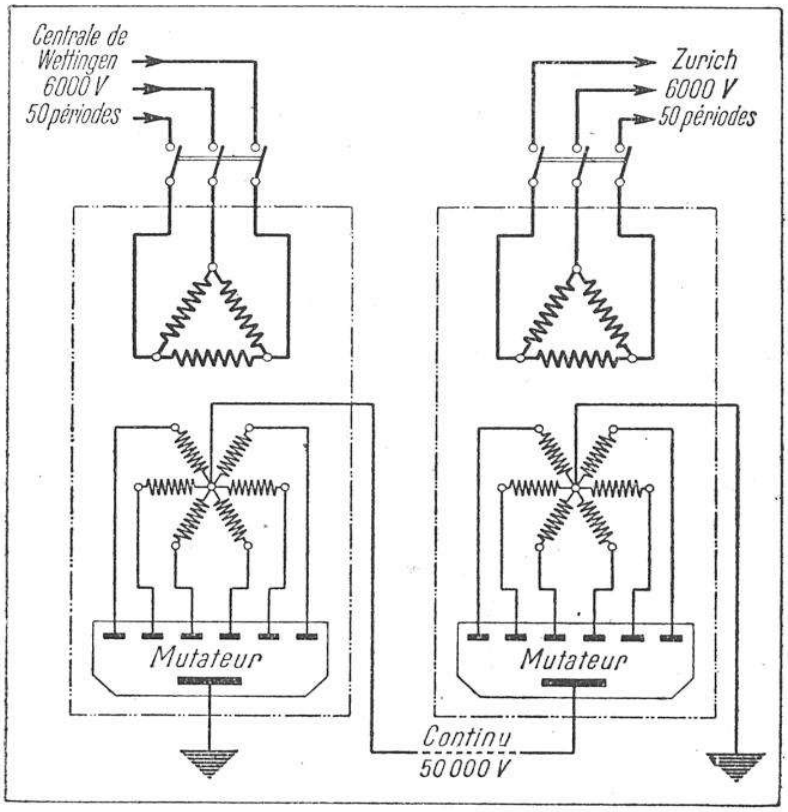
Courant alternatif ou courant continu?

Les premiers transports d'énergie électrique furent réalisés en courant continu (1), mais les avantages du courant alternatif, tant du point de vue générateurs et appareils d'utilisation qu'en raison de la facilité d'élever ou d'abaisser la tension avec un rendement très élevé, en imposèrent rapidement l'emploi universel. Les rares réalisations à l'échelle industrielle finirent par

(1) Leur emploi diminue de plus de 50 % les interruptions de service.

(1) La mise en service de la ligne à 6 000 volts continu Creil-Paris date de 1887.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



quement, le mutateur assure la conversion en courant alternatif : la commande de la polarité est faite par un moteur synchrone alimenté par le réseau alternatif avec lequel on recherche le synchronisme.

Dans l'état actuel de la technique, on réalise des mutateurs de [illegible] kilowatts à la tension de 50 000 volts. Il serait théoriquement possible, la question économique mise à part, d'obtenir 400 000 volts continus par le groupement en série de huit mutateurs, dans des conditions de rendement qui ne seraient pas inférieures à celles des transformateurs.

Les partisans du courant continu insistent vivement sur ses avantages en matière de trans-

FIG. 12. — SCHÉMA DE LA PREMIÈRE TRANSMISSION D'ÉNERGIE EN COURANT CONTINU 50 000 VOLTS RÉALISÉE AU MOYEN DE MUTATEURS

Cette transmission, qui eut lieu pendant l'Exposition Nationale suisse de 1939, a démontré les grandes possibilités de transformation du courant par mutateurs (alternatif en continu ou inversement). Le courant alternatif à 6 000 volts, fourni par la centrale de Wettingen, était en effet transformé en continu 50 000 volts lequel, à son arrivée à Zurich, était à nouveau transformé en alternatif 6 000 volts par un mutateur semblable au premier.

ne plus être exploitées en raison des difficultés d'interconnexion.

Actuellement, il ne peut être question d'abandonner le courant alternatif pour tout ce qui concerne la production d'une part, et l'utilisation et la distribution basse tension d'autre part, mais la mise au point récente de *mutateurs* de grande puissance à haute tension, capables d'assurer économiquement la transformation continu-alternatif et vice versa permet de fonder de nouveaux espoirs sur l'utilisation du courant continu pour le transport de l'énergie.

Le fonctionnement des mutateurs résulte du principe des valves électroniques redresseuses (1) ; une grille polarisée, placée entre l'anode et la cathode, dont la polarité commandée par un commutateur change de signe en synchronisme avec le courant à redresser, permet d'utiliser les alternances avec des rendements extrêmement élevés (de l'ordre de 99,9 %). Récipro-

(1) Voir : « Comment fonctionnent les valves à gaz ionisé » *(Science et Vie,* n° 220, octobre 1935, p. 281).

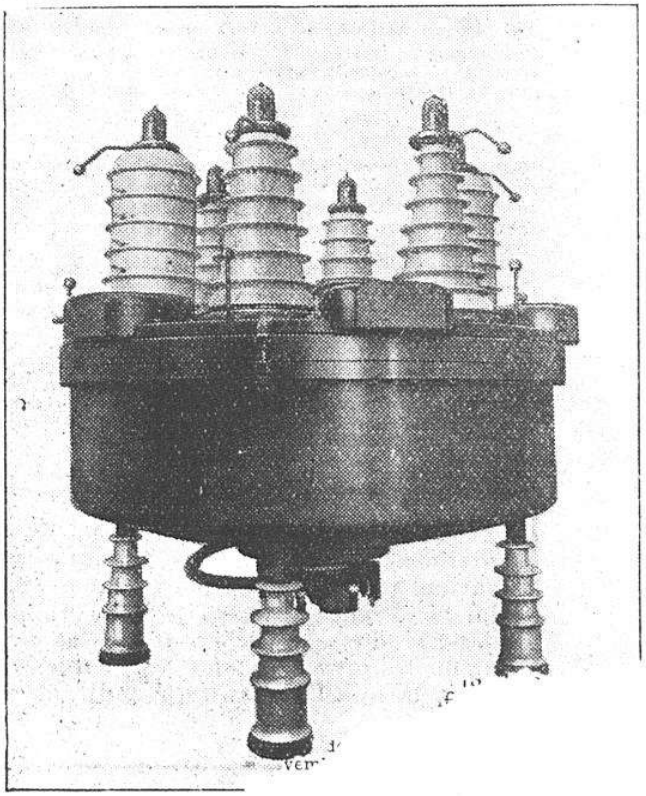


FIG. 13. — MUTATEUR A VAPEUR DE MERCURE A TRÈS HAUTE TENSION 50 000 VOLTS, 300 AMPÈRES, SYSTÈME BROWN BOVERI, CONSTRUIT POUR LES ESSAIS DE TRANSMISSION D'ÉNERGIE EN COURANT CONTINU A TRÈS HAUTE TENSION

A la station de départ, les appareils de ce type fonctionnent en mutateurs alternatif-continu, tandis qu'à l'arrivée ils sont utilisés en mutateurs continu-alternatif, débitant du courant alternatif (triphasé par exemple) sur les réseaux de distribution. (Document Compagnie Electro-Mécanique.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

port : il n'y a plus d'effet d'inductivité ou de capacité et les chutes de tension en ligne sont plus faibles; la stabilité du réseau ne pose d'autre problème que celui de la protection, que réalise le mutateur par blocage ionique; enfin les pertes par défaut d'isolement et par effet corona sont plus réduites puisque la tension *maximum* que supporte un réseau alternatif est, on le sait, égale à $\sqrt{2}$ fois la tension *efficace* ou continue. Ces avantages sont particulièrement nets dans l'emploi des câbles souterrains (1) où les effets de capacité sont très

liser le courant continu sur les lignes proprement dites, ne saurait compenser le prix très élevé des mutateurs d'extrémité que pour les très longues lignes d'un seul jet, de l'ordre d'un millier de kilomètres. Outre que ce problème ne se poserait, en ce qui nous concerce, qu'à l'échelle internationale, il semble bien que l'on ne puisse envisager pour un avenir rapproché l'utilisation d'une technique qui n'a pu encore être expérimentée à l'échelle des puissances actuelles sur les grands réseaux, et dont la mise au point ne saurait être immédiate.

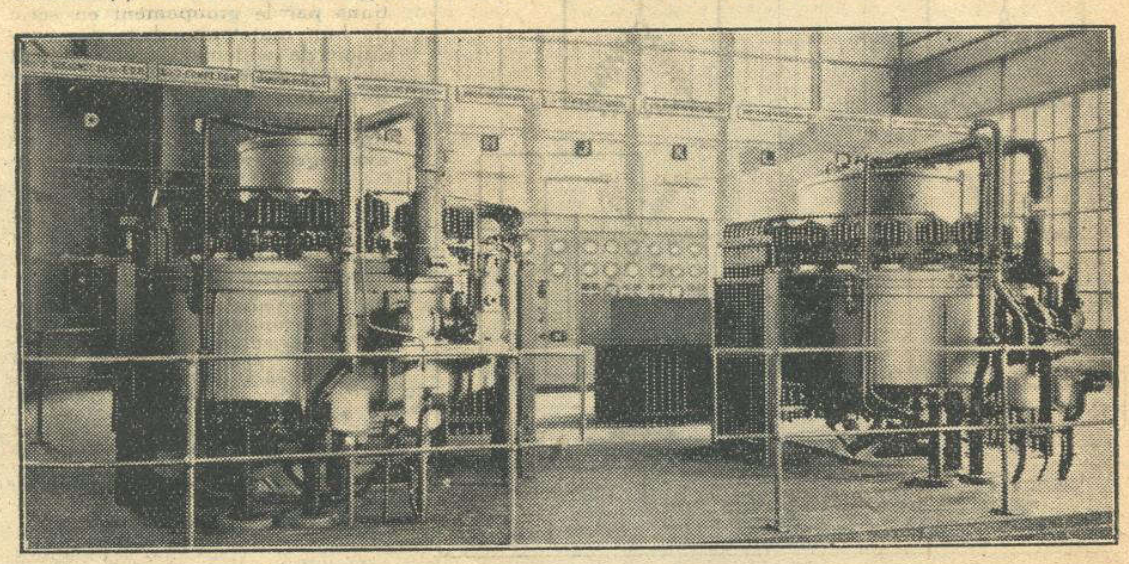


FIG. 14. — MUTATEURS A VAPEUR DE MERCURE (REDRESSEURS) ALIMENTANT UNE INSTALLATION DE LAMINOIRS

Ces appareils, système Brown-Boveri, débitent 10 000 ampères sous 500 volts. Leurs grilles polarisées permettent le réglage automatique de la tension et éventuellement l'extinction quasi instantanée de courts-circuits internes. Voir : « Comment fonctionnent les valves à gaz ionisé (Science et Vie, *n° 220, octobre 1935, p. 281). (Document Compagnie Electro-Mécanique.)*

importants en courant alternatif : or l'utilisation de câbles souterrains de transport d'énergie présenterait de grands avantages en matière de sécurité (suppression des perturbations atmosphériques).

Retenons seulement que la seule réduction de l'effet corona représente une diminution de 50 % de la section des conducteurs, à énergie transportée égale. Mais l'économie que ferait réa-

(1) Les câbles souterrains en courant alternatif haute tension sont restés jusqu'ici l'exception en raison de leur coût élevé : le réseau de la région parisienne possède le seul câble souterrain 220 000 V existant au monde, dont le développement est de 19 km.

En résumé, le nouvel échelon de tension de 400 000 volts semble devoir entrer dans un délai assez bref dans la voie des réalisations : les essais effectués par quelques constructeurs sur des appareillages 500 000 volts, ainsi que la construction sur pylônes 400 000 volts d'une nouvelle ligne 220 kilovolts en sont les signes avant-coureurs certains. Nul ne peut dire si le choix d'un échelon supérieur se posera un jour : il est probable que le courant continu serait alors indispensable pour atteindre des tensions de l'ordre d'un million de volts, qui restent encore du domaine du laboratoire.

Maurice ROUSSELIER.

Les conceptions les plus hardies, les spéculations les plus légitimes ne prennent un corps et une âme que le jour où elles sont consacrées par l'observation et par l'expérience. Laboratoire et découverte sont des termes corrélatifs. Prenez intérêt, je vous en conjure, à ces demeures sacrées que l'on désigne du nom expressif de laboratoire. Demandez qu'on les multiplie, et qu'on les orne : ce sont les temples de l'avenir, de la richesse et du bien-être. C'est là que l'humanité grandit, se fortifie et devient meilleure.

PASTEUR.

quer à qu
en est arriv

(1) Leur emploi dimi
ruptions de service.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LE FREIN DE BOUCHE ET LES PROGRÈS DE L'ARMEMENT DU CHAR ET DE L'AVION

par Camille ROUGERON

Inventé il y a trois quarts de siècle par le colonel Treuille de Beaulieu, le frein de bouche n'avait eu jusqu'en 1939 que des applications très limitées. Il est aujourd'hui l'accessoire indispensable des puissants matériels d'artillerie dont il aura permis le montage sur char, et qui pourraient aussi bien armer les avions, si la bombe-fusée n'était encore mieux adaptée à l'artillerie aérienne. Une fois de plus, la mobilité des matériels d'artillerie, si recherchée en temps de paix, aura été suivie par le relèvement de leur puissance, plus appréciée en temps de guerre. Le frein de bouche, qui permet de concilier légèreté et puissance, est assuré d'un avenir brillant sur terre, sur mer et dans les airs.

La fusée et le frein de bouche

DEUX innovations, si l'on ose s'exprimer ainsi en étudiant des progrès dont l'un est antérieur à l'invention de l'artillerie et dont l'autre a été proposé et mis au point il y a trois quarts de siècle, sont venues bouleverser entièrement l'armement terrestre, naval et aérien en cette fin de guerre : ce sont la fusée et le frein de bouche. Plus exactement, le succès des quelques applications qu'on en a fait a démontré l'inanité des objections que se transmettaient à leur sujet, de génération en génération, les spécialistes et les officiels d'à peu près tous les pays. Il ne reste donc aujourd'hui qu'à comprendre la portée du bouleversement et à l'étendre à l'ensemble des matériels de guerre. C'est là une œuvre de longue haleine. Tous les précédents en matière d'artillerie fixent à quelques dizaines d'années au moins la durée de cette généralisation. Qu'on réfléchisse au temps pris pour l'introduction du semi-automatisme ou de l'automatisme dans les armes de petit calibre, ou pour l'acceptation par l'artilleur du moteur à explosion en place du cheval.

La fusée étend son domaine depuis plusieurs années. Elle a permis d'atteindre des puissances difficilement croyables et qui laissent bien loin les timides débuts des « Bazooka » antichars américains, des «Nebelwerfer» allemands (1), des matériels de D.C.A. britanniques et des premières bombes-fusées des « Stormovik » soviétiques. Depuis plus d'un an, la bombe-fusée (2) est devenue l'arme principale de la chasse allemande contre les bombardiers lourds alliés; montée sur les chasseurs-bombardiers britanniques, elles est venue à bout des « Panzerdivisionen » de Normandie; les chasseurs du « Côastal Command » l'emploient avec le même succès contre les vedettes à moteur et les paquebots de 40 000 tonnes, tels que le *Rex*, incendié récemment en Haute-Adriatique. N'annonce-t-on pas qu'un chasseur monomoteur comme le « Typhoon », avec sa batterie de huit bombes-fusées sous les ailes, a une puissance de feu, mesurée en kilogrammètres à la bouche, qui atteint celle d'un croiseur léger portant le même nombre de pièces? Et l'on sait que la marine américaine a obtenu récemment les quelques dizaines de milliards de crédits qui doivent lui permettre la transformation de son matériel de bord par l'emploi du projectile-fusée.

L'extension du frein de bouche (1) aura été sensiblement plus lente. Pour ne mentionner que des applications françaises, on notera son emploi vers 1930, sur des matériels de D.C.A. Schneider de moyen calibre; son acceptation, en 1936, sur le canon Hispano de 20 mm qui devait armer les avions de chasse français, puis britanniques; sa mise en service sur l'un des matériels où il s'impose le plus évidemment, le canon antichar, avec la livraison en 1938 du 47 mm Schneider commandé par la Roumanie. Mais il faut bien reconnaître que le frein de bouche était encore, au début de la guerre, d'un usage tout à fait exceptionnel. Sa généralisation apparaît d'abord en Allemagne, où elle a permis l'énorme accroissement de puissance de feu sur les chars en service, sur les antichars ensuite. Très rapidement, on le retrouve en U.R.S.S. pour les mêmes applications, puis en Amérique et en Grande-Bretagne.

La puissance et la mobilité des matériels

Cette extension rapide de la fusée et du frein de bouche au cours de la guerre s'explique par une loi bien connue de l'évolution des armes, qui fait apprécier de préférence leur puissance en temps de guerre, et leur mobilité en temps de paix. Les marines et les aviations n'y échappent pas davantage que les armées.

La loi avait joué déjà lors de la précédente guerre et l'on avait maintenu, en gros, jusqu'en 1939, la puissance des matériels auxquels avait abouti la rapide évolution de 1914 à 1918. Les raisons ne manquent jamais pour justifier cette

(1) Voir : « La fusée, projectile de l'avenir » *(Science et Vie,* n° 315, novembre 1943, p. 195).

(2) Voir : « La bombe-fusée, arme nouvelle de 1942 » *(Science et Vie* n° 301, septembre 1942, p. 117).

(1) Voir : « L'architecture des bouches à feu » *(Science et Vie,* n° 221, novembre 1936, p. 372).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

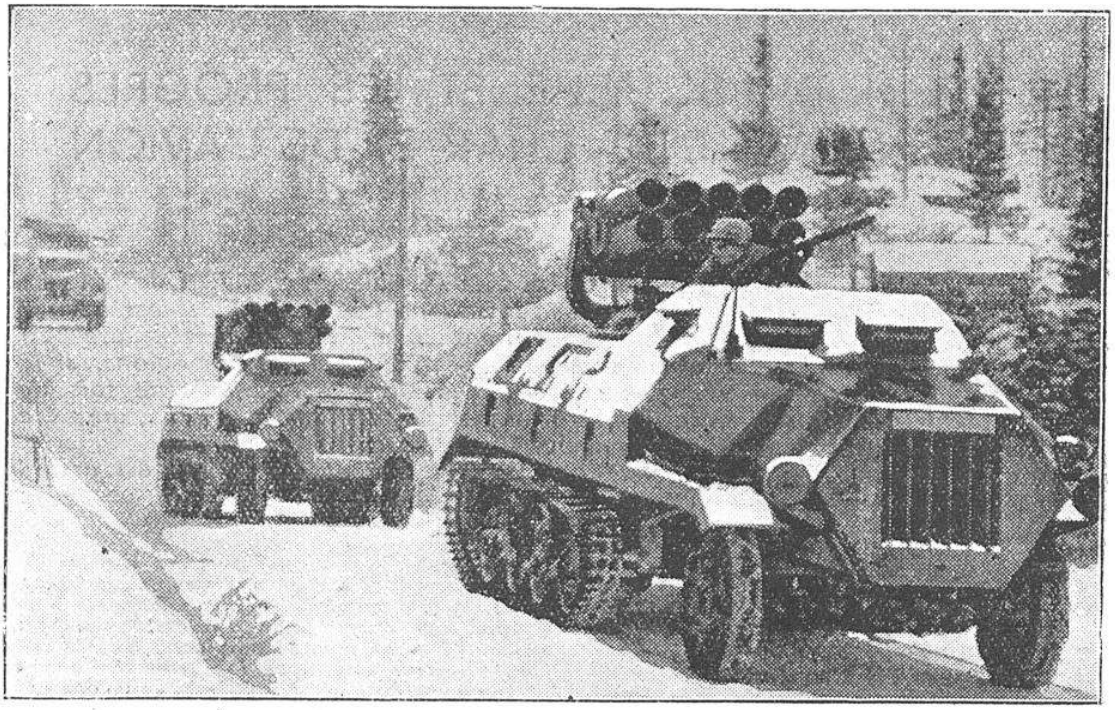


FIG. 1. — BATTERIES ALLEMANDES DE DIX TUBES LANCE-FUSÉES SUR AFFUTS MOTORISÉES

tradition conservatrice. Pourquoi relever le calibre d'une mitrailleuse d'infanterie, alors que son objectif, qui est l'homme non protégé, n'a pas changé? Pourquoi faire des canons de marine plus gros si l'on peut se mettre d'accord pour limiter les déplacements et s'assurer ainsi, indirectement, que le projectile n'aura pas à perforer de blindages plus épais? Pourquoi monter sur avion des mitrailleuses lourdes quand la mitrailleuse légère est très suffisante pour mettre l'homme hors de combat et le moteur hors de service?

Ce raisonnement néglige les motifs très sérieux qui poussent à l'augmentation des puissances et qui tiennent à la variation de facteurs souvent plus importants que la résistance propre à l'objectif au projectile.

La balle de mitrailleuse ne doit pas seulement tuer l'homme vers 1 000 à 1 500 m; il est utile qu'elle le fasse à toute distance et c'est là une qualité de la mitrailleuse légère tirant à son maximum de portée. Mais le relèvement de puissance a le même intérêt du point de vue balistique, et il n'est pas nécessaire de se pencher longuement sur le problème du tir lointain des mitrailleuses d'infanterie pour s'apercevoir que ses difficultés, et notamment la dispersion considérable de projectiles, proviennent de l'insuffisance du calibre que ne sauraient racheter les corrections les plus ingénieuses. Si l'on avait consacré à un relèvement de puissance une partie de l'économie de poids qu'on a su faire de 1914 à 1939 en améliorant la mitrailleuse légère ou le fusil-mitrailleur, on aurait eu une arme de 9 à 10 mm aussi avantageuse pour le tir contre objectif terrestre à 3 000 m que pour le tir contre avion à 750 m.

Conserver le calibre et la vitesse initiale des pièces de marine pour la raison que l'épaisseur des blindages n'a pas augmenté, c'était négliger la variation de toute une série de facteurs

FIG. 2. — L'ARMEMENT EN FUSÉES A RÉACTION DU CHASSEUR BRITANNIQUE HAWKER « TYPHOON »

On remarquera, au-dessus des appareils de lancement des fusées, les carénages des deux canons de 20 mm montés dans la demi-aile gauche de l'appareil (le Hawker « Typhoon » possède au total quatre canons Hispano de 20 mm; certaines versions emportent à la place douze mitrailleuses de 7,5 mm ou huit mitrailleuses de 12,7 mm).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui imposaient le relèvement de puissance : augmentation de vitesse de l'objectif due à l'allégement des appareils propulsifs, augmentation des distances de combat tenant aux progrès de la conduite du tir, de la télémétrie par radiodétection, de l'amplitude du pointage vertical simultanément réclamé par les objectifs aériens. Les manœuvres de dérobement qui étaient interdites aux navires de 1914-1918 à 23-28 nœuds dans le combat à limite de portée devenaient aisées pour des navires à 32-35 nœuds, dont la limite de portée a presque doublé. L'artillerie de plus gros calibre, et surtout avec la vitesse initiale plus grande et la trajectoire plus tendue, que n'interdisaient pas les accords de limitation navale, aurait eu alors une supériorité écrasante.

C'est exactement la même croissance des vitesses et des distances de l'objectif que l'on négligeait en artillerie de D.C.A. lorsqu'on se contentait de pièces de 1914-1918, ou de puissance peu différente, pour la raison que leur plafond pratique était encore supérieur à l'altitude de navigation de leur adversaire. Si l'on voulait maintenir l'efficacité de la D.C.A., les progrès en vitesse et en plafond de l'aviation imposaient en réalité un énorme relèvement de calibre et de vitesse initiale des pièces.

L'esprit de conservation va même jusqu'à justifier le retour à des matériels de puissance moindre, jugés entièrement satisfaisants autrefois et qu'un engouement irréfléchi pour la puissance de feu aurait seul fait abandonner. Ce n'est pas autrement que la marine britannique, par réaction contre les idées de Fisher, était revenue dès 1930 au calibre de 152 mm sur ses croiseurs type *Lander* et, en 1936, au 356 mm sur ses cuirassés type *King George V*, sans que les accords de limitation alors en vigueur lui en aient fait l'obligation. Le résultat ne s'est pas fait attendre. On a vu un croiseur léger australien coulé en quelques salves par un navire de commerce allemand où l'on n'avait pas cru devoir se limiter au 152 mm à 875 m/s. On a vu de même, pour la première fois dans l'histoire de la marine britannique depuis bien longtemps, le *Prince of Wales* et son artillerie de 356 mm contraint de rompre le combat devant un *Bismarck* de même déplacement, mais armé de pièces de 381 mm.

Il n'est pas d'usage de reprocher à l'armée allemande l'insuffisance de son armement de D.C.A. en 1939, pour des raisons qu'il n'est pas besoin de développer dans une publication française. Cependant, il faut bien remarquer que le 88 mm était une arme de puissance juste convenable contre les avions de 1918. Dès cette époque, l'artillerie allemande, au vu des remarquables résultats obtenus en Belgique par des 150 mm de marine montés à terre, avait mis à l'étude des calibres supérieurs au 88 mm. Peut être est-ce le maintien dans plusieurs armées étrangères de calibres encore inférieurs qui explique, sans le justifier, le retour au 88 mm en 1935. Là non plus le résultat de cette réaction ne s'est pas fait attendre. Le 88 mm allemand, comme les pièces de calibre voisin construites par les Alliés, s'est révélé absolument insuffisant dès les premiers mois de la guerre contre les bombardiers qui se donnaient la peine de naviguer à plus de 6 000 m et d'esquisser quelques manœuvres de dérobement. Combien de fois Goering s'est-il vu reprocher ses affirmations imprudentes sur les bombes alliées dont il s'était fait fort de préserver pour toujours l'Allemagne et qui n'en ont pas moins incendié son propre ministère ! Il n'avait eu que le tort de croire à la valeur du matériel choisi par des artilleurs qui n'aimaient pas la nouveauté et à leurs promesses.

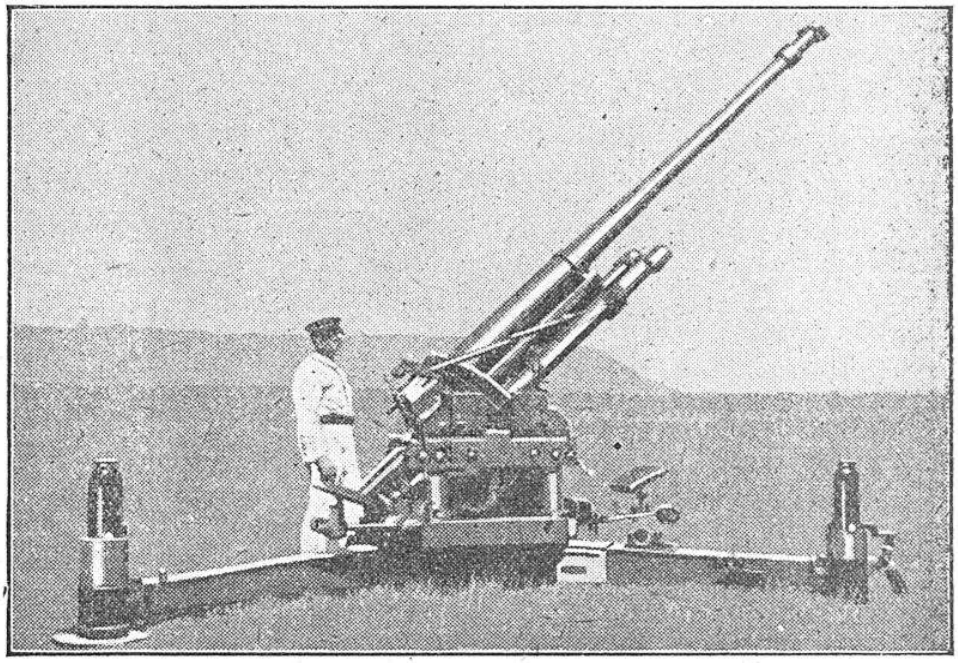


FIG. 3. — LE CANON DE D. C. A. SCHNEIDER DE 75 MM A FREIN DE BOUCHE (1)

Le progrès en puissance des armes de chars et des armes d'avions

De 1939 à 1944, la course à la puissance a repris un peu partout.

L'artillerie de campagne, qui n'était plus limitée comme jadis par la charge maximum d'un attelage en mauvais terrain, a remplacé en quelques années ses matériels par d'autres plus puissants. Mais c'est surtout l'emploi généralisé, soit contre les chars, soit contre les fortins bétonnés, soit même dans le tir contre

(1) Voir *Science et Vie*, n° 261, mars 1939.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le personnel à grande distance, des matériels de D.C.A. des calibres de 88 à 94 mm, à grande vitesse initiale, qui aura marqué l'étape principale de cette course à la puissance.

Les marines font exception à la règle. Cela peut s'expliquer par l'arrêt presque général des mises en chantier de grands bâtiments. Leurs programmes d'avant Pearl Harbor assuraient aux Etats-Unis une supériorité indiscutable. Les canons de 406 mm de leurs cuirassés, les 356 mm de leur supercroiseurs étaient déjà nettement plus puissants que ceux des navires similaires des Nations Unies. Ni celles-ci, ni les marines de l'Axe, n'entreprirent, au cours de la guerre, de constructions menaçant la suprématie américaine, et la plupart suspendirent même leurs constructions de navires de ligne. Rien ne justifiait donc une course au calibre et à la puissance de la grosse artillerie, et les progrès de l'armement naval se résument, au cours de la guerre, à un accroissement considérable de l'artillerie de défense contre avions rapprochés.

FIG. 4. — LE CHAR ALLEMAND « TIGRE » ET SON 75 MM A FREIN DE BOUCHE

Les progrès les plus marqués ont été faits dans le domaine de l'armement du char et de l'armement d'avion.

En 1939, des matériels de 12 à 18 tonnes, comme les chars français 1935 R et 1935 H, ou les chars allemands Mark III, portaient une pièce de 37 mm. Un char Somua était armé d'un 47 mm. Exceptionnellement, et après les leçons reçues en Espagne, un Mark IV recevait un 75 mm, ce qui lui valait de jouer un rôle décisif en 1939 et 1940. Toutes ces pièces étaient à vitesse initiale modérée.

L'évolution vers les puissances croissantes s'est faite avec une extrême rapidité. Elle a débuté, dès 1941, sur les chars allemands du front de Lybie; leur supériorité d'armement fut la cause principale des premiers échecs des blindés britanniques devant les « Panzerdivisionen » de Rommel, venant après les succès remarquables que Wavell avait remportés contre des chars italiens d'armement comparable aux siens. La même explication valait, quelques mois plus tard, pour la campagne de Russie. Dès 1942, le 37 mm des Mark III avait été remplacé successivement par un 50 mm, puis par le 75 mm court primitivement monté sur les Mark IV. Le Mark IV recevait de son côté un 88 mm court, puis un 75 mm long. L'aboutissement actuel est le « Tigre » allemand avec un 88 mm long, et le « Panther », qui porte, soit ce même 88 mm, soit un 75 mm exceptionnellement puissant, puisqu'on attribue au tube une longueur de 5,5 m, soit de 65 à 70 calibres pour la partie rayée. De telles pièces doivent atteindre près de 1 000 m/s. L'évolution dans le même sens s'est rapidement généralisée dans toutes les armées; c'est ainsi que les derniers chars britanniques entrés en service dérivent des anciens modèles par le montage de canons de 6 livres et 17 livres primitivement étudiés comme matériels antichars remorqués.

Le progrès de l'armement est aussi marqué sur les avions que sur les chars. La mitrailleuse lourde de calibre voisin de 13 mm a remplacé sur la plupart des appareils, notamment sur les chasseurs et bombardiers américains, la mitrailleuse légère de 7,5 à 8 mm. Le canon de 15 mm est apparu en Allemagne. Le canon de 20 mm, qui était exceptionnel en 1939, s'est généralisé; alors que la plupart des chasseurs monomoteurs n'en portaient qu'un au début de la guerre ,il est monté jusqu'au nombre de quatre sur les « Hurricane » et les « Spitfire ».

C'est dans les matériels destinés au tir contre objectifs terrestres ou navals que l'accroissement de puissance a été le plus grand. En s'en tenant au canon proprement dit, et laissant de côté la question de la bombe-fusée, il faut noter, dès le début de 1942, le remplacement du 20 mm par un calibre plus élevé sur les « Stormovik » soviétiques, et les remarquables succès qu'ils remportèrent contre les chars. Un peu plus tard apparaissaient les « Hurricane » II-D portant sous chaque aile un canon automatique antichar de 40 mm, qui furent un des principaux artisans des victoires britanniques au cours de la retraite de Rommel en Libye. En 1943, l'aviation américaine montait en fuselage de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

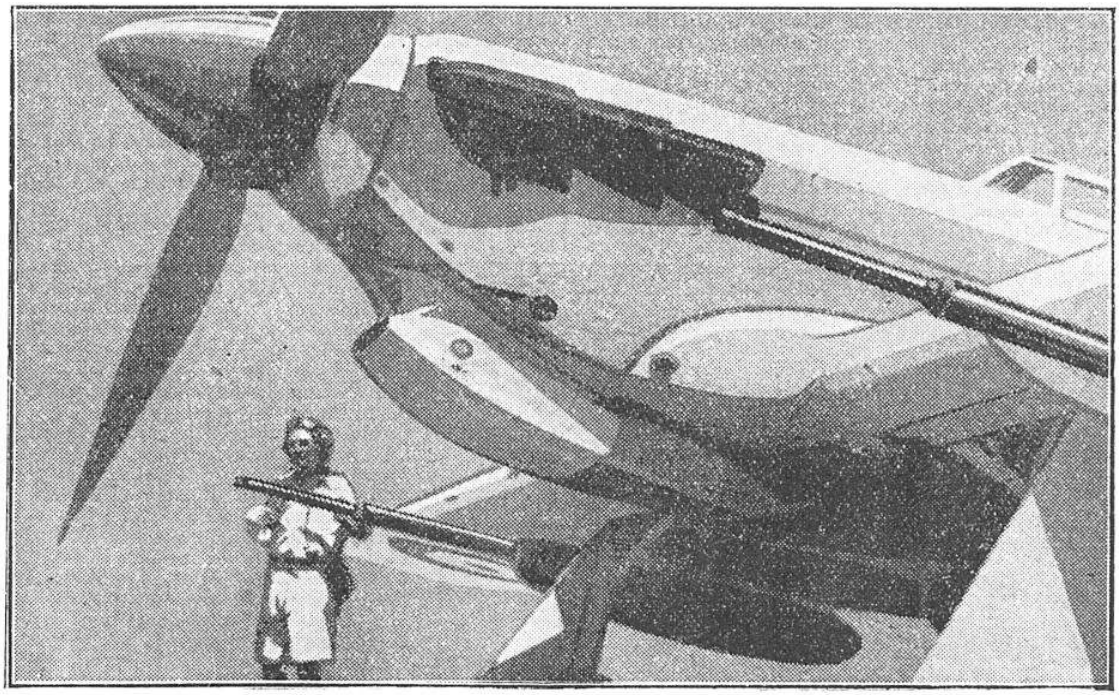


FIG. 5. — LE HAWKER « HURRICANE II C », DIT « TUE-CHARS », EST ÉQUIPÉ DE DEUX CANONS DE 40 MM
Ces armes sont installées sous l'aile et sont alimentées par des caisses à munitions abritées dans l'aile.

ses bimoteurs « Mitchell » un canon de 75 mm du modèle français de 1897, prélevé sur les stocks de l'armée de 1918; les « Mitchell » remportaient avec cet armement d'excellents résultats contre la navigation japonaise dans le Pacifique sud, en coulant au canon cargos, escorteurs et destroyers. Il est assez curieux de remarquer que, si la « Wehrmacht » a été longtemps en tête pour la puissance des armes de chars, la « Luftwaffe » a mis beaucoup plus longtemps à comprendre l'intérêt de cette puissance pour les canons d'avions destinés à la lutte contre objectifs terrestres ou navals. Ce n'est que récemment que sont apparus les canons de 37 mm antichars sur les « Stukas », qui préféraient jusqu'alors l'attaque à la bombe ordinaire, où disparut la plus grande partie des équipages allemands.

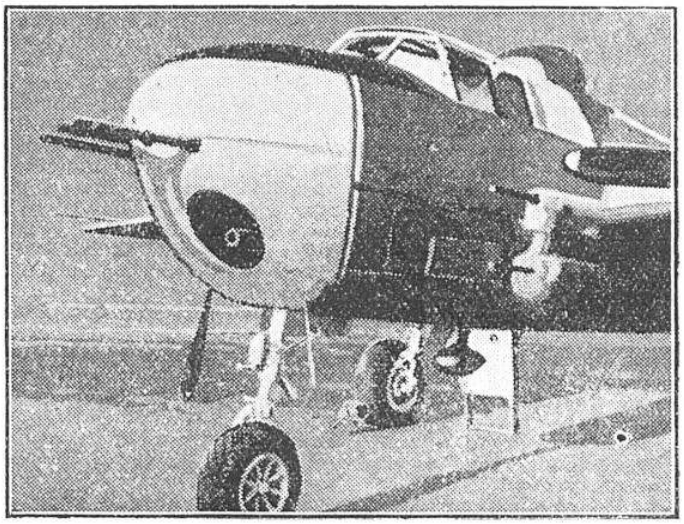


FIG. 6. — LA NOUVELLE VERSION DU BOMBARDIER BIMOTEUR AMÉRICAIN NORTH AMERICAN B-25 H « MITCHELL »
L'armement de cet avion de combat est particulièrement renforcé. Il ne comprend pas moins de quatorze mitrailleuses lourdes au total et un canon de 75 mm. On distingue ici les quatre mitrailleuses à l'avant du fusclage et les deux mitrailleuses bâbord accrochées à la paroi latérale du fuselage. Deux autres sont fixées à tribord, deux sont mobiles dans des meurtrières latérales, deux sont sous tourelle à la partie supérieure du fuselage et deux dans la queue. Cet appareil muni de ce type d'armement est surtout utilisé actuellement contre des objectifs navals dans le Pacifique.

Le frein de bouche

C'est la généralisation du frein de bouche qui explique, pour le char, l'emploi de pièces d'une puissance que nul n'aurait envisagée quelques années plus tôt. Malgré l'apparence, et bien que le frein de bouche ait été monté sur le canon de 20 mm, son intérêt était moindre sur avion, en raison de la différence de calibre des armes; il n'est vraiment indispensable que pour les plus puissantes d'entre elles. Mais, si on se décide à son emploi, comme on l'a d'ailleurs fait sur les canons de 37 mm des derniers « Stukas » allemands, on peut monter

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un 75 mm à 1 000 m/s sur n'importe quel bombardier bimoteur, tout aussi aisément que sur un char « Panther ».

Le frein de bouche est une invention incontestablement française, faite, il y a trois quarts de siècle, par le colonel Treuille de Beaulieu.

Le tube d'un canon, supposé libre, est projeté vers l'arrière par la pression, sur la culasse, des gaz de la poudre, en même temps que cette pression lance le projectile vers la bouche. Si l'on ne porte attention qu'au projectile sortant

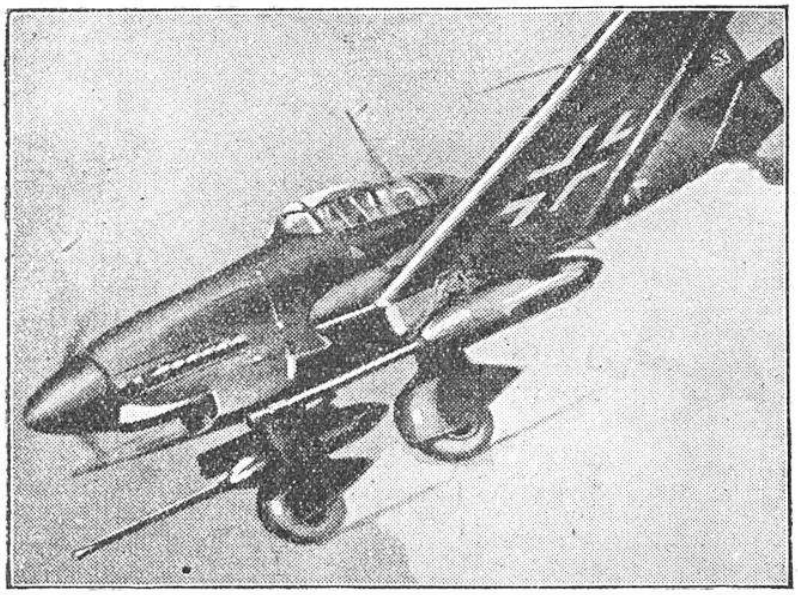


FIG. 7. — LE « STUKA » JUNKERS 87 ÉQUIPÉ EN « TUE-CHARS » AVEC DEUX CANONS DE 37 MM

de la bouche, le théorème des quantités de mouvement nous apprend que la vitesse imprimée au projectile et la vitesse prise par le tube au cours de ce recul libre sont en raison inverse des masses respectives. Si on fait l'expérience, par exemple, en montant le tube sur une escarpolette dont l'élévation mesurera la vitesse de recul, on trouve que cette vitesse est notablement supérieure à ce qu'indique cette théorie simple. C'est qu'il sort, de la bouche du tube, autre chose que le projectile; ce sont les gaz de la poudre, lancés, dans le même sens, à une vitesse plus grande. Ils doivent intervenir dans le calcul de la vitesse de recul.

L'expérience montre que tout se passe sensiblement comme si la charge avait, à poids égal, un effet deux fois et demi plus grand que le projectile. Ce qui revient à admettre que la vitesse moyenne des gaz de la poudre, décroissante à mesure que le tube se vide, est deux fois et demi celle du projectile. Sur un canon où le poids de poudre est 10 % du poids du projectile, proportion correspondant à une vitesse initiale d'environ 550 m/s, la vitesse de recul est majorée de 25 % par l'effet de projection des gaz. Ce résultat est évidemment trop simple pour tenir compte de tous les facteurs qui régissent le phénomène; l'effet réel des gaz sur le recul dépend de la pression à la bouche, de la longueur de la pièce en calibres, de la nature de la poudre..., tous facteurs dont l'intervention ne saurait être résumée dans le seul coefficient 2,5. Mais cette formule simplifiée, utilisée entre autres dans l'artillerie française, n'en est pas moins largement suffisant pour une théorie approchée du frein de bouche.

L'idée de Treuille de Beaulieu fut de placer à la bouche des aubages redresseurs, ayant pour effet de renverser la vitesse de la plus grande partie des gaz en les dirigeant vers l'arrière. L'effet de ces aubages est facile à évaluer d'une manière approchée, si l'on admet que tous les gaz sont rejetés vers l'arrière, et que le rendement des aubages est l'unité, c'est-à-dire que la vitesse des gaz vers l'arrière est la même que celle qu'ils prendraient au cours de leur détente vers l'avant. Dans l'exemple choisi, où le poids de poudre est 10 % du poids du projectile, l'effet de rejet des gaz vers l'arrière est de diminuer de 25 %, au lieu de l'augmenter de 25 %, la vitesse de recul que le tube prendrait en ne tenant compte que du projectile. Cette réduction, dans le rapport de 0,75 à 1,25, est de 40 %. L'effet sur l'énergie de la masse reculante, où la vitesse intervient par son carré, est plus grand encore. Dans l'exemple choisi, elle serait réduite de 64 % de sa valeur sans frein de bouche. Dans la pratique, le rendement n'est pas l'unité et l'effet de freinage est assez inférieur à ce qu'indiquent les chiffres précédents; il n'en reste pas moins considérable, même pour les pièces à vitesse initiale modérée.

La théorie précédente explique immédiatement l'intérêt croissant du frein de bouche à mesure qu'on l'applique à des canons de plus grande vitesse initiale.

Tirons, dans un même tube, un même projectile à des vitesses croissantes, en supposant le tube largement dimensionné pour les vitesses les plus faibles, de manière qu'il puisse supporter la pression exigée par les vitesses les plus fortes. Le poids de poudre nécessaire varie à peu près comme le carré de la vitesse, ce qui suppose simplement constant le rendement thermique du canon. S'il faut, en poudre, 10 % du poids du projectile pour un canon tirant à 550 m/s, 3 % suffisent pour un obusier tirant à 300 m/s; 25 % seront nécessaires sur une pièce de marine tirant à 870 m/s, et 33 % sur une arme de char ou antichar à laquelle on demanderait 1 000 m/s. L'effet du frein de bouche étant lié au poids de poudre, il est insignifiant pour l'obusier et devient très important, relativement, pour la pièce à très grande vitesse initiale.

Si on examine de plus près le fonctionnement de la pièce à grande vitesse initiale, on s'explique aisément cette conclusion en apparence paradoxale que les réactions de ces pièces ne sont pas beaucoup plus grandes que celles des pièces à faible vitesse initiale, et que, par suite, l'effet croissant du frein de bouche, lorsqu'on l'emploie, permet aisément de réduire cette réaction à une valeur très faible ou même nulle.

On sait bien que, dans la pratique, on ne s'avise pas de tirer, comme nous venons de le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

suposer, à des vitesses très différentes dans un même tube. Plus la vitesse initiale est grande, et plus le tube est lourd. Ceci ne change rien au poids de poudre nécessaire, mais le poids du projectile devient une fraction d'autant plus faible du poids du tube que la vitesse est plus élevée. Si le taux de travail du métal est fixe, et si la masse reculante se réduit à celle du tube, ou lui est proportionnelle, on peut admettre que le rapport de la masse reculante à celle du projectile varie comme le carré de la vitesse initiale. L'énergie de la masse reculante, et par suite la réaction de

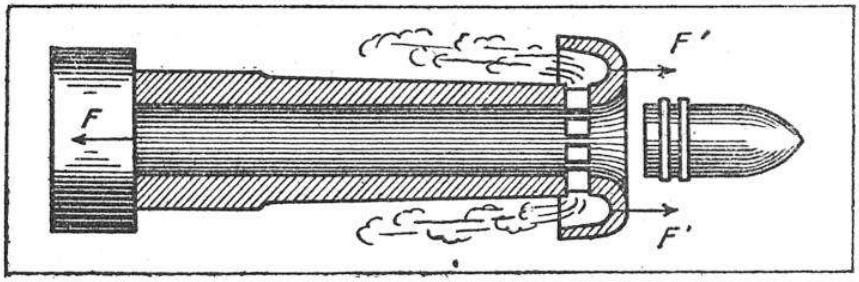


FIG. 9. — PRINCIPE DU FREIN DE BOUCHE

Si l'on perce au voisinage de la bouche des orifices qui permettent l'éjection de la plus grande partie des gaz avant que le projectile soit entièrement sorti, et que l'on ajoute un aubage redresseur renvoyant ces gaz vers l'arrière, la « quantité de mouvement » du tube reculant (voir légende de la figure 8) devient la différence de la quantité de mouvement du projectile et de celle des gaz, au lieu d'être leur somme. Si l'on admet que la vitesse moyenne des gaz est 2,5 fois celle du projectile et que tous les gaz sont rejetés vers l'arrière, la vitesse de recul s'annulerait pour une charge de poudre égale à 40 % du poids du projectile. La vitesse du projectile serait alors de 1 100 à 1 200 m/s. Pour les vitesses inférieures, l'effet de freinage du frein de bouche réduit simplement la puissance exigée du frein hydraulique. Si l'on veut s'expliquer le fonctionnement du frein de bouche, non plus par les quantités de mouvement, mais par les forces exercées sur le tube, il faut considérer celui-ci comme soumis aux deux impulsions successives F et F' produites, sur la culasse, par la pression statique des gaz de la poudre, et, sur les aubages redresseurs, par leur pression dynamique. Cette présentation justifie en particulier la résistance nécessaire au frein de bouche, qui doit supporter des efforts du même ordre que la culasse.

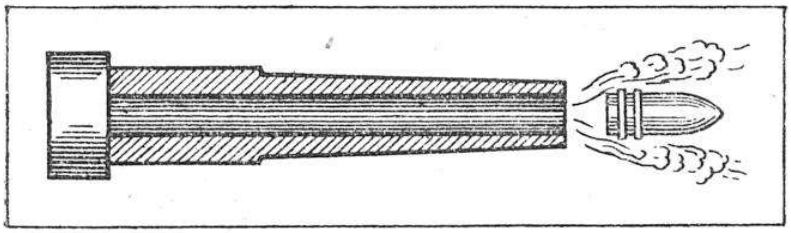


FIG. 8. — RECUL D'UN TUBE LIBRE

Tant que le projectile n'est pas sorti de la bouche, les gaz de la poudre exercent le même effort sur le culot du projectile et sur la face avant de la culasse. Sous l'action de cet effort commun, le projectile et le tube, supposé libre de toute attache, prennent des vitesses inversement proportionnelles à leurs masses. C'est ce que l'on exprime, sous une autre forme, en disant que les quantités de mouvement (produit de la masse par la vitesse) du tube et du projectile sont à chaque instant égales et opposées. A la sortie du projectile, la pression restante continue à projeter les gaz vers l'avant en même temps que le tube vers l'arrière. La même relation subsiste entre les quantités de mouvement, à condition d'ajouter à celle du projectile celle des gaz de la poudre (il aurait fallu, en toute rigueur, en tenir compte même quand ils étaient enfermés dans le tube) (1). *L'expérience montre que la vitesse des gaz de la poudre peut être prise, sans trop d'erreur, égale à deux fois et demie la vitesse du projectile. Il est possible ainsi de calculer la vitesse de recul du tube, connaissant sa masse, celle du projectile, celle de la poudre, et la vitesse du projectile. Par exemple, un tube de 75 mm pesant 600 kg, lançant un projectile de 6 kg, avec 600 g de poudre, à la vitesse de 550 m/s, prendrait une vitesse de recul de 6.88 m/s. L'énergie correspondant à cette vitesse de recul est absorbée dans le frein hydraulique. Le recul du tube, sous l'effet de la vitesse imprimée au projectile et aux gaz, a exactement la même cause que la projection vers l'avant d'un corps de fusée sous l'effet des gaz expulsés à grande vitesse vers l'arrière.*

l'affût sur ses supports, s'il absorbe cette énergie dans un frein de course constante, reste elle-même constante. La conclusion est surtout exacte pour les faibles vitesses, car elle ne tient pas compte de l'effet des gaz de la poudre sur le recul; elle n'est pas très éloignée de la réalité pour les grandes vitesses, car le poids du tube, qui devient en général de plus en plus épais, croît plus vite que la puissance à la bouche.

La conclusion, d'apparence paradoxale, est que l'énergie de recul, ou la réaction, des pièces dépend du calibre ou du poids du projectile, mais pas sensiblement de la vitesse initiale. C'est un fait que l'expérience confirme entièrement. Que d'ennuis n'a-t-on pas eus en marine lorsqu'on a voulu installer sur des ponts légers de chalutiers des mortiers lançant des grenades contre sous-marins à quelques centaines de mètres du bordé? C'est qu'ils imposaient à la charpente des réactions du même ordre qu'un canon de 210 mm tirant un projectile de même poids, qu'on se serait bien gardé de monter sur un chalutier sans consolidations largement calculées.

Les raisonnements précédents ne sont d'ailleurs pas nécessaires pour montrer que le frein de bouche permet d'annuler le recul et la réaction des pièces à très grande vitesse initiale. C'est la conséquence directe de l'hypothèse faite sur la vitesse moyenne des gaz de la poudre. Si elle est, comme nous l'avons supposé, deux fois et demi plus grande que celle du projectile, il suffit d'éjecter, vers l'arrière, un poids de poudre re-

(1) Si M_1, M_2 et M_3 sont les masses respectives du tube, du projectile et de la poudre, V_1, V_2 et V_3 leurs vitesses (vitesse moyenne dans le cas des gaz de la poudre), cette relation entre les quantités de mouvement s'écrit :

$$M_1 V_1 = M_2 V_2 + M_3 V_3$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

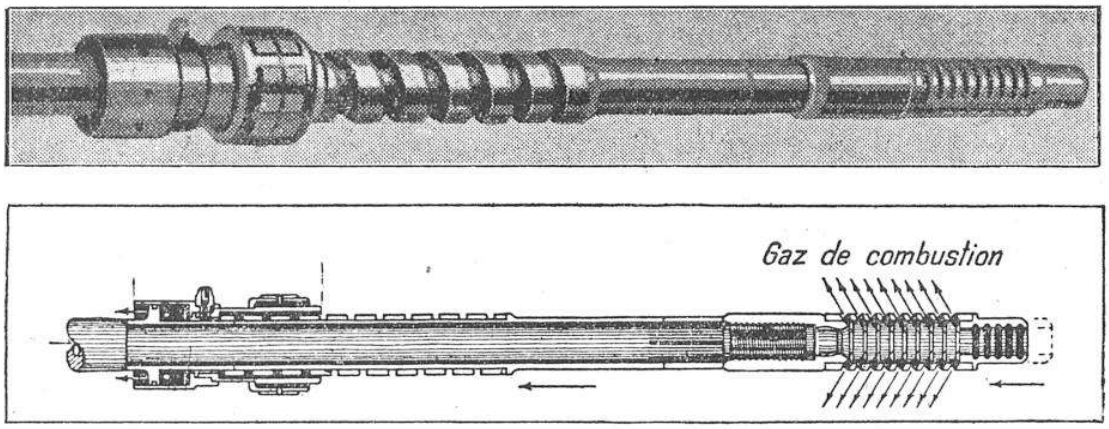


FIG. 10. — VUE ET COUPE DU FREIN DE BOUCHE DU CANON HISPANO DE 20 MM (POSITION DE RECUL)

On notera, sur ce frein, employé dans les aviations française, britannique, américaine..., les dispositions prises pour assurer le rejet vers l'arrière de la presque totalité des gaz : longueur du frein et multiplicité des orifices d'échappement, diamètre intérieur élevé du frein laissant un grand espace disponible pour le passage des gaz autour du projectile, obturation de l'orifice avant par le projectile lorsqu'il se déplace à l'intérieur du frein, emploi d'une boite d'étanchéité à détentes multiples sur l'avant de frein pour compléter l'obturation. Mais on remarquera un moindre souci du rejet des gaz dans la direction de l'axe, qui doit influer notablement sur le rendement.

présentant 40 % du poids du projectile lancé vers l'avant pour que le tube reste immobile ; cette proportion correspond à des vitesses d'environ 1 100 m/s. Aux vitesses plus grandes, le tube serait lancé dans le même sens que le projectile.

En fait, on arrive même à annuler le recul pour des vitesses moindres, à condition d'employer un excès d'une poudre plus lente que celle qui convient aux conditions normales du tir. La pression à la bouche est relevée ; la vitesse des gaz projetés vers l'arrière est accrue, en même temps que leur masse. L'expérience, faite sur une arme de 13,2 mm à frein de bouche de bon rendement tirant à 900 m/s environ, et simplement posée sur une table, montre que suivant la quantité et l'indice de la poudre dont on charge la cartouche réglementaire, on peut obtenir à volonté un lancer vers l'arrière ou vers l'avant.

On trouvera peut-être peu économique d'employer un excès de poudre, uniquement pour en lancer davantage, et à plus grande vitesse, sur l'arrière. Ce n'est pas un gaspillage très grave pour certaines applications, comme l'avion, le char, le canon antichar, si l'on tient compte du nombre de coups qu'ils ont l'occasion de tirer avant destruction. Dans les autres cas, les artilleurs économes emploieront avantageusement des poudres à faible chaleur de combustion, qui leur donneront la même vitesse de projectile avec un poids de poudre et un effet de freinage plus élevé. En ce sens, les poudres récentes à la nitroglycérine conviennent moins bien que les poudres B, elles-mêmes inférieures à la poudre noire. On ne reviendra certainement pas à la poudre noire des premiers essais de Treuille de Beaulieu pour le seul bénéfice du frein de bouche. Mais on pourrait parfaitement employer à cet usage des poudres sans dissolvant à faible teneur de nitroglycérine et forte teneur de matières inertes à usages variés (vaseline, produits anticuivrants, produits antilueurs...). On y trouverait l'avantage supplémentaire, non négligeable, de ne pas user inutilement les tubes par des poudres à forte température de combustion.

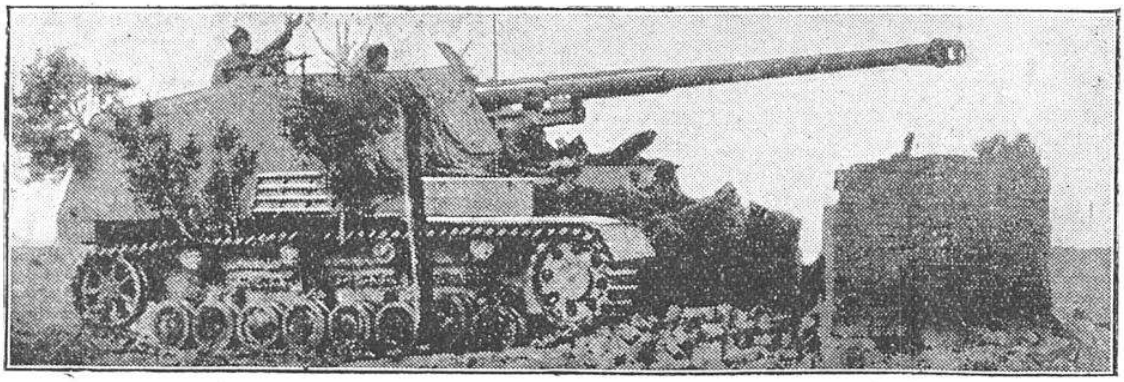


FIG. 11. —UN CHASSEUR DE CHARS ALLEMAND, CONSISTANT EN UNE PIÈCE DE 152 MM A FREIN DE BOUCHE SUR AFFUT MÉCANISÉ

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La stabilité et la résistance de la charpente

La réaction que le tube transmet par le frein ordinaire à l'affût, et de là aux supports de cet affût, est gênante pour deux raisons. Elle pose à la fois un problème de stabilité de la pièce et de résistance mécanique de l'affût et de ses supports. Le frein de bouche, en diminuant ou même annulant la vitesse et l'énergie du recul, simplifie l'un et l'autre problèmes. Mais il n'est pas inutile de montrer comment la question de la stabilité se pose de manière toute différente à terre d'une part, sur char ou sur avion de l'autre, pour expliquer que, même sans frein de bouche, l'affût de char ou d'avion est de toute façon beaucoup moins lourd que l'affût terrestre.

Dans le tir sous angle faible, la réaction tend à soulever la pièce. L'effet est en général d'autant plus grand que l'angle de tir est moindre; il est maximum pour le tir sous angle négatif, lorsqu'on exige cette condition de l'affût. Le soulèvement, lorsqu'il se produit, est considéré comme inadmissible, ne serait-ce que parce qu'il dépointe la pièce entre deux coups; on dit alors que la pièce manque de « stabilité ». On y remédie soit en alourdissant l'affût, dont le poids résistera à l'effort de soulèvement transmis par le frein, soit en augmentant la course du frein, ce qui réduit dans le même rapport l'effort de soulèvement qu'il exerce sur l'affût.

Or, ce problème de stabilité ne se pose que parce qu'on ne peut pas s'accrocher au sol. Un affût « crinoline » de marine, qui n'est autre qu'un tronc de cône en tôlerie boulonné sur le pont, peut être sans inconvénient beaucoup plus léger qu'un affût terrestre. C'est qu'il intéresse à l'effort de soulèvement la charpente du pont et le navire entier. Le même affût crinoline, boulonné sur une charpente de camion, peut encore fort bien convenir; il fait participer le poids du camion à la stabilité. Ce n'est pas autrement que s'expliquent les résultats satisfaisants de la mitrailleuse de 12,7 mm montée sur une « Jeep » (1) à l'aide d'un simple tube support extra-léger; il suffit pour faire intervenir le poids de la « Jeep » dans la stabilité de l'arme... Il semble qu'on ait fréquemment perdu de vue cet aspect de la question dans les critiques que l'on opposait aux projets de mécanisation générale de l'artillerie. On ne passe pas d'un type à l'autre en posant l'affût pour transport hippomobile sur un véhicule automoteur et l'entourant d'un blindage. La charpente du véhicule, son moteur, son blindage sont des éléments essentiels de la stabilité de l'affût, et, si légère que soit la charpente d'un avion, la même remarque doit être faite pour l'artillerie aérienne.

La résistance exigée de la charpente support d'affût est souvent l'objet d'appréciations aussi erronées. Elles expliquent l'étonnement que certains manifestent à voir monter une pièce puissante sur un char léger et, bien mieux, sur la charpente encore plus légère d'un avion. A l'époque où l'on prétendit installer les premiers canons de 20 mm dans les ailes d'un avion de chasse, on se demandait avec inquiétude si elles n'allaient pas se rompre sous la réaction du tir. On accepte fort bien aujourd'hui les canons de 40 mm d'un « Hurricane » au même emplacement.

La réaction exercée par une arme sur son support ne peut être définie simplement, ni par la pression des gaz sur la culasse lorsqu'il

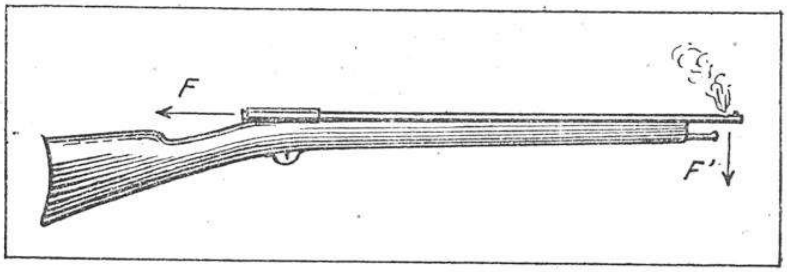


FIG. 13. — APPLICATION DU FREIN DE BOUCHE AUX ARMES PORTATIVES

L'une des applications les plus intéressantes du frein de bouche aux armes portatives est leur stabilisation au tir. Pendant le trajet du projectile dans l'âme, l'extrémité du canon se relève; cela tient à ce que la pression F des gaz sur la culasse, située au-dessus de l'appui de la crosse sur l'épaule, produit un mouvement de basculement. Si l'on perce sur le dessus du canon, vers son extrémité, quelques trous laissant échapper vers le haut une fraction des gaz de la poudre avant que le projectile ait quitté la bouche, ces gaz exercent, par réaction, une force F' dirigée vers le bas, qui tend donc à abaisser l'extrémité du canon. On notera que l'effet de stabilisation peut être total, même pour des armes à faible vitesse initiale. En raison de la différence des bras de levier des forces F et F' par rapport à l'épaule du tireur, il suffit que la seconde soit une fraction faible de la première pour en annuler l'effet de relèvement.

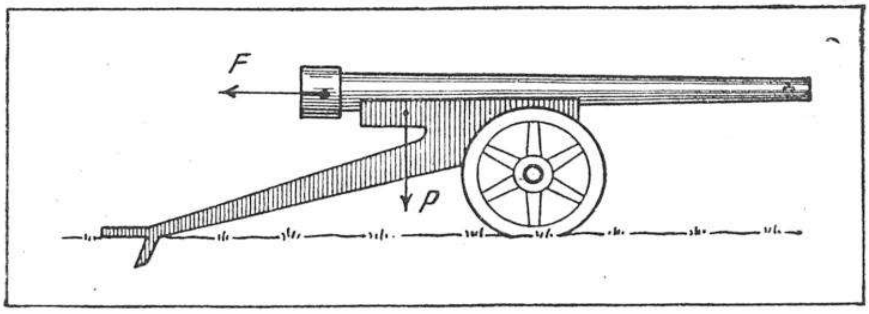


FIG. 12. — LA STABILITÉ DE L'AFFUT AU TIR

L'affût est soumis, au tir, à son poids P, qui tend à l'asseoir sur le sol, et à l'action F de la masse reculante sur la tige de frein, qui tend à soulever l'affût. La stabilité devient insuffisante si la force F est trop grande (longueur de recul trop faible) ou le poids P trop petit (affût exagérément allégé). C'est principalement en réduisant l'effort de freinage exigé du frein hydraulique, pour une course donnée de celui-ci, que le frein de bouche permet l'allégement de l'affût.

(1) Les voitures de reconnaissance appelées « Jeep » pèsent, en ordre de marche, 1 040 kg.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

n'y a pas de frein, ni par la force que supporte la tige de frein lorsqu'il y en a un. L'effet sur le support dépend essentiellement de son élasticité, qui l'aide à supporter des efforts dont on ferait une évaluation des plus incorrectes en les calculant comme si tous les éléments qui les transmettent étaient rigides. Sur le demi-centimètre carré de culasse d'un fusil de 8 mm, une pression de 2 500 kg/cm² exerce une force de 1 250 kg. Va-t-on prétendre que le fantassin qui le tire à l'épaule supporte cet effort et qu'il faut le consolider en l'appuyant sur un arbre ou sur un mur? Le premier résultat serait de lui démettre l'épaule, quand tout se passe très bien si l'on tire sans s'inquiéter de rien. On casse de même autant de crosses de fusil que l'on veut si on les fait reposer sur appui rigide.

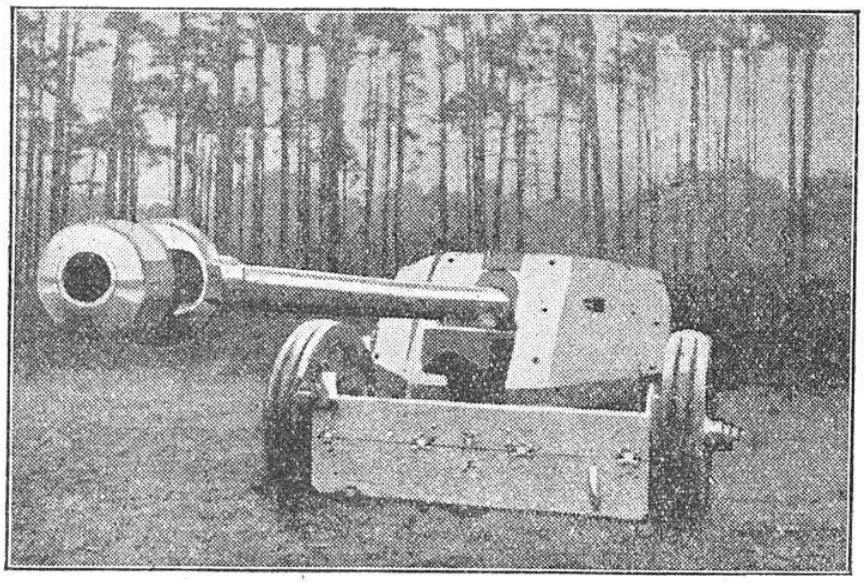


FIG. 14. — LE CANON ANTICHAR ALLEMAND A FREIN DE BOUCHE

En réalité, la résistance d'une charpente à la réaction d'une arme est au moins autant fonction des périodes de vibration des éléments successifs auxquels se transmet l'effort que de leur résistance propre sous un effort statique. C'est ce qui sauve aussi bien les épaules des fantassins que les ponts de chalutiers sur lesquels on monte des mortiers lance-grenades, du moins tant qu'on ne renforce ni les unes ni les autres. On s'explique de même que la tôle légère de plancher d'une « Jeep » résiste très bien aux 3 500 à 4 000 kg de réaction théorique d'une mitrailleuse de 12,7 mm et que les chars ou les avions puissent porter, même sans frein de bouche, des armes qu'on hésitait autrefois à leur donner.

Mais cette conclusion n'enlève rien aux mérites du frein de bouche quand il permet de réduire des trois quarts ou des neuf dixièmes l'énergie de recul d'un matériel.

Le passé et l'avenir du frein de bouche

« Loin d'être accueillies favorablement par les membres du Comité d'artillerie à qui M. Treuille adresse un mémoire explicatif en 1842, écrit le Grand Larousse dans l'article qu'il consacre au général Treuille de Beaulieu, les idées réformatrices du jeune capitaine vinrent se buter contre l'esprit de routine des gens du métier. Traité d'esprit chimérique, mal noté dans les bureaux, il vit son avenir compromis, son avancement arrêté et dut, pour se faire oublier, quitter au bout de quatre ans Châtellerault pour reprendre du service dans un régiment. Son mérite toutefois finit par s'imposer... »

Les « idées réformatrices » de l'inventeur étaient simplement, en 1842, le tube rayé et le chargement par la culasse. Le lecteur qui serait curieux de savoir par quel détour le mérite de Treuille de Beaulieu « finit par s'imposer » peut se reporter à la fin de l'article : ce fut par la voie de l'artillerie prussienne. Ce n'est pas d'une manière sensiblement différente, mais un siècle plus tard, qu'il aura réussi à faire admettre le frein de bouche.

Lorsqu'on avait exposé aux futurs artilleurs le principe du frein de bouche et rendu à l'inventeur de cet ingénieux dispositif l'hommage qu'il méritait, il fallait bien leur expliquer pourquoi cette idée séduisante n'avait eu jusqu'alors, et ne pouvait avoir, aucune application pratique. On se passait sur la question, d'un professeur ou d'un chef de service à l'autre, quelques arguments dont l'expérience de cette guerre aura montré l'inanité.

Pourquoi, disait-on, emprunter à l'énergie des gaz de la poudre le travail nécessaire à l'arrêt d'une masse reculante quand un frein hydraulique le fait tout aussi bien? Il régnait quelque vague idée que ce travail n'était pas absolument gratuit. Certains, qui tenaient à préciser leurs critiques, ne manquaient pas d'observer qu'à longueur donnée du tube, on perdait en vitesse initiale à lâcher ainsi les gaz vers l'arrière un peu avant que le culot du projectile soit sorti. Comme la longueur hors tout d'un canon n'est généralement pas une donnée impérative du programme, on pouvait répondre qu'en ajoutant le frein de bouche au delà de l'extrémité d'un tube de longueur donnée, au lieu de le prélever sur cette longueur, on augmentait la vitesse initiale bien loin de la diminuer, et l'expérience vérifiait cette conclusion.

Mais l'objection principale était le rejet des gaz chauds vers l'arrière, sur les servants de la pièce. Pouvait on admettre que le personnel eût à supporter des gaz sortant de la bouche à 800 ou 1 000° C, peut-être même toxiques? Nous ne sommes pas très sûrs que, dans la plupart des cas, l'effet des gaz brûlants à leur sortie de la bouche ait dépassé celui d'une bouffée de sirocco lorsqu'ils parvenaient aux servants.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais, de toute façon, l'objection ne portait pas dans quantité d'applications où le personnel était abrité pour d'autres raisons, de la tourelle marine à la pièce de char, du canon d'aile au canon en fuselage. Avec les quelques centaines de kilogrammes que l'emploi du frein de bouche permettait de transférer de l'affût à un blindage protégeant aussi bien le personnel contre les gaz chauds et contre les éclats et les balles beaucoup plus dangereux, on eût cuté depuis longtemps, continueront évidemment à l'employer. Mais il ne faudra peut-être pas attendre beaucoup pour le voir envahir jusqu'à la mitraillette du fantassin.

Le frein de bouche est destiné à bouleverser l'armement naval au même titre que la fusée. Il n'est pas de croiseur à flot dont la cuirasse de ceinture résisterait au 75 mm d'un char « Panther » si on montait cette pièce sur une vedette.

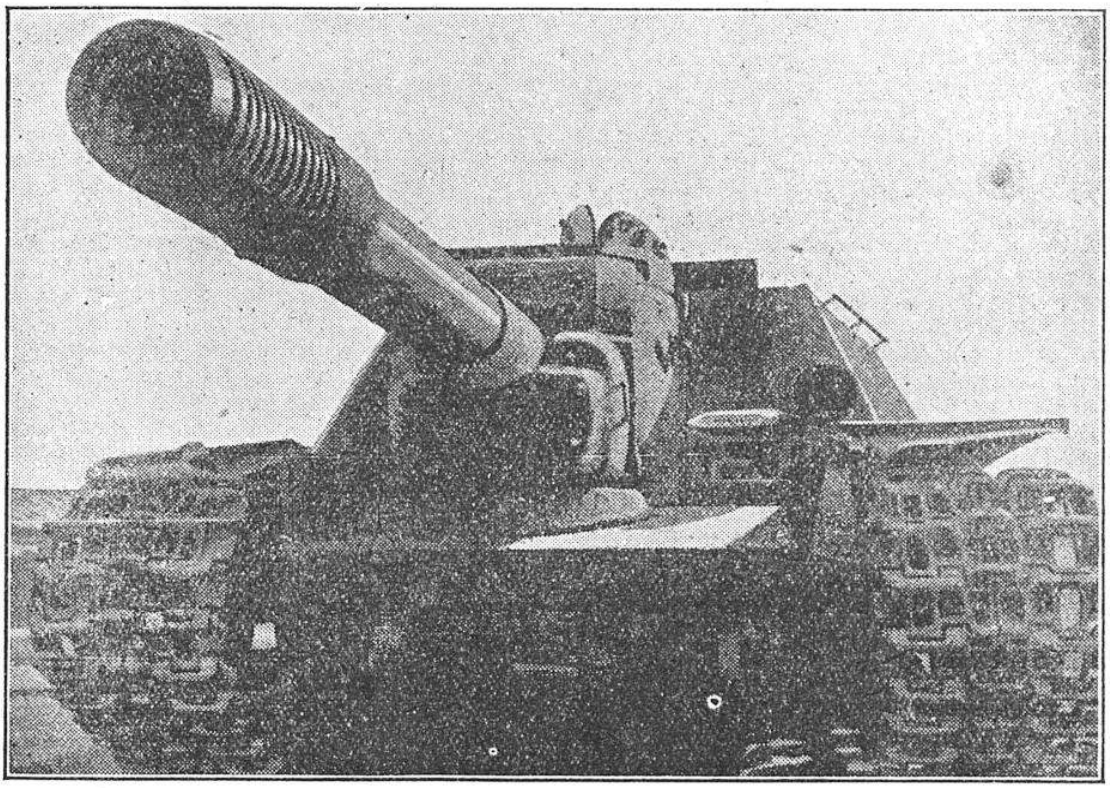


FIG. 15. — CANON D'ASSAUT ET CHASSEUR DE CHARS RUSSE CONSISTANT EN UNE PIÈCE DE 152 MM^a A FREIN DE BOUCHE SUR LE CHASSIS D'UN CHAR TYPE KW I

réalisé la première artillerie de campagne qui ne fût pas complètement inutilisable en face d'un avion d'assaut.

L'avenir du frein de bouche est aussi brillant que son acceptation aura été lente. Avec la fusée, il se partagera l'artillerie de demain.

Tous les matériels terrestres qui n'emploieront pas le projectile-fusée sortant à faible vitesse d'un canon et la complétant sur sa trajectoire devront comporter le frein de bouche. Le matériel à fins multiples du type du 88 mm allemand de D.C.A., qui peut aussi bien tirer contre avion éloigné et contre un char ou une embrasure de fortin, ne se concevra plus sans le frein de bouche qui est la condition essentielle de sa légèreté. Le char et le « tank-destroyer », où le frein de bouche n'est plus dis-

L'aviation, qui accepta le frein de bouche sur le premier canon construit spécialement pour elle, était en fait l'arme qui pouvait le plus aisément s'en passer, tant qu'elle s'en tenait aux petits calibres. Dans toute la gamme des matériels aériens destinés à l'attaque des objectifs terrestres ou navals, et qui vont au moins du 37 au 60 mm, le frein de bouche est un accessoire essentiel du canon d'avion lorsqu'on fera appel à celui-ci. Mais c'est probablement en aviation que le canon tirant un projectile ordinaire sera le plus fortement concurrencé par la bombe-fusée, ou mieux le canon à très faible vitesse initiale tirant un projectile-fusée.

Camille ROUGERON.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

COMMENT SE DÉVELOPPE L'ÊTRE VIVANT ?

par A. VANDEL
Professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse

« La vie est créatrice des formes », a dit le grand embryologiste belge Brachet. C'est la raison pour laquelle la forme restera toujours, pour le biologiste, l'une des données essentielles sur laquelle il édifiera sa conception de la vie. L'étude de la forme s'accompagne nécessairement de celle de son développement. La genèse de la forme spécifique nous en révèle l'architecture intime. Elle permet de saisir les rapports qui lient les parties les unes aux autres, en assurent le fonctionnement harmonieux et réalisent l'unité de l'individu. Cette science est l'Embryologie. Pendant longtemps, elle est restée purement descriptive, se bornant à enregistrer les déroulements successifs qui transforment l'œuf en embryon, puis en adulte. Depuis une soixantaine d'années, l'Embryologie est devenue expérimentale ou « causale », pour reprendre l'expression de Brachet. C'est dire qu'elle ne se borne plus à figurer les aspects divers que prend l'être au cours de son développement; elle cherche encore à mettre en évidence les facteurs qui assurent la mise en place des ébauches et leur différenciation en tissus et en organes. Des méthodes ingénieuses et raffinées ont été peu à peu mises au point, grâce auxquelles on sait aujourd'hui fragmenter et recombiner des morceaux d'œufs ou d'embryons microscopiques, ou greffer avec sûreté ces petits fragments d'un embryon à l'autre, de même espèce ou d'espèce différente. Les résultats ainsi obtenus ont déjà dépassé ce que l'esprit le plus audacieux aurait pu concevoir : la découverte de l' « organisateur » de Spemann, en particulier, a ouvert à la science de la vie des horizons nouveaux, en révélant le mécanisme subtil et général qui préside au développement des germes vivants et à la formation de ces organismes, dont la dissection ne peut que démontrer la complication, mais que l'on ne comprend véritablement que lorsqu'on a pu suivre la genèse de leur forme et vu se nouer les relations harmonieuses et complexes entre l'activité de toutes leurs parties.

Préformation ou épigenèse ?

L'EMBRYOLOGIE expérimentale est une science jeune. Mais, de tout temps, l'impatience et la curiosité de l'esprit humain ont édifié avec les produits de l'imagination ce que les données expérimentales n'étaient pas encore en mesure de leur fournir. L'édification d'une théorie du développement de l'être n'a pas échappé à cette règle. Dès le dix-septième siècle, naturalistes et philosophes se sont efforcés de rendre compte de la marche du développement. Dans un temps où l'observation ne pouvait être que très grossière, la spéculation a joué le rôle essentiel dans l'établissement des théories du développement. Les naturalistes ont cru retrouver dans les cellules reproductrices une maquette réduite renfermant, à l'échelle microscopique, les différents éléments de l'adulte; ceux-ci n'auraient qu'à s'agrandir pour acquérir leur forme définitive; le développement ne serait qu'une croissance. C'est la théorie de la *préformation* dont le plus ardent défenseur fut le philosophe et naturaliste genevois Charles Bonnet.

A une époque où la signification de la fécondation n'avait pas encore été reconnue, les préformationnistes se divisaient en deux camps : les *spermatistes* et les *ovistes*. Pour les spermatistes, le germe essentiel est l'élément mâle; il renferme tout ce qui est nécessaire au développement de l'adulte; il trouve seulement dans la matrice maternelle les conditions favorables à son développement. Hartsoeker, l'un des premiers observateurs qui se servit du microscope pour scruter les objets de la nature, figure, en 1694, un spermatozoïde au sein duquel il s'imaginait retrouver les traits d'un fœtus humain. Dalenpatius (1699) croit que le spermatozoïde sert d'enveloppe à un minuscule *homunculus*.

Les ovistes défendaient une interprétation opposée. Pour eux, l'œuf joue le rôle essentiel dans le développement. La fonction de la liqueur séminale se borne à une action excitatrice qui favorise le développement de l'ovule.

Les théories préformationnistes, qu'elles se rattachent à l'une ou l'autre école, conduisent irrévocablement à admettre l' « emboîtement des germes ». Du moment que l'œuf — ou le spermatozoïde — contient un embryon tout formé, celui-ci doit renfermer les œufs et les embryons de toutes les générations humaines jusqu'à la fin du monde. Cette conséquence fut parfaitement reconnue par Malebranche qui déclare dans son grand ouvrage « De la Recherche de la Vérité » (1674) : « Nous devons donc penser que tous les corps des hommes et des animaux qui naîtront jusqu'à la consommation des siècles ont été produits dès la création du monde; je veux dire que les femelles des pre-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

miers animaux ont été créées avec tous ceux de la même espèce qu'ils ont engendrés et qui doivent s'engendrer dans la suite des temps. » L'absurdité d'une telle doctrine tombe sous le sens et c'est la raison pour laquelle elle fut finalement abandonnée.

C'est pour obvier à ces impossibilités fondamentales que fut proposée la théorie de l'*épigenèse*. Les initiateurs en furent Buffon et Caspar Friedrich Wolff. A l'idée de préformation, ils substituent celle d'organisation progressive de l'embryon à partir d'une structure initiale très simple.

L'embryologie causale

La science moderne — et la biologie n'est devenue une science moderne que vers le milieu du dix-neuvième siècle — est caractérisée par l'introduction de l'expérimentation en tant que méthode essentielle d'investigation.

Le rôle de l'expérimentation est capital en embryologie. Elle permet seule, en effet, de fournir la solution du problème fondamental que pose le développement : quels sont les facteurs qui entraînent telle partie du germe à évoluer en système nerveux, telle autre en épiderme ou en éléments musculaires ? L'expérimentation permet de résoudre le dilemme posé par les spéculations des naturalistes philosophes : le développement représente-t-il le déroulement d'un mécanisme préformé, établi à l'avance dans l'œuf, ou tout au contraire, une série d'étapes dont les différenciations successives sont commandées par les évolutions antérieures, en suite d'un processus d'épigenèse?

Dès la fin du dix-neuvième siècle, les biologistes ont tenté de répondre à cette question par la voie expérimentale. En 1885, Wilhelm Roux opère sur l'œuf de grenouille, alors que celui-ci n'est encore constitué que par deux cellules (ou *blastomères*). Il pique l'un de ces deux éléments avec une aiguille chauffée. Le blastomère piqué s'altère rapidement et meurt; l'autre se développe, mais il ne donne naissance qu'à une moitié d'embryon, à un hémi-embryon (fig. 1). W. Roux en conclut que l'œuf de grenouille est une mosaïque de territoires déjà déterminés; il tire de ces expériences des conséquences favorables à la préformation.

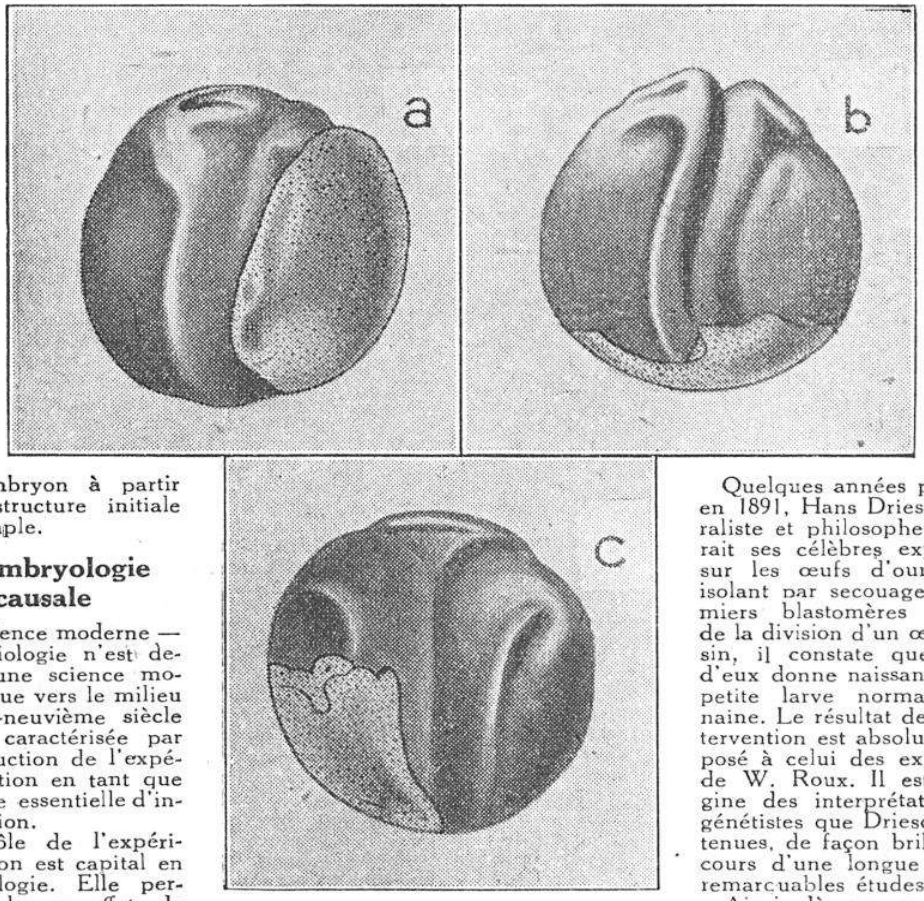


FIG. 1. — EMBRYONS PARTIELS DE GRENOUILLE OBTENUS PAR PIQURE DE L'UN DES BLASTOMÈRES, AU DÉBUT DE LA PÉRIODE DE SEGMENTATION (D'APR. BRACHET)

La partie morte est représentée en pointillé. a, *hémiembryon gauche, obtenu par piqûre du blastomère droit;* b, *hémiembryon dorsal, obtenu par piqûre de la région ventrale;* c, *autre exemple d'embryon partiel.*

Quelques années plus tard, en 1891, Hans Driesch, naturaliste et philosophe, inaugurait ses célèbres expériences sur les œufs d'oursins. En isolant par secouage les premiers blastomères résultant de la division d'un œuf d'oursin, il constate que chacun d'eux donne naissance à une petite larve normale, mais naine. Le résultat de cette intervention est absolument opposé à celui des expériences de W. Roux. Il est à l'origine des interprétations épigénétistes que Driesch a soutenues, de façon brillante, au cours d'une longue série de remarquables études.

Ainsi, dès ses premiers essais, la méthode expérimentale semblait renouveler, sans la résoudre, l'antinomie qui oppose la préformation à l'épigenèse. Il n'a pas fallu moins de quarante années de recherches pour que cette opposition fût réduite et qu'une interprétation cohérente du développement rassemblât en un tout harmonieux les résultats en apparence contradictoires de l'expérimentation.

L'œuf de grenouille

La réponse aux énigmes posées par le développement de l'être fut donnée par les interventions pratiquées sur les œufs de grenouille ou de triton (salamandre d'eau). L'œuf de ces animaux constitue un matériel facile à se procurer et aisé à manier. C'est sur lui que se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fonde à peu près tout ce que nous connaissons de solide et de précis sur le développement. L'expérimentation sur l'œuf d'oiseau est beaucoup plus délicate ; quant aux interventions pratiquées sur l'œuf des mammifères, elles n'ont pas encore dépassé la période des tâtonnements techniques Le lecteur dépourvu de connaissances zoologiques pourrait en conclure que l'intérêt de ces expériences est limité et sans portée générale. Il n'en est rien. Le développement se déroule de façon si uniforme dans toute la série des vertébrés que les données acquises chez les batraciens s'appliquent sans conteste aux poissons, aux oiseaux et aux mammifères. Les quelques incursions expérimentales poursuivies sur des embryons de vertébrés autres que ceux des batraciens permettent de l'affirmer.

Quelques mots sur l'organisation de l'œuf de grenouille et sur son développement sont nécessaires à l'intelligence de ce qui va suivre.

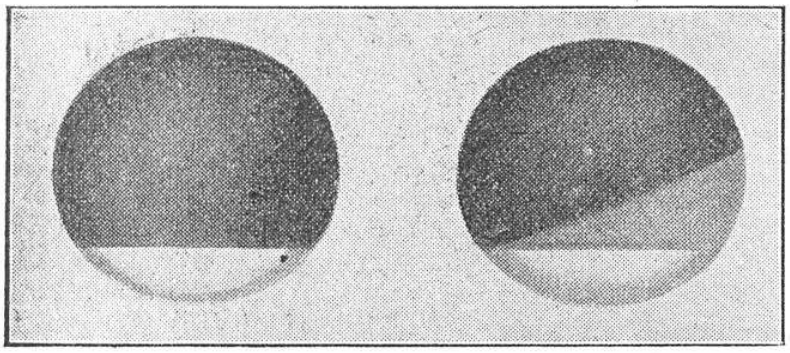


FIG. 2. — ŒUF DE GRENOUILLE ROUSSE AVANT ET APRÈS FÉCONDATION

A gauche, œuf avant la fécondation : le pôle végétatif seul n'est pas pigmenté. A droite, œuf après la fécondation : le croissant gris s'est formé entre la zone pigmentée et la région dépigmentée.

Les pontes de grenouilles sont abondantes, au printemps, dans les étangs, les mares ou les fossés remplis par les pluies d'hiver. La ponte se compose de plusieurs milliers d'œufs enrobés dans une substance muqueuse qui se gonfle énormément au contact de l'eau. Chaque œuf a la forme d'une petite sphère colorée par un pigment noir à l'exclusion de son pôle inférieur qui reste dépigmenté et apparaît de couleur blanche. Le pôle pigmenté a reçu le nom de *pôle animal ;* il est riche en protoplasme actif. Le pôle dépigmenté ou *pôle végétatif* est, au contraire, chargé de réserves (ou *vitellus*) ; c'est le pôle le plus lourd, et c'est la raison pour laquelle il est toujours orienté vers le bas, lorsque l'œuf flotte librement dans l'eau.

Les innombrables expériences effectuées sur l'œuf de grenouille ont établi, avec la plus grande certitude, que l'œuf possède déjà une organisation qui tient sous sa dépendance toute la suite du développement. Mais cette conclusion n'implique, en aucune manière, une adhésion aux théories préformationnistes. L'organisation de l'œuf commande la marche du développement, mais elle n'est, à aucun degré, une image de l'architecture de l'adulte. Des remaniements considérables qui se dérouleront au cours du développement bouleverseront complètement la disposition des ébauches de l'œuf pour les répartir suivant une organisation qui correspond à celle de l'adulte.

La conception que se fait aujourd'hui le biologiste de l'organisation de l'œuf est imprégnée de la notion de *gradient.*

Cette notion est due au biologiste américain C. M. Child. Le principe en est simple. Si l'on plonge un organisme animal ou une simple cellule dans un liquide toxique, une solution de cyanure de potassium, par exemple, la mort de l'organisme ou de la cellule s'ensuit rapidement. Mais si la solution employée est suffisamment diluée, on constate que la désintégration du protoplasme ou du corps de l'animal se produit suivant un ordre donné. L'altération atteint d'abord l'un des pôles de la cellule ou de l'animal, puis s'étend progressivement, à partir de ce point, au reste de l'organisme. L'explication de cette désintégration ordonnée de l'architecture vitale est simple. Les échanges entre la matière vivante et le milieu extérieur sont incessants ; les biologistes leur donnent le nom de *métabolisme.* Ce sont les régions cellulaires ou tissulaires dans lesquelles le métabolisme est le plus intense qui sont les premières altérées par le toxique ; celles où le métabolisme est le moins actif sont les dernières atteintes. Cette méthode très simple permet de reconnaître, dans la cellule ou l'organisme, une échelle d'activités croissantes ou décroissantes. C'est cette échelle que Child désigne par le terme de *gradient.*

Lorsqu'on applique cette méthode à l'œuf, on met en évidence un gradient qui passe par les deux pôles de l'œuf, le pôle animal et le pôle végétatif. Le pôle animal, le plus riche en protoplasme, est le siège des activités métaboliques les plus intenses ; c'est la région atteinte, en premier lieu, par la désintégration provoquée par le toxique. Le pôle végétatif, riche en matière de réserve, mais pauvre en protoplasme, possède un métabolisme lent ; il correspond à la région de l'œuf qui résiste le plus longtemps à l'action des substances toxiques. Child a donné le nom de *gradient axial* à l'échelle d'activités métaboliques qui s'étend du pôle animal au pôle végétatif. Il y a longtemps que les embryologistes avaient reconnu que les deux pôles de l'œuf jouent un rôle tout différent dans le développement et engendrent des organes distincts. L'analyse physiologique confirme ce que les données morphologiques avaient déjà révélé.

Le gradient axial apparaît de façon très précoce, bien avant l'époque de la fécondation, alors que l'ovule est encore renfermé dans l'ovaire. La fixation de cet axe est déterminée par des facteurs extérieurs à l'œuf ; elle se trouve sous la dépendance de l'organisme maternel, et tient à la position que l'œuf occupe dans l'ovaire.

Le gradient axial n'est pas le seul gradient que l'on ait reconnu dans l'œuf. Celui-ci présente, en effet, dès les premiers stades du développement, un plan de symétrie bilatérale. Il est l'indice de l'existence de gradients qui s'étagent régulièrement à droite et à gauche du plan de symétrie. L'établissement du plan de symétrie est dû, comme la fixation de l'axe polaire, à des facteurs étrangers à l'œuf ; ces facteurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

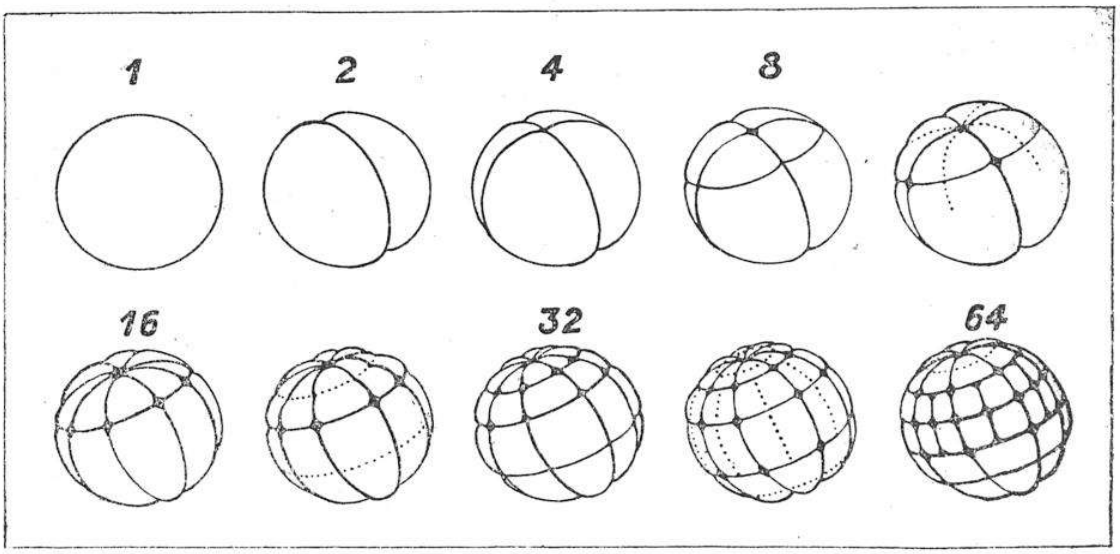


FIG. 3. — SEGMENTATION DE L'ŒUF DE GRENOUILLE ROUSSE (D'APRÈS ECKER)
Les chiffres placés au-dessus des figures indiquent les nombres de blastomères correspondant à chaque stade.

interviennent, soit dans l'ovaire, soit plus tard, à l'époque de la fécondation.

De cette rapide description, nous retiendrons que l'œuf possède, dès le moment où il vient d'être fécondé, une organisation liée à la répartition de ses éléments constitutifs suivant des gradients et acquise sous l'influence de facteurs ovariens ou de la fécondation. L'œuf n'est pas, comme on l'a cru pendant longtemps, une mosaïque de substances juxtaposées les unes aux autres; c'est un ensemble dont les éléments constituants et les activités métaboliques se répartissent de façon graduée suivant certains axes ou certains plans.

Le développement de la grenouille

Peu après la fécondation, la répartition du pigment se modifie à la surface de l'œuf; sur l'un des côtés apparaît une zone de transition entre la couche pigmentée et la région claire qui entoure le pôle végétatif. Cette zone, qui affecte la forme d'un croissant, a reçu le nom de *Croissant gris* (fig. 2). Le croissant gris constitue un point de repère essentiel pour les embryologistes. Le plan qui le coupe en deux moitiés égales représente en effet le plan de symétrie bilatérale du futur organisme; le croissant gris correspond, d'autre part, à la région dorsale de l'embryon.

L'œuf fécondé ne tarde pas à se diviser, à se *segmenter*, pour reprendre l'expression consacrée par les embryologistes. Il se divise en deux, puis en quatre, en huit, etc. (fig. 3). Les éléments, de plus en plus petits, nés de cette division, sont les *blastomères*. Lorsque la segmentation est achevée, l'œuf s'est transformé en une sphère creuse, la *blastula* (fig. 4). Les parois de cette sphère n'ont pas la même épaisseur sur tout leur pourtour. La paroi qui correspond au pôle végétatif de l'œuf est épaisse; elle est construite de gros éléments bourrés de réserves; la paroi opposée, qui provient du pôle animal, est mince et formée de quelques couches de petites cellules, riches en protoplasme et pauvres en vitellus.

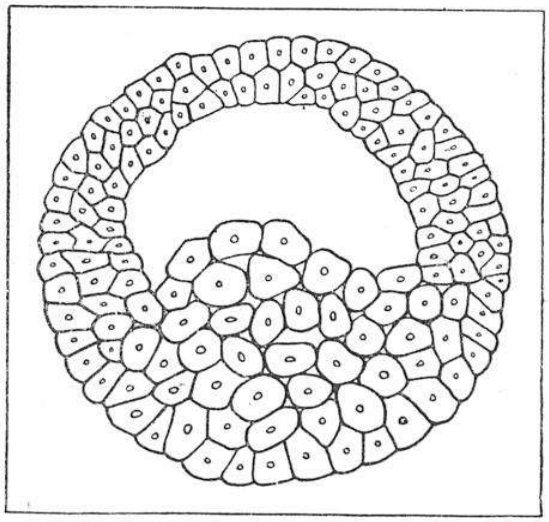


FIG. 4. — COUPE DANS UNE BLASTULA DE TRITON (D'APRÈS O. HERTWIG)
En haut, les petits éléments du pôle animal; en bas, les gros éléments, chargés de réserve, du pôle végétatif.

A ce moment, toutes les ébauches du futur organisme sont réparties *en surface*, à la périphérie de la sphère blastuléenne. La disposition définitive des organes, celle où les systèmes essentiels, colonne vertébrale, muscles, tube digestif, etc., se trouvent inclus à l'intérieur du corps et sont recouverts par le revêtement externe, est acquise au cours d'une phase embryonnaire fondamentale, la ***gastrulation***.

A la limite des petits

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

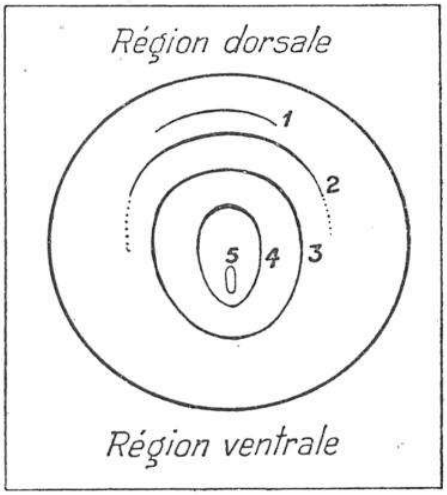


FIG. 5. — GASTRULA DE TRITON MONTRANT LES POSITIONS ET LES FORMES SUCCESSIVES (1, 2, 3, 4, 5) DU SILLON BLASTOPORAL (D'APRÈS MANGOLD)

et des gros éléments qui constituent la sphère blastuléenne, et *dans la région correspondant au croissant gris de l'œuf fécondé*, apparaît une fente qu'on appelle le *blastopore* (fig. 5). Cette fente, d'abord légèrement arquée, prend par la suite une forme en fer à cheval et, finalement celle d'un cercle complet (figure 5). La gastrulation consiste essentiellement en une série de mouvements qui déterminent le reploiement des couches superficielles au niveau du blastopore et leur enfoncement en profondeur (fig. 6). Ce reploiement a pour effet de modeler, autour du blastopore, des *lèvres* constituées de deux lames superposées, un feuillet externe et un feuillet interne. Le reploiement blastoporal atteint son maximum d'étendue du côté dorsal; il forme la *lèvre dorsale* du blastopore (fig. 6); son étendue est minimum du côté ventral, intermédiaire dans les régions latérales.

Le feuillet externe de la lèvre dorsale, c'est-à-dire la région qui n'a pas été affectée par le processus de reploiement, deviendra le système nerveux; le feuillet interne de la lèvre dorsale formera la *corde dorsale*, c'est-à-dire l'ébauche axiale autour de laquelle s'édifiera la colonne vertébrale. Les feuillets internes des lèvres latérales formeront le feuillet moyen ou *mésoderme;* c'est lui qui donnera naissance aux muscles, aux systèmes circulatoire, excréteur et génital. La région chargée de réserves, qui constituait la paroi ventrale de la blastula et qui s'est enfoncée en profondeur au cours de la gastrulation, donnera naissance au tube digestif (fig. 6).

Arrêtons là cette description; elle suffit à rendre compte des expériences dont nous allons maintenant parler. Ces brèves indications suffisent à établir que la gastrulation représente essentiellement l'enfouissement en profondeur d'une partie du matériel superficiel de la sphère blastuléenne. Cet enfouissement a pour effet de répartir les différentes ébauches organiques suivant la disposition définitive qui est celle de l'adulte.

L'époque de la détermination des ébauches organiques

Les transformations dont nous venons de résumer l'essentiel peuvent être représentées avec une grande clarté à l'aide de schémas appelés *cartes des territoires présomptifs de la blastula.* Les premières cartes qui aient été tracées sont dues à l'embryologiste W. Vogt. Elles sont établies à l'aide d'une technique très simple. Des marques colorées sont appliquées à la surface de la blastula; cette application est faite à l'aide de petits cubes d'agar imprégnés de colorants vitaux, c'est-à-dire de substances qui colorent les cellules sans les tuer. Ces taches colorées permettent de suivre le sort des différents territoires de la blastula, au cours de la gastrulation. Les marques colorées qui sont éloignées du blastopore restent en surface, tandis que celles qui en sont voisines disparaissent en profondeur (fig. 7). Une investigation systématique a permis de repérer la destinée des marques colorées appliquées en tous les points de la surface de la blastula; c'est elle qui a rendu possible l'établissement des cartes des territoires présomptifs de la blastula qui traduisent la destinée de chaque territoire blastuléen (fig. 8).

Mais l'établissement d'une carte des territoires présomptifs de la blastula n'implique nullement que, dès cet instant, les différentes parties de la blastula sont déjà déterminées en tant qu'ébauches des grands systèmes organiques : système nerveux, organes des sens, tube digestif, etc. Ces cartes signifient simplement que, *dans les conditions normales du développement,* une

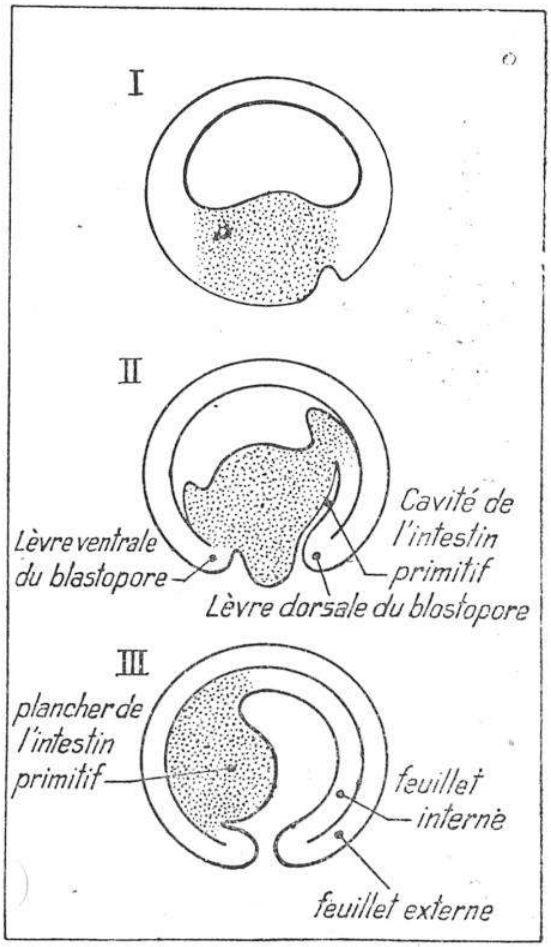


FIG. 6. — SCHÉMAS MONTRANT LA MARCHE DE LA GASTRULATION (D'APRÈS GOETTE)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

région donnée de la blastula donne naissance à un organe particulier, et rien de plus. L'expérimentation est seule capable de déterminer l'époque à laquelle le sort de l'ébauche est définitivement fixé. C'est la première tâche que doit remplir l'embryologie expérimentale.

Deux méthodes ont été utilisées pour répondre à cette question : la greffe et l'explantation. Dans les deux cas, on prélève, sur une blastula, un fragment correspondant à la région dont on veut éprouver les capacités évolutives. Dans la première méthode, on greffe ce fragment sur une autre blastula, en position anormale, différente de celle qu'il occupait sur le donneur; dans la seconde méthode, on le cultive dans un liquide physiologique propre à assurer son développement. Si la partie prélevée est déjà déterminée au moment où a été fait le prélèvement, on constate que l'évolution du fragment se poursuit de façon normale. Si la détermination n'a pas encore eu lieu au moment du prélèvement, le fragment croît, mais ne se différencie pas. Ces expériences ont établi que la détermination définitive des principales ébauches organiques est fixée au moment de la gastrulation. Ce stade dépassé, il devient impossible de modifier le sort de la plupart des ébauches embryonnaires. Au contraire, dans la jeune gastrula et dans la blastula, les ébauches des grands systèmes organiques n'existent encore qu'à l'état potentiel. C'est ainsi que les territoires présomptifs du système nerveux n'évolueront pas en ébauches nerveuses lorsque les prélèvements sont effectués sur la blastula ou la jeune gastrula.

L'organisateur

Les expériences précédentes fixent l'époque à laquelle une ébauche est définitivement déterminée. Mais ce n'est pas en cela seulement que réside leur intérêt; leur rôle essentiel est de permettre de poser, en termes précis, les données du problème fondamental que se doit de résoudre l'embryologie expérimentale : celui de la différenciation et de ses facteurs.

Nous avons dit qu'un fragment découpé dans les territoires présomptifs du système nerveux et prélevé dans une blastula s'accroît, mais ne se différencie pas en système nerveux lorsqu'il est cultivé sur liquide physiologique; il reste à l'état d'épithélium banal. La même opération pratiquée sur des embryons chez lesquels la gastrulation est achevée conduit à de tout autres résultats : les territoires présomptifs du système nerveux se différencient en moelle épinière ou en cerveau. Un facteur est donc intervenu, au cours de la gastrulation, qui a assuré la détermination de l'ébauche nerveuse. Quel est ce facteur et quel en est le mode d'action? Telle est la question à laquelle doit répondre l'embryologie expérimentale.

Cette réponse, nous la devons à Hans Spemann. Elle est apparue si lourde de conséquences biologiques et philosophiques que son mérite a été consacré par l'attribution à son auteur de la plus haute récompense scientifique mondiale : le prix Nobel (1935).

Revenons à l'œuf fécondé. Nous avons vu apparaître sur l'un des côtés de l'œuf une zone en forme de croissant, dans laquelle la pigmentation diluée établit le passage entre le pôle animal coloré et le pôle végétatif dépigmente : c'est le croissant gris. Nous avons dit l'exceptionnelle importance embryologique de cette région. Le croissant gris traduit, sous une forme visible, la symétrie bilatérale de l'œuf; il marque la région dorsale du futur embryon; c'est à son niveau que se creusera, par la suite, le sillon blastoporal; c'est lui enfin qui constituera la lèvre dorsale du blastopore, c'est-à-dire la région qui subit au maximum les pro-

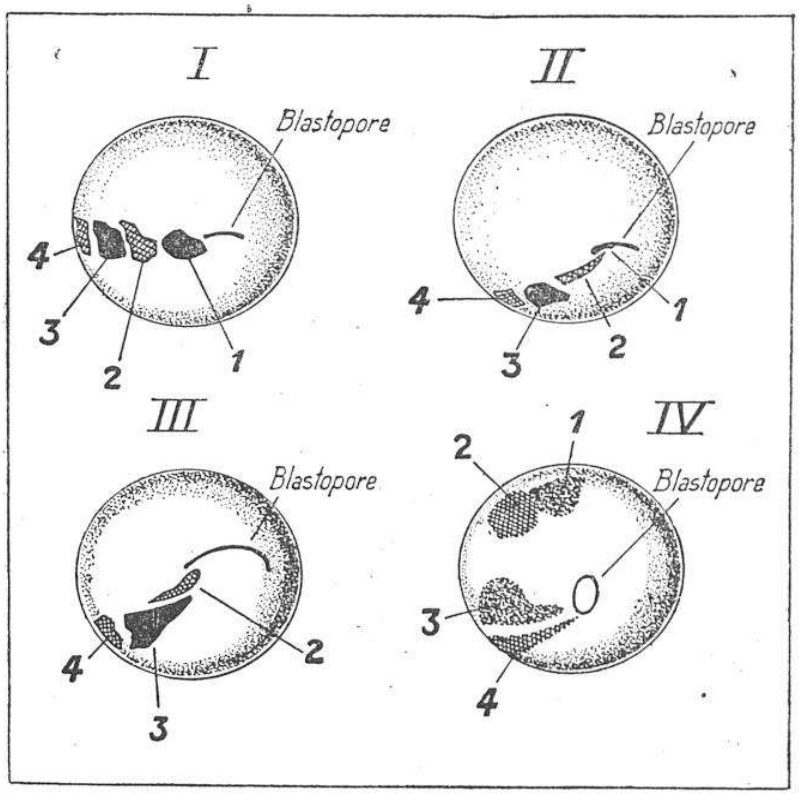


FIG. 7. — SCHÉMAS ILLUSTRANT L'EMPLOI DE LA TECHNIQUE DES MARQUES COLORÉES (D'APRÈS GOERTLER)

Les figures représentent quatre stades successifs de la même gastrula de triton sur laquelle on a appliqué quatre marques (1, 2, 3, 4, alternativement rouges (noires sur le dessin) et bleues (hachurées sur le dessin). Ces quatre marques ont été appliquées sur la gauche du sillon blastoporal. I, la jeune gastrula sur laquelle on vient d'appliquer les marques colorées. II, la marque 1 commence à disparaître à l'intérieur du blastopore; les marques 2, 3 et 4 sont encore superficielles. III, la marque 1 a complètement disparu à l'intérieur du blastopore; les trois marques 2, 3 et 4 sont encore superficielles, mais ont subi des déplacements les unes par rapport aux autres. IV, les trois marques 1, 2 et 3 ont passé à l'intérieur de la gastrula et ne sont plus visibles que par transparence; la marque 4 est restée seule superficielle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cessus d'enroulement et d'enfouissement à l'intérieur de la gastrula.

L'intuition géniale de Spemann, qui l'a conduit à entreprendre ses admirables expériences, est d'avoir pressenti le rôle essentiel que cette région doit jouer dans la marche du développement.

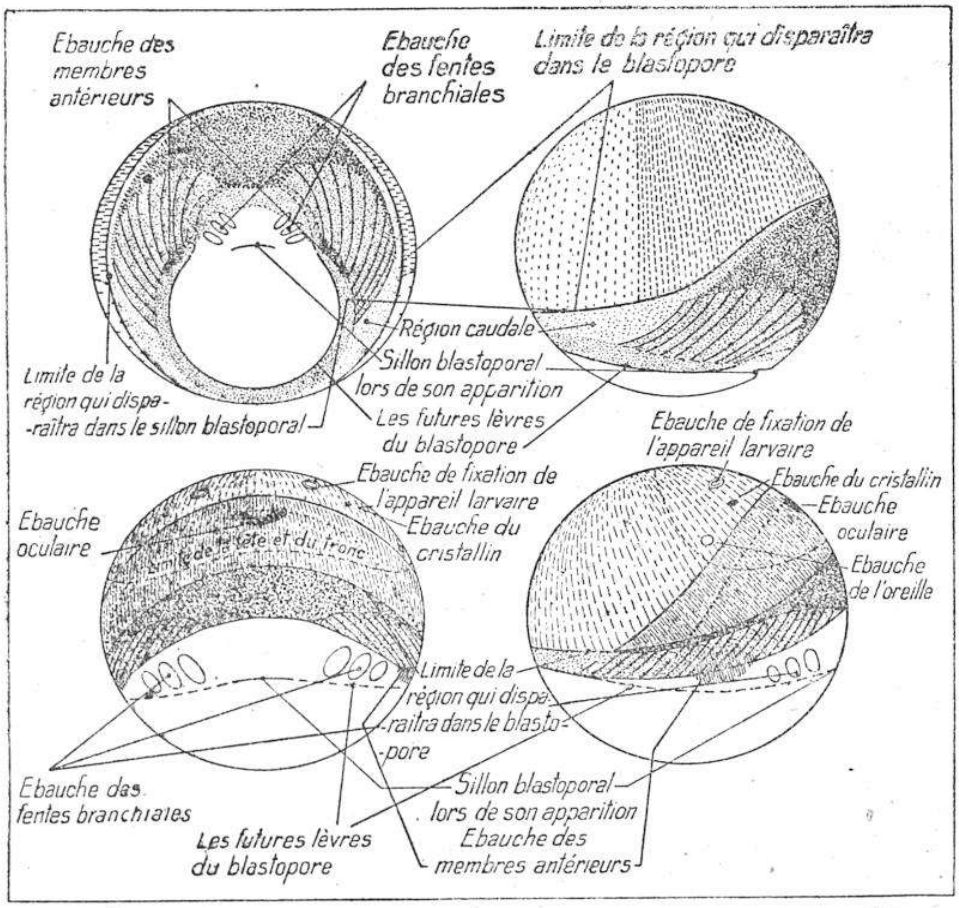


FIG. 8. — CARTES DES TERRITOIRES PRÉSOMPTIFS DES BLASTULES DE TRITON (EN HAUT) ET DE CRAPAUD (EN BAS) (D'APRÈS VOGT)

L'épiderme est représenté par des traits espacés, la plaque nerveuse par des traits rapprochés, la corde dorsale par un pointillé grossier, le mésoderme par un fin pointillé; l'ébauche du tube digestif est figurée en blanc.

Pour le prouver, Spemann a eu recours à la méthode des greffes. Il choisit, comme matériel, des embryons de triton appartenant à des espèces diversement pigmentées. Il prélève, dans une blastula non pigmentée, un fragment de lèvre dorsale et le greffe dans la région latérale d'une blastula pigmentée. Il constate que le résultat de cette opération est le développement, côte à côte, de deux embryons : l'un représentant l'embryon normal, l'autre provenant de l'implantation du fragment de la lèvre dorsale (fig. 9). Mais le résultat essentiel de l'expérience est mis en évidence grâce à l'emploi d'un greffon et d'un porte-greffe diversement pigmentés. L'embryon surnuméraire apparaît, en effet, constitué par ***une véritable mosaïque de tissus, les uns pigmentés, les autres dépigmentés*** (fig. 9 B). Les seconds dérivent du greffon, mais les premiers ne peuvent avoir pour origine que *des éléments provenant du porte-greffe*. Un fragment de lèvre dorsale a donc pour effet d'entraîner la construction, à partir d'un tissu banal, destiné à évoluer normalement en épiderme, d'un embryon normal et complet. Spemann a donné le nom d'*induction* à ce phénomène remarquable, et celui d'*organisateur* à la lèvre dorsale capable de déterminer cette induction. La question que nous posions au début de ce paragraphe reçoit ainsi sa réponse claire et définitive : la détermination du système nerveux est fixée au cours de la gastrulation, sous l'influence inductrice d'un organisateur représenté par la lèvre dorsale.

La contre-épreuve de cette remarquable expérience est apportée par la destruction localisée du feuillet interne de la lèvre dorsale ; elle est suivie d'une déficience correspondante dans la différenciation du feuillet externe en système nerveux.

La méthode des explantations a permis de simplifier l'expérience de Spemann. Un fragment de territoire présomptif de système nerveux prélevé sur une jeune gastrula et cultivé dans du liquide physiologique s'accroît, mais ne se différencie pas. Le même territoire accolé à un fragment de lèvre dorsale évolue, au contraire, en système nerveux. Le phénomène de l'induction est ainsi mis en évidence, en l'absence de toute complication secondaire.

Spemann et ses élèves ont précisé les conditions de cette remarquable expérience en recherchant les limites territoriales de l'organisateur et en fixant sa durée d'action.

Les capacités inductrices sont propres à tous les territoires correspondant aux territoires présomptifs de la corde dorsale et du mésoderme, c'est-à-dire à toutes les régions qui ont subi l'enroulement au niveau des lèvres blastoporales.

L'expérimentation a prouvé que l'organisateur existe dès l'œuf fécondé. Une expérience très simple de Spemann le prouve (fig. 10). La symétrie bilatérale de l'œuf de triton est fixée;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

comme celle de l'œuf de grenouille, dès l'instant de la fécondation. Le premier plan de segmentation qui divise l'œuf en deux moitiés coïncide tantôt avec le plan de symétrie bilatérale, tantôt avec un plan qui lui est perpendiculaire. Si l'on glisse une boucle formée d'un cheveu de femme blonde dans le sillon creusé entre les deux premiers blastomères, on parvient aisément à les séparer. Lorsque le plan de division coïncide avec le plan de symétrie, on constate que chaque blastomère engendre un embryon nain, mais complet. Lorsque le plan de division est perpendiculaire au plan de symétrie, l'un des blastomères engendre un embryon complet, mais l'autre ne donne naissance qu'à une masse indifférenciée. Les résultats de cette double expérience sont aisés à interpréter. La carte des territoires présomptifs montre que l'organisateur est situé du côté dorsal et divisé en deux moitiés égales par le plan de symétrie. Lorsque le premier plan de division correspond au plan de symétrie, l'organisateur est réparti en deux moitiés égales dans chaque blastomère. Lorsque le premier plan de division est perpendiculaire au plan de symétrie, l'organisateur passe en entier dans l'un des blastomères; l'autre en est dépourvu. Cette double expérience prouve que l'action de l'organisateur s'exerce de façon effective, dès l'œuf fécondé. Si un blastomère renferme l'organisateur ou seulement la moitié de celui-ci, il engendrera un embryon normal; s'il est dépourvu de toute trace d'organisateur, il ne donnera naissance qu'à une masse indifférenciée.

La notion d'organisateur, mise en évidence chez le triton, a été étendue par la suite à l'ensemble de l'embranchement des vertébrés. Des expériences variées permettent d'affirmer qu'un organisateur, semblable à celui du germe de triton et possédant les mêmes propriétés fondamentales, existe chez tous les vertébrés, depuis les poissons jusqu'aux mammifères.

Le développement de l'œil

Lorsque la gastrulation est achevée, toutes les grandes ébauches sont mises en place et définitivement déterminées. L'embryon est alors constitué par une mosaïque de territoires qui possèdent chacun leur autonomie. Leur sort est alors irrémédiablement fixé; aucune intervention expérimentale n'est plus désormais capable de les modifier. Mais, *à l'intérieur de chaque territoire*, la marche de la détermination est loin d'être définitivement achevée. Nous en donnerons un exemple. Il est relatif à l'œil.

Chez tous les vertébrés, l'œil a une double origine (fig. 13). Le globe de l'œil, ou plus exactement la rétine et les éléments sensoriels qu'elle renferme, représente une dépendance du cerveau. Nageotte a pu écrire que la rétine n'est qu'une partie du cerveau émigrée à la périphérie. L'appareil d'accommodation, c'est-à-dire le cristallin, tire, au contraire, son origine de l'épiderme. Alors que le cerveau vient de se constituer, sa partie antérieure se renfle de chaque côté en une vésicule pédiculée à sa base. Cette vésicule ne tarde pas à subir un refoulement du côté externe qui la transforme en une cupule formée de deux feuillets emboîtés (fig. 13). Cette cupule est à l'origine

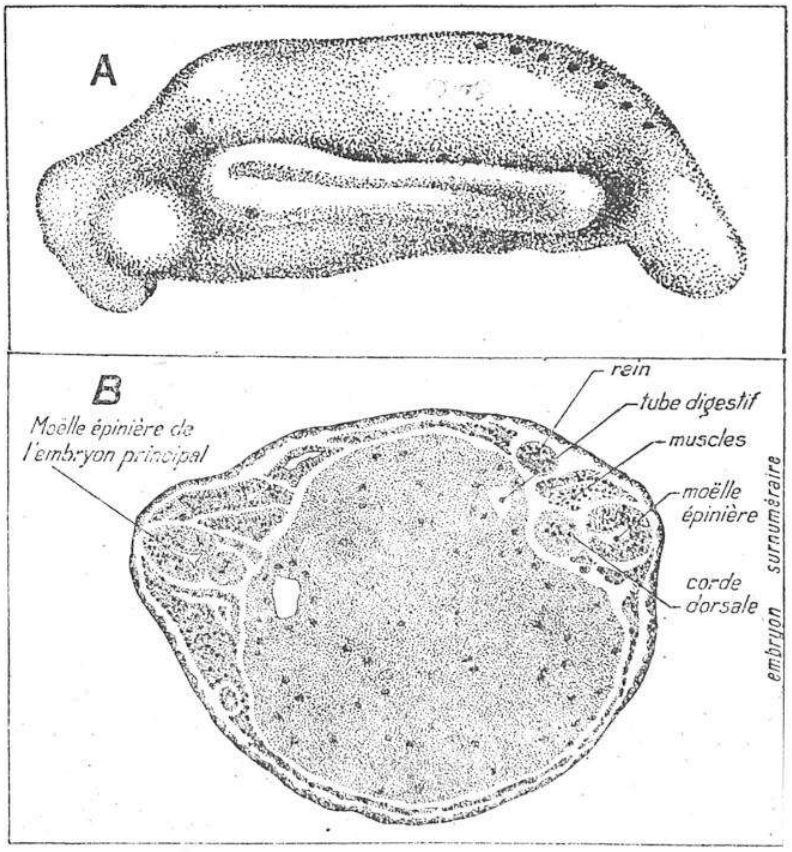


FIG. 9. — EXPÉRIENCE DE SPEMANN

A. Embryon de Triton taeniatus *provenant d'une blastula sur le flanc de laquelle on a greffé une lèvre dorsale de* Triton cristatus; *l'embryon surnuméraire apparaît sur le flanc gauche de l'embryon principal. — B. Coupe à travers le même embryon; à gauche, l'embryon principal,* taeniatus *(pigmenté); à droite, l'embryon surnuméraire formé d'une mosaïque de tissus appartenant les uns au greffon* (cristatus, *clairs), les autres au porte-greffe* (taeniatus, *pigmentés).*

du globe oculaire; son feuillet interne deviendra la rétine; le pédicule qui relie la cupule au cerveau deviendra le nerf optique. Dès que la cupule optique arrive au contact de l'épiderme, celui-ci subit, au-devant de l'ébauche oculaire, un épaississement notable. Cet épaississement forme le cristallin (fig. 13). Nous retiendrons de cette courte description le fait que la partie sensorielle de l'œil et l'appareil d'accommodation se constituent indépendamment l'un de l'autre, à partir d'ébauches entièrement distinctes.

Les embryologistes se sont demandé quelle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est la nature des corrélations qui associent de façon étroite l'ébauche cristallinienne et la cupule optique. C'est encore à Hans Spemann que revient le mérite d'avoir apporté à cette question la première réponse fondée sur l'expérience. Spemann détruit l'ébauche oculaire d'un embryon de grenouille rousse. Il constate qu'en l'absence de cupule optique, l'épiderme ne forme pas de cristallin. La contre-épreuve est fournie par l'ablation de l'ébauche cristallinienne. L'épiderme ne tarde pas à recouvrir l'emplacement occupé par le cristallin; si la cupule optique n'a pas été lésée au cours de l'opération, un nouveau cristallin se reconstitue à partir de l'épiderme cicatriciel. Un zoologiste américain, W. H. Lewis, a repris, sur une grande échelle, et en les variant, les expériences de Spemann. Après avoir pratiqué l'ablation du cristallin, il greffe des fragments de peau prélevés dans des régions diverses du corps; il constate que l'épiderme réagit, au contact de la cupule optique, en formant un cristallin. Il a également transplanté la cupule optique en des situations anormales; quel que soit l'endroit où elle a été greffée, la peau qui la recouvre engendre un cristallin. Une cupule optique coupée en deux moitiés détermine la formation de deux petits cristallins.

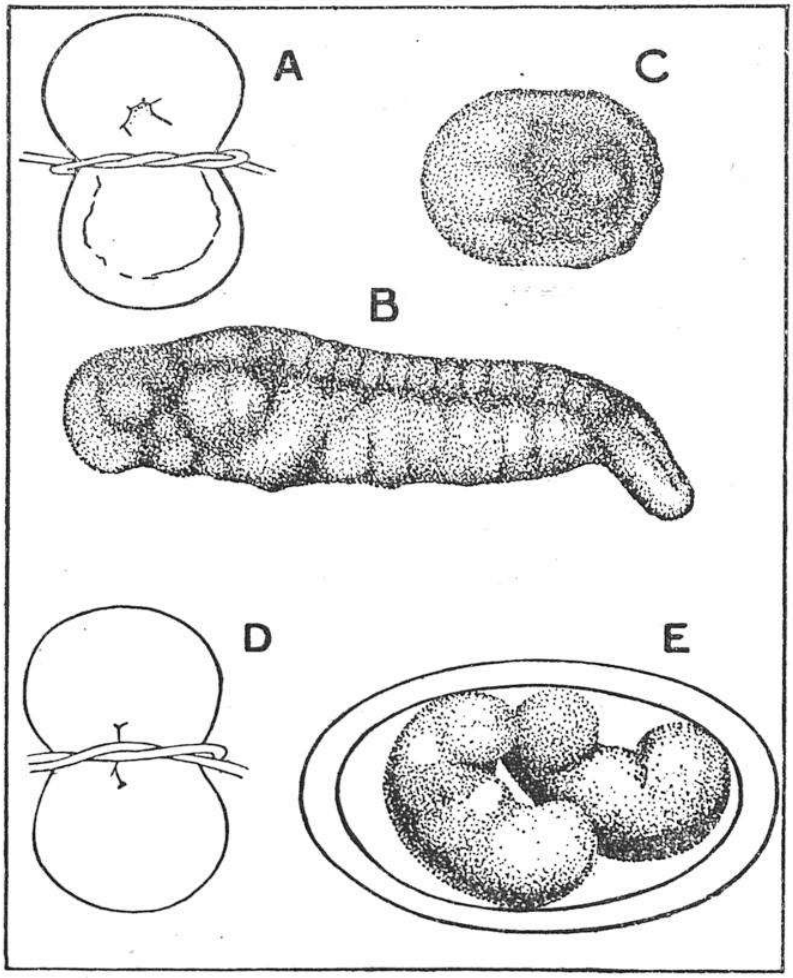


FIG. 10. — EXPÉRIENCE DE LIGATURE DE L'ŒUF DE TRITON (D'APRÈS SPEMANN)

A. Ligature disposée de telle sorte qu'elle divise l'œuf en une moitié dorsale et une moitié ventrale; le résultat de cette expérience est représenté sur les figures B et C : B est un embryon normal résultant du développement de la moitié dorsale de l'œuf, celle qui renferme l'organisateur; C est une masse indifférenciée résultant du développement de la moitié ventrale de l'œuf, qui ne renferme pas l'organisateur. D, ligature disposée de telle sorte qu'elle sépare l'œuf en deux moitiés, droite et gauche; chacune des moitiés renferme une partie de l'organisateur; E, le résultat de cette expérience : deux embryons normaux, mais nains.

Toutes ces expériences fournissent des résultats concordants. Elles démontrent que la cupule optique détermine *par induction* la formation d'un cristallin à partir d'un épiderme banal. La cupule optique constitue un *organisateur* qui tient sous sa dépendance le développement du cristallin. Mais elle représente un *organisateur de second ordre*. La différenciation de la cupule optique dépend, en effet, elle-même de l'activité inductrice de l'organisateur primaire, comme le système nerveux dont elle ne représente qu'une annexe. Cette notion est de la plus haute importance en ce sens qu'elle permet de comprendre la marche du développement. Spemann voit dans celui-ci le résultat d'une cascade d'inductions successives. L'organisateur primaire engendre des organisateurs secondaires dont le champ d'action n'est plus l'organisme tout entier. Il est probable que les organisateurs secondaires entraînent la différenciation d'organisateurs tertiaires qui commandent la différenciation de régions plus restreintes encore.

Les corrélations organiques

Dans tout organisme pluricellulaire, des corrélations s'établissent entre les différents éléments qui le constituent : cellules, tissus, organes. Ces corrélations sont assurées par deux mécanismes distincts. Les unes sont des corrélations de nature chimique, établies par les *hormones;* les hormones sont sécrétées par les glandes endocrines et transportées par le torrent circulatoire. D'autres corrélations s'établissent par l'intermédiaire du système nerveux. La découverte de mécanismes neuro-chimiques, tels que ceux qui sont impliqués dans le fonctionnement du système nerveux sympathique, conduit à penser que l'opposition entre ces deux modes de corrélations n'est pas aussi radicale qu'on le croyait autrefois.

Quelle est la nature des corrélations embryonnaires qui relient entre elles les ébauches embryonnaires? Elles n'appartiennent ni au type hormonal ni au type nerveux que l'on connaît

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

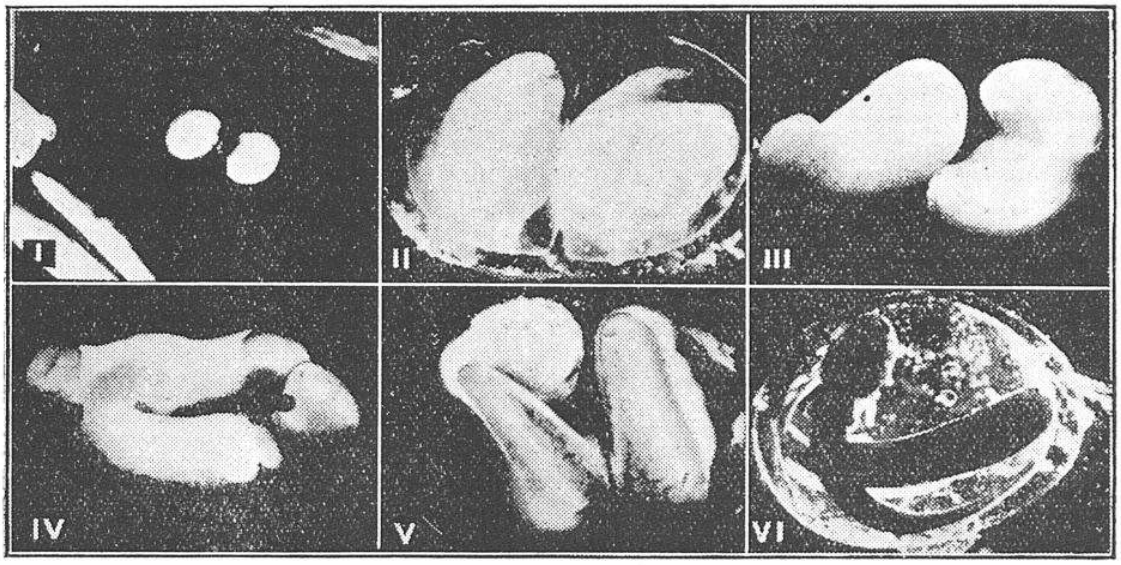


FIG. 11. – DÉVELOPPEMENT D'UN ŒUF DE TRITON SECTIONNÉ PAR UN CHEVEU ET DONNANT NAISSANCE A DEUX LARVES JUMELLES ARTIFICIELLES

chez l'adulte. La raison en est simple. Aux premiers stades du développement, les seuls que nous envisagions ici, le système nerveux est à peine différencié et n'est pas encore fonctionnel. Les glandes endocrines et le système circulatoire n'existent pas encore.

Les expériences que nous avons exposées plus haut prouvent que les corrélations embryonnaires sont de nature chimique; elles s'établissent par l'intermédiaire d'une substance qui est transmise de l'organisateur à l'organe induit. La nature des substances chimiques impliquées dans l'induction n'a pu être encore exactement reconnue, malgré les efforts répétés des biochimistes. Ces substances ne sont pas des hormones. Elles ne sont pas sécrétées par des glandes endocrines, mais par les cellules de l'organisateur qui ont encore conservé les caractères de cellules embryonnaires. Elles ne sont pas déversées dans un système circulatoire encore inexistant; elles diffusent lentement de cellule à cellule. Leur marche est lente, et c'est la raison pour laquelle l'induction ne s'exerce que sur les ébauches avoisinant immédiatement

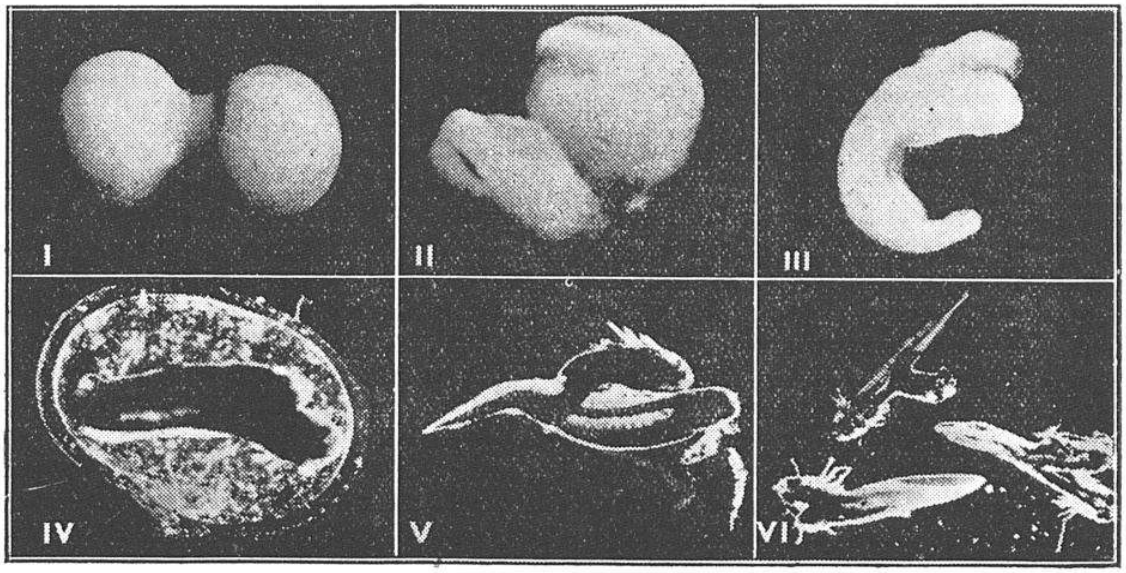


FIG. 12. – LORSQUE L'ŒUF DE TRITON EST INCOMPLÈTEMENT SECTIONNÉ, SON DÉVELOPPEMENT ULTÉRIEUR DANS CES CONDITIONS DE L'EXPÉRIENCE ABOUTIT A UN « MONSTRE » A DEUX TÊTES, DEUX THORAX, MAIS UN SEUL ABDOMEN

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'organisateur. Les embryologistes ont donné aux agents de corrélations embryonnaires le nom de *substances diffusibles*.

Les phénomènes d'induction embryonnaire établissent que le premier type de corrélations qui apparaît dans le cours du développement est de nature chimique. C'est le mode primitif. Le mécanisme hormonique ne constitue qu'un type dérivé et perfectionné de corrélations chimiques. Quant aux corrélations nerveuses, plus rapides et plus souples, elles apparaissent tardivement dans l'embryon ; elles sont, dans la phylogenèse, les dernières venues.

Conclusions

Les biologistes sont parvenus, grâce à un labeur tenace et à d'habiles méthodes, à connaître le développement de l'être, non seulement dans ses aspects extérieurs, mais encore dans ses mécanismes les plus intimes, c'est à-dire ceux qui assurent la différenciation.

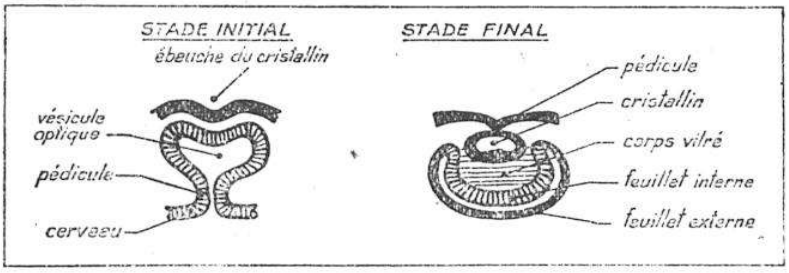


FIG. 13. — DÉVELOPPEMENT DE L'ŒIL DES VERTÉBRÉS (D'APRÈS O. HERTWIG)

La vésicule optique est réunie intégralement au cerveau par le pédicule optique qui deviendra par la suite le nerf optique. La paroi de l'épiderme se déprime en avant de la vésicule optique, pour former l'ebauche du cristallin. Au stade final, l'ébauche cristallinienne s'est transformée en un cristallin qui reste encore temporairement réuni à l'épiderme par un pédicule; la vésicule optique est transformée en une cupule formée de deux feuillets; le feuillet interne formera la rétine; le feuillet externe la couche pigmentée de la rétine.

Les esprits de nature géométrique qui se rencontrent aussi bien parmi les biologistes que chez les mathématiciens, ont souvent tenté d'interpréter le développement comme un mécanisme simple mais rigide, distribuant, par dichotomies successives, les ébauches organiques, à la façon dont sont réparties les rames de wagons, sur les voies divergentes d'une gare de triage. Si un mécanisme de cet ordre présidait au développement, la moindre erreur d'aiguillage, la plus faible perturbation dans la distribution des ébauches entraînerait inéluctablement la formation de monstres. En fait, le développement est bien le contraire d'un mécanisme rigide ; il est l'image de la vie elle-même, avec ses qualités essentielles : souplesse, unité et coordination.

Ces qualités nous sont révélées, de façon lumineuse, par le fonctionnement des organisateurs. On pourra objecter que ce mécanisme n'a été jusqu'ici mis en évidence que chez les vertébrés. Cela tient à ce que l'embryologie expérimentale n'en est encore qu'à la période des tâtonnements dans le domaine des invertébrés. Et, cependant déjà, les embryologistes ont mis en évidence, dans l'œuf des insectes, un « centre différenciateur » qui, sans être l'homologue de l'organisateur des vertébrés, joue un rôle analogue. Nowikoff a établi l'existence d'un organisateur chez les vers annelés ; il diffère de celui des vertébrés en ce qu'il n'exerce son action qu'à l'intérieur d'une cellule embryonnaire ou blastomère. Enfin, la méthode des cultures de tissus végétaux a permis à M. Gautheret de déceler la présence d'inducteurs végétaux analogues aux organisateurs animaux. Le jeune bourgeon semble représenter un centre organisateur qui entraîne la différenciation du parenchyme banal qui l'entoure. Ces quelques données permettent d'affirmer que l'existence d'inducteurs est très générale ; l'organisateur représente un élément constant et essentiel du développement des êtres vivants.

Le rôle des organisateurs est d'assurer les corrélations entre les différentes ébauches de l'embryon et de lui imprimer une *unité* anatomique et fonctionnelle. Si une partie du germe vient à être lésée, l'organisme qui en résulte n'est pas nécessairement incomplet ; car l'organisateur comble le déficit en déclenchant, dans un matériel banal, des évolutions compensatrices qui assurent le remplacement de la région accidentellement perdue.

Une expérience bien curieuse fait ressortir de façon lumineuse le rôle unificateur de l'organisateur. Il est aisé d'obtenir la fusion complète de deux œufs de triton en les accolant étroitement l'un à l'autre. Si les organisateurs des deux œufs restent séparés, l'œuf composé engendrera un monstre double ; mais si l'accolement des œufs a été pratiqué de façon telle que les organisateurs se fusionnent, l'œuf double engendrera un embryon normal, mais géant.

La notion d'organisateur révèle, d'autre part, la *hiérarchie* qui s'établit entre les ébauches de l'embryon. L'organisateur exerce une véritable emprise sur les territoires avoisinants et en règle le développement. On doit donc distinguer, dans l'embryon, des régions directrices et des territoires banaux. Ces derniers sont incapables de se différencier par eux-mêmes ; ils ne s'orientent vers un type déterminé que s'ils reçoivent les sollicitations des régions inductrices. C'est en raison de cette hiérarchie, qui règle les rapports des ébauches embryonnaires, que le développement aboutit à la formation d'un tout harmonieux dont les parties sont correctement équilibrées.

L'organisateur révèle ainsi de la façon la plus claire les propriétés essentielles du vivant : unité et individualité, assurées par la corrélation des différentes parties de l'être vivant et la hiérarchie de ses éléments constituants. Il sortirait du cadre de cet article de montrer que ces notions essentielles s'appliquent à l'ensemble des manifestations vitales.

A. VANDEL.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LA REPRODUCTION DU RELIEF SUPERFICIEL AU MOYEN DE DÉCHARGES ÉLECTRIQUES

par Armand de GRAMONT
de l'Académie des Sciences

Voici une méthode nouvelle d'étude des surfaces planes ou cylindriques qui permet de déceler de très faibles différences de relief. Elle consiste à placer une émulsion photographique au contact de la pièce à étudier et à appliquer une différence de potentiel de dix mille à vingt mille volts entre cette plaque et l'échantillon à reproduire. On obtient alors, par l'action, semble-t-il, d'un flot de petites étincelles, une reproduction fidèle et détaillée, donnant une remarquable impression de relief, des dénivellations les plus fines, alors même que celles-ci ne peuvent être décelées par les méthodes ordinaires. Ainsi peuvent être étudiées non seulement les pièces métalliques usinées, rectifiées et polies, mais encore certains corps non conducteurs comme le verre, ou les roches et minerais dont le polissage met en évidence les éléments composants.

On s'est beaucoup préoccupé, au cours des dernières années, de la mesure du relief présenté par les surfaces métalliques, notamment au cours des diverses phases de leur usinage.

Le problème se présente d'ailleurs de deux façons différentes : d'une part, on peut essayer de définir le relief micro-géométrique de la surface étudiée ; mais on peut aussi s'intéresser à l'état de la couche superficielle ; sur une profondeur variable, qui est habituellement de 1 centième de millimètre, l'échantillon est altéré, non seulement chimiquement, mais encore dans sa structure cristalline, par les traitements mécaniques ou thermiques qu'il a successivement subis.

Pour ce qui est de ces structures cristallines, l'analyse par les rayons X ou par la diffraction des électrons, a permis d'éclairer bien des points jusqu'ici obscurs et de déterminer notamment les caractéristiques de la couche dans laquelle les cristaux se trouvent plus ou moins bouleversés.

Le polissage superficiel de cette couche détermine la formation d'un revêtement amorphe dont les propriétés ont déjà reçu des applications pratiques : c'est ainsi que, sous le nom de « superfini », on désigne, dans certaines usines des Etats-Unis, le traitement de pièces métalliques destinées à supporter des frottements intenses ; cette technique permet en particulier de supprimer la période de rodage dans les moteurs à explosions.

Le mode de reproduction des surfaces dont nous allons parler ici n'a trait qu'à la forme de la surface libre de l'échantillon. Pour déterminer cette forme, on a recours habituellement à divers moyens selon la grandeur des dénivellations à définir. Les principales méthodes utilisées sont, à notre connaissance, le moulage, l'exploration mécanique et la coupe optique de l'échantillon considéré.

Le moulage consiste à prendre une empreinte, avec une sorte de cire, de la surface étudiée, à découper dans celle-ci au microtome de minces tranches dans des plans normaux à la surface étudiée, et à les examiner au microscope. Pour de très faibles variations du relief, on a même eu recours au microscope électronique, en faisant traverser au faisceau une mince couche de collodion détachée de la surface étudiée.

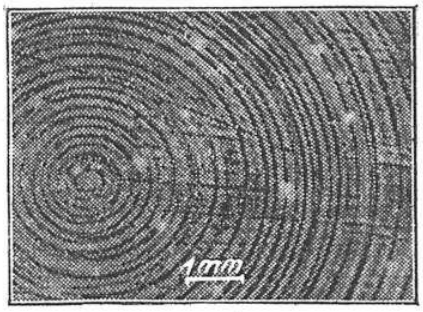


FIG. 1. — ÉLECTROGRAPHIE D'UNE SURFACE MÉTALLIQUE PLANE TRAVAILLÉE AU TOUR

Les sillons circulaires ont quelques centièmes de millimètre de profondeur.

L'exploration mécanique peut être réalisée au moyen d'une pointe qui suit les reliefs de la surface à la façon de l'aiguille d'un phonographe ; mais il semble que la précision de cette méthode soit limitée par les dimensions de la pointe, et, lorsque celle ci est très fine, l'échantillon se trouve rayé.

Divers dispositifs optiques ont été récemment réalisés : on projette sur la surface en essai une ligne fine et brillante, ou l'ombre portée par un trait mince et opaque : ainsi se trouve constituée une coupe optique dont on peut mesurer les dénivellations avec un microscope de grossissement approprié ou par photographie. La précision de cette méthode est limitée par la finesse de la ligne projetée sur la surface en essai, mais, par ce moyen, on peut obtenir, d'un seul coup, le profil de la pièce suivant une ou plusieurs lignes parallèles.

On peut enfin mesurer directement au micro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

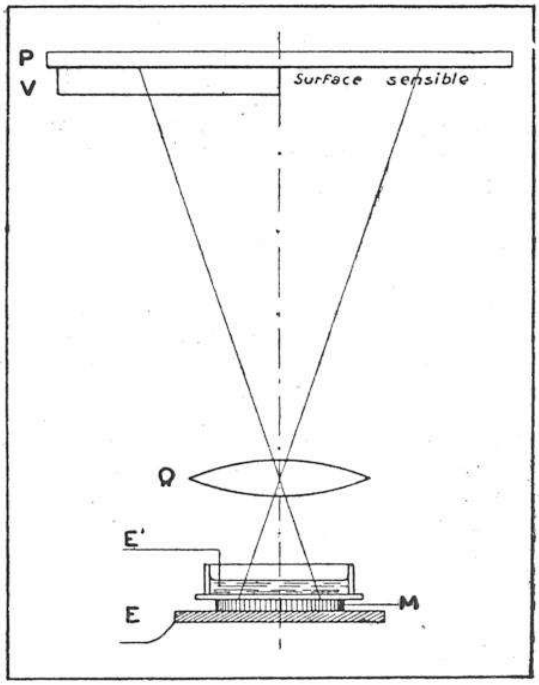


FIG. 2. — L'OBSERVATION DIRECTE DES IMAGES DUES AUX ÉTINCELLES

La tension est appliquée entre l'électrode métallique E et la cuve à fond de quartz où plonge l'électrode E'. Les étincelles émises par le relief de la médaille M sont projetées par une lentille Q en quartz sur la plaque photographique P, dont une moitié est recouverte d'une plaque de verre V arrêtant les rayons ultraviolets.

scope la profondeur des dénivellations, c'est-à-dire explorer la surface point par point; la méthode est longue, mais elle a permis à M. Arnulf de définir des différences de niveau inférieures au micron.

L'électrographie

A plusieurs reprises, des chercheurs ont utilisé les aigrettes qui se détachent des bords d'une surface métallique afin d'impressionner une émulsion sensible et de définir ainsi un contour déterminé. C'est Pinaud qui qualifia d' « électrographie » les images obtenues au moyen du « carreau étincelant » contre lequel était appliquée une feuille de papier enduite de bromure d'argent. Par la suite, on a qualifié d' « électrographie » le phénomène que nous avons étudié avec M. Jean Barraud : l'impression photographique du contour de la pièce étudiée n'est pas prise en considération, tandis que l'image du relief de la surface elle-même est fidèlement reproduite. La première description de ce genre de phénomène est, à notre connaissance, celle qu'en a fait le docteur M. Boudet de Paris qui obtint, dès 1886, des reproductions de médailles d'une grande fidélité. Il opérait de la façon suivante : la médaille était posée dans l'obscurité sur une émulsion sensible; une électrode était appliquée contre la médaille métallique et l'autre était placée au dos de la plaque sensible. L'impression était produite par la décharge d'un condensateur. L'image positive évoque bien l'aspect de la médaille, mais les détails ne sont guère perceptibles.

Nous avons réalisé l'expérience en créant une différence de potentiel comprise entre 10 000 et 20 000 volts au moyen d'une bobine de Ruhmkorff. Après un temps de pose qui varie avec le relief de l'échantillon et, bien entendu, avec l'émulsion employée, on obtient, en développant à la façon habituelle, une photographie constituée, d'une part, par une image représentant le relief de la pièce et, d'autre part, par une couronne d'aigrettes finement ramifiées qui en dessine le contour. Quand le relief est accusé, comme dans une pièce de monnaie, l'impression s'opère en quelques secondes.

Nous nous sommes proposé de rechercher si des différences de niveau plus faibles pouvaient être ainsi enregistrées et nous avons, à cet effet, fait une série d'expériences avec des surfaces planes diversement traitées et en employant des émulsions à grains fins. La méthode s'est trouvée convenir à l'enregistrement de toutes dénivellations, alors même que celles-ci ne pouvaient être que difficilement photographiées par les méthodes ordinaires.

La figure 1 reproduit un échantillon en laiton nickelé. La profondeur des sillons circulaires est de quelques centièmes de millimètre; certaines traces radiales sont encore plus fines. On remarque, d'autre part, sur le cliché, de petites taches blanches généralement circulaires. Nous avons reconnu par la suite que ces taches venaient d'étincelles électriques issues de points bien localisés dans l'échantillon.

Etincelle ou effluve?

Pour fixer le mode d'action par lequel est réduit le sel d'argent, il nous a semblé qu'un essai sous vide devait éclairer la question. Si, en effet, l'action était diminuée ou supprimée dans le vide, il s'agirait bien d'un phénomène analogue à l'étincelle électrique qui, comme on

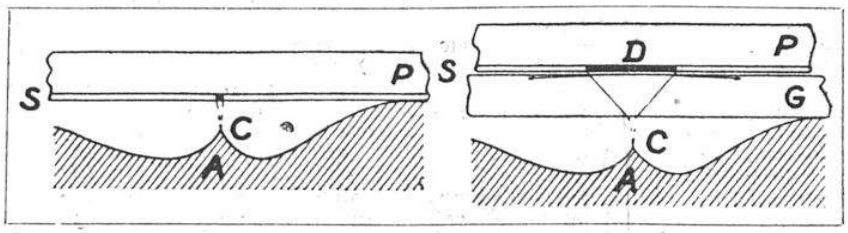


FIG. 3. — EFFETS DIRECT ET INDIRECT D'UNE ÉTINCELLE SUR LA PLAQUE

Le point A est un point d'où part une étincelle d'une façon continue. — A gauche : Le cône d'émission C donne une tache blanche sur la surface sensible S de la plaque P. — A droite : La face inférieure de la glace G interposée joue le rôle de source de lumière et donne un disque circulaire D sur la plaque photographique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le sait, ne se produit pas dans un vide suffisant, circonstance au contraire favorable à l'effluve. L'expérience a été concluante : sous vide, avec la tension qui nous a servi dans toutes les expériences, il ne se produit aucune impression. Après une durée d'exposition d'environ trois heures, la partie du cliché qui n'est pas en contact avec l'éprouvette métallique se trouve impressionnée par l'effluve qui remplit la cloche, tandis que la pellicule qui est sous l'éprouvette reste entièrement transparente.

Le vide de l'enceinte obtenu avec une pompe à palettes était de quelques millimètres de mercure, suffisant pour empêcher la formation de l'étincelle et favorable à la naissance de l'effluve.

L'analyse du phénomène

Afin d'observer à l'œil nu le rayonnement produit par une surface à relief suffisant, médaille ou pièce de monnaie par exemple, nous avons constitué le dispositif de la figure 2.

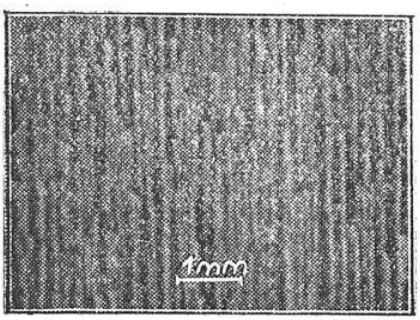


FIG. 4. — ÉLECTROGRAPHIE D'UNE SURFACE MÉTALLIQUE PLANE RABOTÉE (AVANCE 0,2 MM)

La médaille M est placée sur l'électrode métallique E et surmontée d'une cuve remplie d'eau dont le fond est en quartz et dans laquelle plonge l'électrode E'. On voit alors dans l'obscurité se dessiner le contour et les reliefs de la pièce, ce qui prouve qu'une partie au moins de l'agent est constituée par un rayonnement visible.

Nous avons, d'autre part, produit une image de la médaille sur la plaque photographique P au moyen d'une lentille simple en quartz Q, et nous avons obturé la moitié du champ par un écran en verre V de 7 millimètres d'épaisseur. Sur les deux moitiés du cliché on reconnaît l'image de la médaille, mais la partie obturée par l'écran de verre est nettement plus pâle, ce qui semble indiquer que le rayonnement participe à la fois du visible et de l'ultraviolet. Ceci était à prévoir, la lumière obtenue devant avoir pour composition celle du spectre de l'étincelle dans l'air.

Ainsi se trouve définie une des sources de cette action photographique, sans qu'il soit d'ailleurs possible d'affirmer qu'elle soit la seule active. En effet, en examinant les surfaces sensibles, après l'expérience, mais avant le développement, on observe, si la pose a été assez longue ou le voltage assez élevé, une image qui s'est formée sur l'émulsion et qui est due, sans doute, aux effets de l'étincelle, que ceux-ci soient mécaniques ou même thermiques.

Puisque le phénomène semble dû à l'étincelle, il était naturel de l'observer à plus grande échelle, et en l'absence de la plaque photographique : si l'on prend une surface suffisamment rugueuse constituant une première électrode et qu'on la dispose à deux ou trois millimètres de la deuxième électrode, qui, elle, sera plane par exemple, on voit, dès que la bobine est mise dans le circuit, une pluie d'étincelles se détacher de la surface rugueuse ; les étincelles ne sont pas généralement localisées ; elles se déplacent constamment, mais leur densité est d'autant plus grande que le relief de l'électrode est plus accusé.

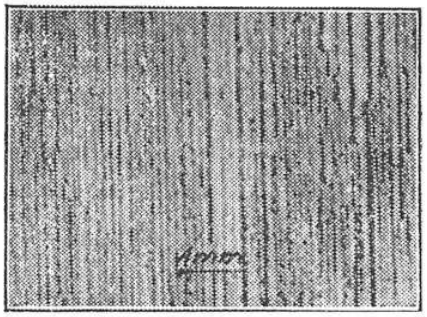


FIG. 5. — ÉLECTROGRAPHIE D'UNE SURFACE MÉTALLIQUE PLANE RABOTÉE (AVANCE 0,1 MM)

Nous avons essayé d'étudier ces étincelles par stroboscopie à une cadence voisine de celle du rupteur de la bobine, mais sans succès : il semble donc que la formation des étincelles ne soit pas synchrone ; l'éclatement de l'étincelle doit dépendre à la fois de la tension à un moment donné, laquelle varie constamment, et de la distance qui sépare les électrodes.

Enfin, de quelques points, partent d'une façon continue des étincelles dont le point d'origine est fixe.

Ces points constituent des crêtes comme celle qui est figurée en A sur le dessin schématique de la figure 3 : ce point A donne naissance à un cône C dont la base est constituée par les petits disques d'argent réduit sur la surface sensible S de la plaque P : ce sont les taches circulaires blanches que nous avons signalées.

Si maintenant nous interposons entre l'échantillon et la surface sensible une glace G, la base du petit cône C devient une source de lumière qui va impressionner la surface S suivant un disque circulaire D dont le diamètre est limité par la réflexion totale des rayons issus de la base du cône C et cheminant à l'intérieur de la glace G.

Dans ce cas, l'étincelle n'atteignant pas directement la surface sensible, l'impression du disque D ne peut être produite que par un effet lumineux.

La condition essentielle pour l'obtention d'images finement définies est précisément l'absence de ces taches. On voit par là se dessiner la limite d'emploi de la méthode : la surface ne doit pas être trop rugueuse, afin de ne pas déterminer pendant la pose des étincelles localisées.

L'illusion du relief

Il se trouve que ce procédé donne une sensation de relief oculaire, alors qu'il n'est lié en rien à la brillance intrinsèque des différents

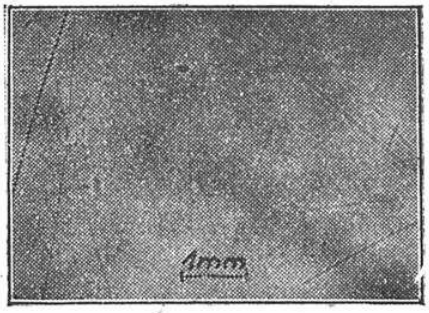


FIG. 6. — ÉLECTROGRAPHIE D'UNE SURFACE MÉTALLIQUE PLANE RODÉE

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

points de l'échantillon si celui-ci était éclairé; c'est en effet par l'intermédaire de la convexité des différentes régions de la surface en essai que va se former une image plus ou moins claire sur le positif. Or, les convexités correspondent aux reliefs effectifs de la pièce en expérience; le fond des sillons concaves ne donne lieu à aucune émission d'étincelles.

Le bombardement de la surface sensible est d'autant plus intense que le relief est plus accusé; nous aurons ainsi, dans des conditions expérimentales identiques, une représentation de relief sans doute arbitraire, comme d'ailleurs dans les représentations géographiques, mais qui, néanmoins, donne une illusion de relief par le fait que ce sont en général les sommets qui sont les plus lumineux. Le procédé que nous venons d'indiquer peut ainsi être utilisé à la définition d'un état de surface déterminé.

Les résultats

Les photographies reproduites sur les figures 4, 5 et 6 correspondent à : 1° surface rabotée, avance 0,1 mm; 2° surface rectifiée; 3° surface rodée. Sur cette dernière figure, les nuages que l'on aperçoit sont dus à une corrosion de l'échantillon. Les épreuves ainsi obtenues permettent de déceler des dénivellations qui sont difficilement perceptibles à l'œil nu : à titre d'exemple, certains sillons de la figure 6 ont une largeur qui ne dépasse pas 5 microns. Leur profondeur pourra peut-être s'apprécier par l'étude photométrique de clichés, à condition, bien entendu, que le temps de pose, l'émulsion et la source électrique soient bien déterminés.

Si l'on veut, par la même méthode, étudier des différences de niveau encore plus faibles, il faut avoir recours à une plaque constituée par une glace optiquement plane, laquelle devra être recouverte par une émulsion d'épaisseur très faible et pratiquement constante, telle qu'une préparation au collodion sec, ou même revenir au procédé de Daguerre.

La méthode peut s'appliquer à toute surface développable si l'on se contente de photographies sur pellicule. On peut en effet, en utilisant un cylindre comme électrode, appliquer la pellicule sensible au moyen d'une surface concave qui constituera la deuxième électrode.

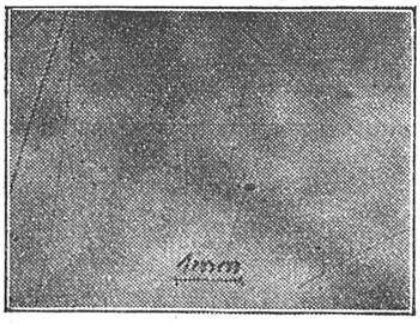


FIG. 7. — ÉLECTROGRAPHIE D'UNE SURFACE MÉTALLIQUE CYLINDRIQUE TOURNÉE (AVANCE 0,1 MM)

C'est ce qui a été fait pour un axe d'acier de 40 mm de diamètre; cet axe avait été tourné avec avance de 0,1 mm (fig. 7).

On pourrait de même étudier l'intérieur d'un cylindre en y introduisant une pellicule appliquée contre la surface concave par un coussin extensible.

Le phénomène ne se produit pas seulement avec des surfaces métalliques. Tous les corps que nous avons essayés ont donné lieu à des images : ébonite, verre rayé au diamant, caoutchouc.

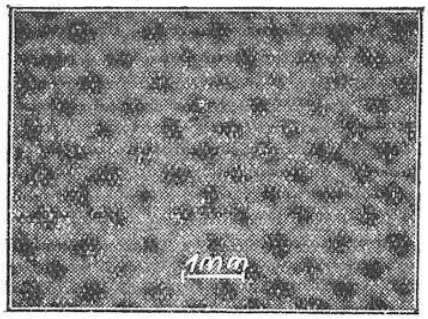


FIG. 8. — ÉLECTROPRAPHIE D'UNE SURFACE DE CAOUTCHOUC ENTOILÉ

Dans ce cas, la pièce ne pouvant servir d'électrode, on doit disposer sur l'échantillon une plaque métallique qui assure le potentiel nécessaire. La figure 8 représente l'image obtenue avec une feuille de caoutchouc ayant le relief de la toile.

Puisque les corps non conducteurs donnent lieu à ces mêmes images, il faut s'attendre à ce que les constituants chimiques qui peuvent prendre naissance ou se déposer à la surface de la pièce métallique entrent en jeu. C'est ainsi que les parties corrodées de l'échantillon ou les corps gras qui le recouvrent se dessinent sur le cliché. Il est à noter que les poses répétées peuvent entraîner une corrosion de la surface due au dégagement considérable d'ozone qui se produit pendant l'expérience.

Ce procédé permet encore d'obtenir des images de roches ou de minerais. Le polissage de l'échantillon, au moyen d'abrasifs fins, met en évidence de légères dénivellations dues aux différences de dureté des éléments composant l'échantillon.

Mais la méthode ne se prête pas, comme la microradiographie par réflexion de M. J. J. Trillat, à l'étude des alliages. Le nombre atomique de l'élément ne semble pas avoir d'effet perceptible sur la densité du cliché.

Tous ces essais ont été effectués au moyen d'une bobine de Ruhmkorff et d'une batterie d'accumulateurs de 40 volts. Nous avons tenté de produire des images au moyen d'une source de courant continu; les clichés, dans ce cas, sont beaucoup moins nets qu'avec la bobine : les variations brusque de la tension jouent donc un rôle en la circonstance.

Le matériel nécessaire à la production de cette électrographie est, comme on l'a vu, très simple.

Une bobine de Ruhmkorff alimentée par du courant continu, ou à la rigueur par le courant du secteur, permettra à tous ceux qui en feront l'essai d'obtenir des images qui seront d'autant meilleures que le relief sera plus fin.

Il est à souhaiter que des chercheurs mettent leurs efforts en commun pour améliorer la technique de cette méthode qui semble se révéler comme un moyen d'exploration particulièrement puissant et pratique.

A. DE GRAMONT.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LA PHOTOGRAPHIE EN INFRAROUGE RÉVÈLE CERTAINES MALADIES DES PLANTES

par Maurice DÉRIBÉRÉ

Les plantes vertes impressionnent vivement une émulsion sensibilisée aux rayons infrarouges, au point de donner une image positive blanche. Ce phénomène est dû, non au pouvoir réflecteur de la chlorophylle des feuilles pour l'infrarouge, mais à la diffusion de ce rayonnement par le pigment chlorophyllien. Toute modification de la répartition de ce pigment dans l'épiderme des végétaux peut donc être décelée sur une photographie en infrarouge. Tel est le cas des maladies causées par des champignons, dont un diagnostic précoce peut être ainsi établi. Les applications de la photographie en infrarouge sont déjà innombrables : déchiffrement de textes surchargés, lecture de documents brûlés, expertise de tableaux de maîtres, levers de plans en cartographie aérienne, examen de coupes histologiques, analyse de sang dans l'intoxication par l'oxyde de carbone, exploration du fond de l'œil, truquages cinématographiques, etc... Il faut leur ajouter maintenant une méthode nouvelle d'investigation, précieuse pour la botanique et la phytopathologie.

Le pouvoir réflecteur apparent des feuilles vertes pour l'infrarouge

ON sait qu'il est possible, au moyen de plaques spécialement sensibilisées aux rayons infrarouges (1), de prendre des vues de « lointains » grâce à la perméabilité du voile atmosphérique pour ces rayons (2).

La facile pénétration du rayonnement infrarouge à travers certaines substances, ainsi que la différence appréciable du pouvoir réflecteur de certaines matières pour la lumière ordinaire et pour l'infrarouge, sont à la base des applications pratiques innombrables de la photographie infrarouge. Grâce à elles, on obtient en particulier des effets photographiques spéciaux. Ainsi, des vues de paysages montrent des feuillages blancs, à tel point que l'on a pu obtenir, tant en photographie qu'en cinématographie, de fort curieux truquages : effets de clair de lune en plein soleil, scènes de ski sur une pelouse printanière, etc...

Il paraissait logique d'en déduire que les parties vertes des plantes, autrement dit la chlorophylle, devaient être dotées d'un pouvoir réflecteur particulièrement élevé pour l'infrarouge photographique. Cela est cependant inexact. La chlorophylle réfléchit mal l'infrarouge pour des longueurs d'onde de 1 micron, c'est-à-dire 10 000 angstrœms (1); elle transmet, au contraire, fort bien ce rayonnement et d'autant mieux que la longueur d'onde croît, ainsi que le montre la fig. 1. Il en est d'ailleurs de même pour la cellulose qui est également très perméable pour les longueurs d'ondes considérés (fig. 2). Il faut donc chercher une

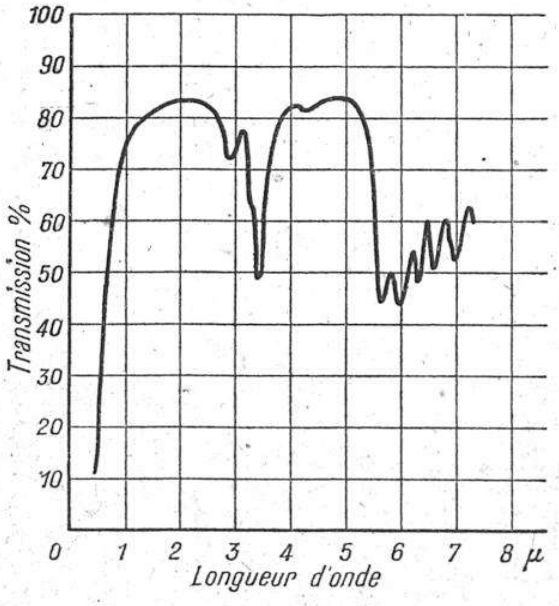


FIG. 1. — POUVOIR DE TRANSMISSION POUR L'INFRAROUGE D'UNE COUCHE MINCE SOLIDE DE CHLOROPHYLLE (D'APRÈS STAIR ET COBLENTZ)

(1) Les sensibilisateurs sont des colorants appartenant généralement au groupe de cyanines.

(2) Voir : « Microphotographie, téléphotographie, truquages cinématographiques » *(Science et Vie,* n° 253, juillet 1938, p. 29).

(1) L'angstrœm vaut un dix-millionième de millimètre. Le spectre visible groupe des radiations dont les longueurs d'onde vont de 3 900 à 8 000 angstrœms (0,39 à 0,8 micron). Puis vient l'infrarouge qui s'étend en principe jusqu'aux ondes électriques (longueurs d'ondes de plusieurs centaines de microns). Les plaques photographiques ne sont utilisables que dans la partie de ce domaine voisine du spectre visible, jusqu'à 12 000 angstrœms environ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

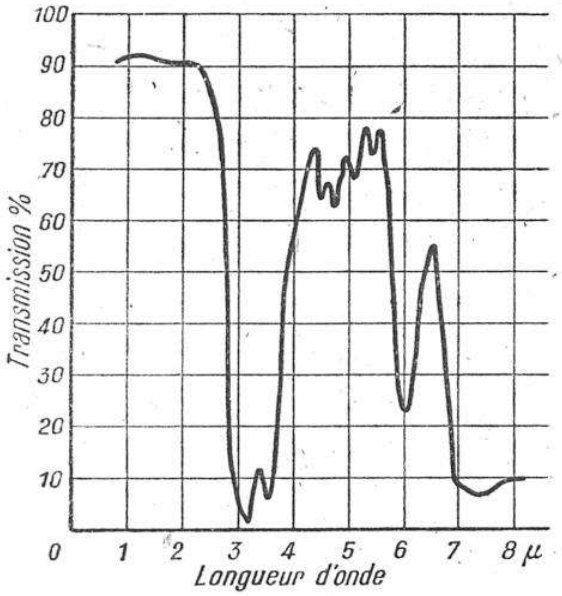


FIG. 2. — POUVOIR DE TRANSMISSION POUR L'INFRAROUGE DE LA CELLULOSE PURE EN MINCE COUCHE SOLIDE (CELLOPHANE) (D'APRÈS STAIR ET COBLENTZ)

autre explication du phénomène observé (1). Celle-ci a été fournie par J. Lecomte d'une façon rationnelle en se fondant sur la structure des organes végétaux. Selon cet auteur, les rayons infrarouges traversent sans difficulté l'épiderme qui est très transparent; ils suivent ensuite les lignes de cellules chlorophylliennes (fig. 3) et sont diffusés dans les couches vertes transparentes d'où ils ressortent enfin sans grandes pertes. Il s'ensuit que l'on peut les photographier et que les parties vertes des plantes montrent un aspect similaire à celui d'une surface réfléchissante.

Il est donc possible, puisque ces phénomènes se passent dans les couches superficielles, et bien que les constituants de ces couches ne soient pas eux-mêmes réfléchissants, de parler de « réflexion » de l'infrarouge par les végétaux. Ce pouvoir réflecteur apparent est d'une très grande importance, non seulement en ce qui concerne la photographie infrarouge et les effets qui peuvent ainsi être obtenus sur les clichés, mais aussi pour l'étude de l'autodéfense des végétaux contre les rayons solaires. Cette autodéfense varie avec l'âge, l'espèce, l'état physiologique du végétal, et on conçoit que son étude puisse présenter un grand intérêt du point de vue botanique et surtout phytopathologique.

De récentes études ont mis en évidence que les végétaux qui ont la réflexion apparente la plus élevée pour le rayonnement infrarouge sont ceux qui en reçoivent le plus, de par les conditions de leur exposition à la lumière solaire directe. Sur une photographie infrarouge, des feuilles de graminées disposées sur un peuplement de muscinées (1) donneront des lignes brillantes sur fond sombre. Pour une même plante, les jeunes feuilles sont plus transparentes et moins réfléchissantes que les feuilles plus âgées. C'est donc au cours de leur formation que les feuilles acquièrent leur dispositif de défense contre les rayons infrarouges. Elles atteignent un maximum, puis subissent un déclin qui s'accompagne d'ailleurs d'un jaunissement parallèle à la diminution du pouvoir réfléchissant apparent.

Les feuillages des plantes dont l'habitat est moins chargé en infrarouge sont moins réfléchissants pour ces rayons et paraissent plus foncés sur les clichés infrarouges. Ainsi les feuilles de conifères peu éclairées restent plus sombres que le reste de la végétation. De même, les algues et les plantes marines demeurent, comme les mousses, plus sombres sur de tels clichés que les herbes des prés.

(1) On a prétendu qu'il pouvait s'agir d'une fluorescence infrarouge. La fluorescence rouge de la chlorophylle s'étend en effet dans l'infrarouge et peut participer à l'effet de réflexion apparente des végétaux, mais elle est faible et insuffisante pour donner une explication du phénomène.

La photographie en infrarouge et le diagnostic des maladies des plantes

Dès que la chlorophylle subit un dommage, cette teinte claire des clichés infrarouges disparaît et l'on a pu, par ce moyen, arriver à déceler des maladies de végétaux difficiles à mettre en évidence par les méthodes usuelles.

Les maladies fongoïdes (2), qui troublent la répartition de la chlorophylle, sont ainsi nettement rendues visibles en diagnostic précoce. Dans ce cas, des taches sombres apparaissent sur des photographies infrarouges, alors qu'une feuille saine est uniformément blanche (fig. 4) et que la photographie ordinaire ne permettrait, pas plus que l'œil, de voir quoi que ce soit d'anormal.

Il faut d'ailleurs remarquer qu'en d'autres cas, une attaque directement perceptible à l'œil peut disparaître au contraire sur un cliché infrarouge; il peut arriver aussi que des atteintes soient révélées par l'infrarouge, d'autres par la vision directe ou la photographie ordinaire. Ces différences permettent un diagnostic fort intéressant, car si l'on n'observe pas de changements en photographie infrarouge, on

(1) Telles que des mousses.

(2) Causées par des champignons.

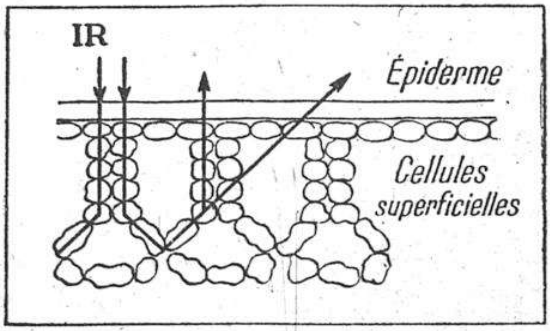


FIG. 3. — TRAJET DES RAYONS INFRAROUGES DIFFUSÉS SOUS L'ÉPIDERME D'UN VÉGÉTAL ET RENVOYÉS EN PARTIE AU DEHORS

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut en déduire que la chlorophylle est intacte, mais que les cellules peuvent être mortes.

La forme d'une attaque sur des feuilles ou des fruits permet de localiser et de contrôler les effets provocateurs. Ainsi, la sécheresse délimite sur des fruits une zone altérée, alors que des gouttelettes de produits anticryptogamiques provoquent une attaque répartie sur toute la surface. Il est encore possible de distinguer certaines maladies de pigmentation, de nécrose du contenu cellulaire.

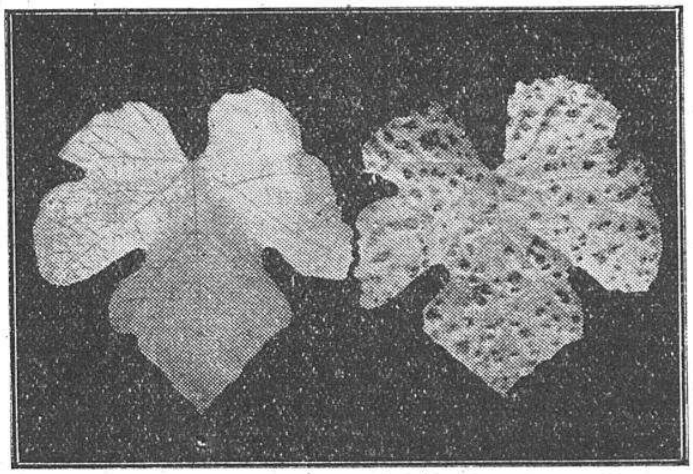


FIG. 4. — FEUILLES DE VIGNE, SAINE A GAUCHE, ET ATTEINTE DE MALADIE FONGOIDE A DROITE (PHOTO M. DÉRIBÉRÉ)

Les études phytopathologiques peuvent être poursuivies de façon très utile dans le cadre de la microphotographie infrarouge. Les coupes d'éléments végétaux sont colorées avec l'hématoxyline ou avec des cyanines du type de celles utilisées pour la sensibilisation des plaques. Dans ces conditions, le cytoplasme (1) laisse voir, de façon plus nette qu'avec les radiations visibles, les figures de séparation qu'il contient. Les chromosomes apparaissent bordés de noir, certaines parois de cellule, très transparentes, disparaissent par contre complètement.

Des tiges de plantes, des graines, etc., ainsi photographiées ont montré des détails fort précieux pour les recherches botaniques et phytopathologiques, et l'on voit par ce bref aperçu combien la photographie infrarouge peut donner d'intéressants résultats dans le domaine très général des études botaniques.

Maurice DÉRIBÉRÉ.

(1) Protoplasme situé en dehors du noyau d'une cellule vivante.

LES A COTÉ DE LA SCIENCE

INVENTIONS, DÉCOUVERTES ET CURIOSITÉS

par V. RUBOR

Une locomotive à vapeur avec chauffage électrique

LA rareté du combustible, ces dernières années, en Suisse, a imposé comme mesure d'urgence l'électrification de toutes les voies ferrées, en particulier celles du service de manœuvre. Cette mesure était d'une exécution difficile par suite du manque de matières premières pour l'extension du réseau des lignes de contact et pour la construction d'un grand nombre de locomotives électriques.

Le problème tel qu'il se posait exactement consistait à transformer le matériel existant, doté de la chauffe ordinaire au charbon, pour qu'il puisse circuler aussi bien sur les voies avec lignes de contact que sur celles qui n'en ont pas. Dans la plupart des gares, en effet, seules les voies principales sont électrifiées, et un grand nombre de voies secondaires ne le sont pas. La solution mise à l'essai a été l'installation d'appareils de chauffage électrique de la chaudière des locomotives à vapeur de manœuvre en service. Bien entendu, une locomotive à vapeur électrique ne peut se comparer du point de vue économique, ni avec celles chauffées au charbon, ni avec les locomotives électromécaniques. Mais nécessité fait loi.

Chaque locomotive mise à l'essai a été équipée d'un corps de chauffe à résistance formé de tubes traversés par l'eau. Ces corps de chauffe sont alimentés par deux transformateurs d'une puissance totale de 480 kW, placés de part et d'autre de la chaudière de la locomotive. L'énergie électrique est amenée au transformateur par une prise de courant montée sur le toit de la cabine du mécanicien et par un interrupteur à haute tension. Aucun dispositif de réglage électrique n'est prévu. La pression maximum est fixée exactement comme sur la locomotive chauffée au charbon. La mise sous pression ne dure qu'une heure; elle est donc deux fois plus rapide qu'avec le fonctionnement au charbon. Lors de sa mise en service dans une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

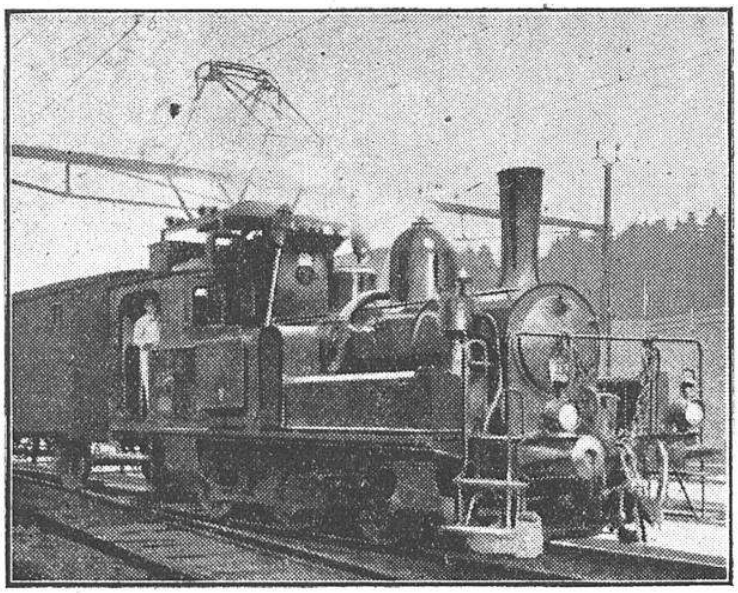


FIG. 1. — LA LOCOMOTIVE A VAPEUR AVEC CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE DES CHEMINS DE FER FÉDÉRAUX SUISSES

gare de triage d'importance moyenne, la première des locomotives ainsi équipées a pu remplacer dès le premier jour une locomotive de manœuvre chauffée au charbon. On a constaté que la locomotive pouvait travailler entre quinze et vingt minutes sur des voies dépourvues de ligne de contact.

Barrages de ballons protecteurs

LA défense aérienne d'un territoire est rendue de plus en plus difficile par l'accroissement de la vitesse et du plafond des avions. Le problème consiste à établir des barrages, de quelque nature que ce soit, à des altitudes assez élevées pour que les appareils assaillants ne puissent les franchir sans danger. On sait que l'on a imaginé à cet effet d'employer des ballons dont le câble d'acier qu'ils supportent, en se tendant sous l'effort produit par l'avion qui le rencontre, diminue la vitesse de celui-ci au point de le mettre en perte de vitesse et de provoquer sa chute (1).

L'efficacité d'un tel barrage dépend à la fois du nombre de ballons mis en service et de leur vitesse ascensionnelle. Est-il possible, pour accroître la rapidité d'établissement de ces barrages, de concevoir des ballons qui, repliés, seraient projetés tout d'abord par une bouche à feu, puis, parvenus au sommet de leur trajectoire, se déplieraient automatiquement et seraient gonflés à l'air chaud, grâce à l'allumage, également automatique, du combustible contenu dans un petit réservoir?

C'est du moins la solution proposée par M. Crillon.

Son idée ingénieuse consiste à utiliser une flèche composée de deux tubes concentriques; le tube intérieur peut s'engager dans l'âme d'un canon, l'autre demeurant à l'extérieur et recevant le ballon convenablement replié autour de lui. Un système de rouleau dévidoir de câble, de détonateur et de réservoir à combustible, contenu dans le tube intérieur, ainsi que deux parachutes, assurent, près de l'arrivée au sommet de la trajectoire, le développement du ballon, l'allumage du combustible (d'où production d'air chaud sous le ballon qui se trouve gonflé comme une Montgolfière), le déroulement du câble formant l'obstacle contre avions, la libération de la flèche et du dévidoir qui tombent, soutenus par leur parachute, et peuvent être récupérés.

L'auteur estime que la portée de ce projectile, lancé par un canon de 130 mm, serait de 5 000 m; altitude atteinte en 30 s environ, et que le ballon monterait ensuite par ses propres moyens jusqu'à 10 000 m environ en quelques minutes. Le ballon pourrait « tenir l'air » pendant plusieurs heures.

Si le comportement d'un tel engin, établi en vraie grandeur, répondait aux espoirs de l'inventeur, il y aurait là certainement un moyen commode de lancer rapidement un grand nombre de ballons sans installation compliquée.

V. RUBOR.

(1) Voir : « Les *ballons à câbles* et la défense active contre les raids aériens » *(Science et Vie*, n° 257, novembre 1938, p. 389).

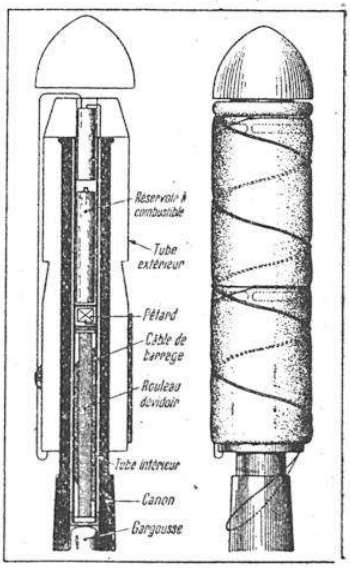


FIG. 2. — LA FLÈCHE DU BALLON PROTECTEUR; VUE EXTÉRIEURE A DPOITE ET EN COUPE A GAUCHE

Le Gérant : L. LESTANG. Impr. Régionale, Toulouse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

NUMÉROS DISPONIBLES

NOUS POUVONS FOURNIR A NOS LECTEURS LES NUMÉROS SUIVANTS :

25, 29, 37, 41, 42, 43, 44, 45, 55, 59, 61, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 99, 102, 103, 106, 108, 109, 111, 112, 113, 116, 117, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 131, 133, 135, 136, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 164, 165, 166, 168, 169, 170, 171, 174, 176, 177, 178, 179, 193, 196, 197, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 225, 226, 227, 231, 234, 235, 237, 238, 239, 244, 262, 263, 264, 265, 268, 270, 271, 272, 273, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 283, 284, 285, 286, 289, 290, 291, 303, 306, 307, 308, 309, 310, 319, 320, 321, 322, 323, 324.

Envoyer **exclusivement par chèque postal** au C. C. Postal Toulouse 184.05 :

— **10 francs** par exemplaire commandé pour les numéros ordinaires;

— **20 francs** pour les numéros spéciaux : **280, 284.**

Nous nous réservons le droit de rembourser les lecteurs dont les commandes ne pourront être assurées, par suite de l'épuisement du stock.

Pour être sûr de lire régulièrement SCIENCE ET VIE, abonnez-vous :

	France	*Étranger*
Envois simplement affranchis	**110** francs	**200** francs
Envois recommandés	**140** francs	**250** francs

Tous les règlements doivent être effectués par chèque postal : 184.05 Toulouse. Nous n'acceptons pas les timbres-poste.

Prière de joindre 3 francs pour les changements d'adresse.

La *table générale des matières* n° 1 à 186 (1913-1932) est expédiée franco contre 25 francs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

SCIENCE ET VIE

MAGAZINE MENSUEL
DES SCIENCES ET DE LEURS
APPLICATIONS A LA VIE
MODERNE

PROVISOIREMENT : 3, Rue d'Alsace-Lorraine, TOULOUSE

IMPR. RÉGIONALE, 39, RUE BAYARD, TOULOUSE A.C.O. 3. 3658

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires