

Inflammations d'huile provoquées par la blessure des câbles électriques

J. LECLERCQ

Ingénieur principal divisionnaire des Mines

avec la collaboration de

V. FIEVEZ

Délégué à l'Inspection des Mines.

O. DEGEYTER

Délégué à l'Inspection des Mines.

SAMENVATTING

De lezer zal hier geen uitvoerige theoretische uiteenzettingen vinden maar slechts een reeks vaststellingen die verricht werden tijdens proeven, die wellicht als enige verdienste hebben de eerste in hun soort te zijn.

Ik dank mijn medewerkers, de HH. FIEVEZ en DEGEYTER voor de zo toegewijde als doelmatige hulp die zij verleenden bij de realisatie der proeven.

Het doel dezer proeven was de voorwaarden te bestuderen waarin een oliestraal door een elektrische boog wordt ontstoken.

Zulke ontvlaming deed zich op accidentele wijze voor in een schacht, doordat een olieleiding onder 6 kg/cm^2 druk en twee naburige elektrische kabels, gelijktijdig beschadigd werden door een zelfde schok; de oliestraal, die uit de beschadigde leiding spoot, werd ontstoken door de kortsluitbogen die ontstonden in de elektrische kabels.

Aan het Nationaal Mijninstituut werd gevraagd het gedrag van een straal lichte olie te bestuderen in tegenwoordigheid van elektrische bogen van verschillende duur en intensiteit.

Vooraf werden proeven gedaan met verdeelde oliestralen in contact te brengen met gloeiende punten van verschillende aard. De olie komt op 6 kg/cm^2 uit een kleine cirkelvormige of lamellaire opening; de kegelvormige of vlak uitgespreide oliestraal is verdeeld in min of meer kleine oliedruppels, maar nooit fijn verstoven zoals bij gasoliebranders of dieselmotoren.

Vervolgens worden de oliestralen gericht op elektrische bogen, in open lucht tussen twee elektroden verwekt. In bepaalde voorwaarden van verdeeldheid ontvlamt de olie in contact met bogen van zeer korte duur, van de orde van enkele milliseconden, en van tamelijk geringe energie. De vlam blijft na de uitdoving van de bogen slechts voortbestaan indien ze gecollecteerd wordt door een scherm, stroomafwaarts van de boog.

Voortgaande op deze resultaten werd het gedrag van gewapende schachtkabels onderzocht, die onder spanning door een hevige schok gekwetst worden, evenals van een verdeelde oliestraal die op de kabel gericht wordt op de plaats van de schok. Deze proeven werden uitgevoerd van februari tot april 1957.

De uitslagen van de reeks van meer dan 200 proeven in 1957 uitgevoerd kunnen als volgt samengevat worden:

De gewapende schachtkabel $3 \times 35 \text{ mm}^2$ of $3 \times 25 \text{ mm}^2$ onder 500 V spanning, ontvangt een slag van de vleugel van een hoekijzer, dat op een zware balk bevestigd is; de schokenergie bedraagt 42 tot 146 kgm.

Indien de uitschakelaar de stroom op ogenblikkelijke wijze onderbreekt, hetzij op 80 à 100 milliseconden, bemerkt men bij de slag een niet zeer hevige bundel gensters. De verdeelde vlakke oliestraal ontsteekt zich in 70 % van de gevallen. Een energie van 42 kgm lijkt de grens te zijn van de niet-ontvlamingen. Een olietemperatuur van minder dan 10° en de afwezigheid van een scherm zijn oorzaak van voorbijgaande vlammen en van niet-ontvlamingen.

De beschadiging van de kabels is haast onmerkbaar en laat slechts een gering aantal gloeiende koperdeeltjes door.

Indien de onderbreking van de stroom tot op enkele seconden vertraagd wordt, zijn de gensters heviger en doen zich uitwendige bogen voor. De olie kan zich nog ontvlammen op de gloeiende punten voortkomende van het smelten van het koper of van het staal.

Op electrisch gebied werden een honderdtal oscillogrammen geregistreerd. Enkele vertonen een kenmerkend verloop en worden in deze studie afgebeeld.

De intensiteit van de kortsluitstroom varieert van 380 tot 550 A en de werking van de uitschakelaar werd bestudeerd in functie van de gemeten stroomsterkten.

Een kortsluiting die op het einde van een kabel met tamelijk grote weerstand ontstaat, veroorzaakt slechts geringe intensiteiten. Men dient zeer omzichtig te zijn bij het beramen van deze kortsluitstromen, ten einde de relais van de uitschakelaars zo goed mogelijk te regelen.

Twee oscillogrammen bewijzen dat indien de ogenblikkelijke uitschakeling geblokkeerd wordt, de kortsluitboog tot verscheidene malen toe kan doven en herleven, waardoor de uitschakeling van de stroom veel meer tijd kan vergen dan voorzien.

Tenslotte hebben wij vastgesteld dat, in de beboelde voorwaarden, de slag op een gewapende kabel met isolatie in papier, bijna altijd een kortsluiting op de drie fasen veroorzaakte indien de schokenergie meer dan 42 kgm bedraagt.

In 1958 werden deze proeven onder preventief oogpunt voortgezet.

A. — Wij hebben de maxima en minima verdelingsvoorwaarden van de olie nagegaan die een ontvlaming toelaten, evenals de factoren die deze verdeling beïnvloeden.

Samenvattend werd vastgesteld dat zich geen ontvlaming meer voordeed :

- a) indien de opening waardoor de olie uitkomt meer dan 10 mm doormeter heeft, hetzij bij een debiet van meer dan 33 liter/minuut bij 6 kg/cm² druk. De straal is alsdan te compact ; zij dooft de bogen, zelfs degene die verscheidene seconden duren ;
- b) indien de opening een doormeter heeft van minder dan 1 mm, hetzij voor een debiet van minder dan 2,72 l/min.

In deze voorwaarden schijnt het geringe debiet een mengsel van fijn verdeelde olie en lucht te vormen dat te arm is om te ontvlammen bij het contact met de vonken.

Deze resultaten worden bevestigd door de proeven met een oliemist, verwekt door een olieverstuiver. Zulke fijn verstoven olie wordt niet ontstoken door de vonken.

De proeven zullen overigens voortgezet worden met oliedrukkingen tot 100 kg/cm², hetzij de drukking van zekere hydraulische toestellen, waarvan het gebruik zeer verspreid is in zekere landen.

De noodzakelijkheid van een collecterend scherm werd vastgesteld.

De temperatuur van de olie beïnvloedt sterk de viscositeit.

B. — Wij hebben in die voorwaarden, olieëmulsiës beproefd, waarvan de viscositeit groot is bij de gewone temperatuur, maar veel geringer bij de gebruikstemperaturen in de hydraulische machines. De ontvlaming van die emulsiës door bogen werd niet bereikt. Nochtans indien dergelijke emulsiës in dunne filmen zijn uitgespreid of zeer verdeeld zijn door porositeit, in een soort wieken, ontvlammen zij zich bij het contact van gloeiende punten, vermoedelijk na het emulsiewater door verdamping te hebben verloren.

C. — Tevens werden nieuwe soorten kabels van Belgische en vreemde fabricatie beproefd.

Zekere kabels met isolatie in P.V.C. of andere synthetische materialen weerstaan veel beter aan mechanische schokken dan de kabels met papierisolatie.

Zekere kabels weerstaan zelfs aan zeer hevige schokken van redelijk grote energie, tot 200 kgm, zonder dat de geleiders worden aangetast. Er doet zich geen kortsluiting voor.

Dit gunstig gedrag mag toegeschreven worden aan de elasticiteit van de isolatie in P.V.C. of plastisch materiaal.

Deze beproevingsvoorwaarden zijn vergelijkbaar met schokken die zich veelvuldig voordoen in de mijn : ontsporing van mijnwagens, val van een ijzeren ondersteuningsraam, steenval, enz...

D. — Proeven werden uitgevoerd met olie te doen branden in besloten midden, hetzij in een kokerleiding van 400 mm doormeter, hetzij in de proefgalerij van het Nationaal Mijninstituut te Paturages, van 2 m² doorsnede.

Wij slaagden erin vlammen van meer dan 40 m lengte in de kokerleiding en van ongeveer 30 m lengte in de proefgalerij te verkrijgen.

De verbranding is steeds onvolledig. Veel olie blijft onverbrand. De rook is buitengewoon dik, zwart en roetachtig, met een hoog gehalte aan CO.

De verbranding van enige liters olie veroorzaakt reeds gevaarlijke roken.

Men kan zich gemakkelijk de invloed op de luchtverversing inbeelden van zulke belangrijke vlammen. Wij menen overigens dat de lengte der vlammen nog kan vergroot worden door een aanvoer van verse lucht in de roken. Wij voorzien de voortzetting van deze proefnemingen met merkelijk hogere oliedrukkingen.

E. — Tenslotte hebben wij gepoogd de olielam te doven door een waterstraal, in een gereconstitueerd gedeelte van een schacht.

De verdeelde oliestraal, met een debiet van 20 l/min brandt met een vlam van 7 à 8 m hoogte.

Zolang de olievoeding duurt, slagen de pompiers er niet in de vlam te doven met een lans die meer dan 800 l water per minuut geeft, zelfs indien de waterstraal van op 3 m afstand op de opening wordt gericht die de oliestraal doorlaat.

RESUME

Le lecteur ne trouvera pas ici de longs développements théoriques mais uniquement une série d'observations résultant d'essais, qui, je le crains, n'ont pour mérite que d'être les premiers dans ce domaine.

Je remercie mes collaborateurs, MM. FIEVEZ et DEGEYTER, pour l'aide aussi dévouée qu'éclairée qu'ils m'ont apportée dans la réalisation des expériences.

Ces essais ont eu pour but la recherche des conditions d'inflammation d'un jet d'huile par un arc électrique.

Une telle inflammation s'est produite accidentellement dans un puits, au moment où une conduite d'huile légère sous pression de 6 kg/cm², et deux câbles électriques disposés au voisinage de celle-ci, furent simultanément endommagés par un choc mécanique : un jet d'huile, s'échappant de la conduite, s'enflamma au contact des arcs qui avaient jailli par l'effet du choc.

Nous avons demandé à l'Institut National des Mines d'étudier le comportement d'un jet d'huile minérale légère sous pression en présence d'arcs électriques de durée et d'intensité diverses.

Ces essais eurent d'abord pour but l'étude du comportement d'un jet d'huile divisé au contact de points chauds divers. Le jet d'huile sort sous une pression de 6 kg/cm² par un petit orifice circulaire ou lamellaire ; le cône ou la nappe d'huile est divisé en gouttes plus ou moins fines, mais n'est jamais pulvérisé en brouillard comme c'est le cas dans les brûleurs des foyers à mazout ou les moteurs Diesel.

Ensuite, ces jets ont été projetés sur des arcs électriques provoqués à l'air libre entre deux électrodes ; dans certaines conditions de division, on a enflammé l'huile au contact d'arcs de très courte durée, de l'ordre de quelques millisecondes, et d'énergies relativement faibles ; la flamme ne persiste après extinction des arcs que si elle est collectée par un écran, situé en aval de l'arc.

A la suite de ces expériences, nous avons étudié le comportement sous tension des câbles armés de puits de mine, sous l'effet d'un choc violent, ainsi que le comportement d'une nappe d'huile divisée et projetée sur le câble à l'endroit du choc. Ces essais ont été effectués de février à avril 1957.

On peut résumer sommairement comme suit cette série de plus de 200 essais effectués en 1957.

Le câble armé de mine, 3 × 35 mm² ou 3 × 25 mm², est, sous la tension de 500 volts, frappé généralement par l'aile d'une cornière solidaire d'une très grosse poutrelle, avec une énergie qui a varié de 42 à 146 kgm.

Quand le disjoncteur coupe le courant d'une façon « instantanée » soit en 80 à 100 millisecondes, il y a, au moment du choc, une gerbe d'étincelles, peu spectaculaire ; la nappe divisée d'huile, projetée sur ces étincelles, s'enflamme dans 70 % environ des cas ; une énergie de 42 kgm paraît être le seuil des non-inflammations ; une température de l'huile de moins de 10°, ainsi que l'absence d'un écran, sont la cause d'un certain nombre de flammes fugaces et de non-inflammations.

La blessure des câbles est peu marquée et ne livre passage qu'à une faible quantité de particules de cuivre incandescentes.

Quand la rupture du circuit par le disjoncteur est retardée à quelques secondes, la gerbe d'étincelles est plus abondante et s'accompagne d'arcs extérieurs. L'huile peut encore s'enflammer sur les points chauds résultant de la fusion du cuivre ou de l'acier.

Au point de vue électrique, une centaine d'oscillogrammes ont été enregistrés ; quelques-uns d'entre eux, représentant des types caractéristiques, sont reproduits dans cette étude.

L'intensité des courants de court-circuit a varié de 380 à 550 A et le comportement du disjoncteur a été étudié en fonction de ces intensités mesurées.

Un court-circuit, éclatant en bout de ligne dans un câble assez résistant, provoque des intensités relativement faibles : il faut être très prudent dans l'estimation de ces courants, afin de régler au mieux les relais des disjoncteurs.

Deux oscillogrammes reproduits dans l'étude montrent que, si le déclenchement instantané est bloqué, le court-circuit peut disparaître momentanément et à plusieurs reprises, apportant au fonctionnement du disjoncteur un retard qui pourrait être beaucoup plus grand que celui prévu.

Enfin, nous avons noté que, dans les conditions décrites, un choc sur un câble armé avec isolement au papier, provoquait, dans presque tous les cas, un court-circuit intéressant immédiatement les trois conducteurs, si le choc toutefois a une énergie suffisante, soit de plus de 42 kgm.

Nous avons, en 1958, poursuivi ces essais au point de vue préventif.

A. — Nous avons recherché les conditions maxima et minima de division de l'huile, ainsi que les facteurs influençant cette division, qui pouvaient permettre une inflammation.

En résumé, nous avons constaté qu'il n'y avait plus inflammation :

- a) si l'orifice débitant l'huile avait un diamètre supérieur à 10 mm, soit un débit supérieur à 33 litres/minute, pour une pression de 6 kg/cm² ; le jet paraît alors trop compact et éteint les arcs, même ceux qui durent plusieurs secondes ;
- b) si l'orifice débitant l'huile a un diamètre inférieur à 1 mm, soit pour un débit inférieur à 2,72 litres/minute. Il semble dans ces conditions qu'un débit aussi faible d'huile provoque au contact des étincelles un mélange d'huile très divisée et d'air, mais qui ne s'enflamme plus parce que trop pauvre en combustible.

Ces essais sont confirmés par les résultats obtenus avec un brouillard d'huile, produit par un pistolet graphéur ; cette huile pulvérisée en brouillard ne s'enflamme pas au contact des étincelles.

Nous continuerons d'ailleurs ces essais en utilisant une pression supérieure, de plus de 100 kg/cm², soit la pression rencontrée dans certaines huiles utilisées comme fluides hydrauliques ; cet usage d'huile est très courant, surtout dans certains pays étrangers.

La nécessité de la présence d'un écran collecteur a été constatée.

La température de l'huile influence la viscosité d'une façon prépondérante.

B. — Nous avons, dans ces conditions, expérimenté des émulsions d'huile, dont la viscosité est grande aux températures ambiantes, mais cependant plus faible aux températures d'emploi dans les machines hydrauliques ; nous n'avons pas obtenu d'inflammation de ces émulsions dans les arcs, même prolongés. Toutefois, si de telles émulsions sont répandues en minces pellicules, ou sont très divisées par porosité, dans des espèces de mèches, elles s'enflamment au contact de points chauds, probablement après avoir perdu leur eau par évaporation.

C. — Nous avons essayé des câbles de fabrication nouvelle, belge et étrangère.

En résumé, nous avons constaté que certains câbles, dont les isolants sont en polyvinyle ou autre matière synthétique, résistent beaucoup mieux mécaniquement aux chocs que les câbles isolés au papier.

Certains mêmes résistent à des chocs sévères et d'une énergie déjà grande : 200 kgm, sans que les conducteurs soient affectés : il n'y a pas de court-circuit.

On peut attribuer ce résultat encourageant à l'élasticité des gaines, en polyvinyle ou matières plastiques, qui forment un matelas amortisseur.

Ces conditions d'essais reproduisent des chocs qui se présentent fréquemment dans la mine : déraillement d'un wagonnet, chute d'un cadre métallique, de pierres...

D. — Nous brûlons de l'huile en milieu confiné, soit dans une conduite constituée de buses de 400 mm de diamètre, soit dans la galerie d'essais de l'Institut National des Mines à Pâturages, de 2 m² de section. Nous sommes parvenus à obtenir des flammes de plus de 40 m de longueur dans la conduite de buses, et de quelque 50 m de longueur dans la galerie d'essais. La combustion est toujours incomplète ; beaucoup d'huile échappe à la combustion. Les fumées sont extraordinairement abondantes, noires, chargées de suies et contiennent un pourcentage élevé de CO. La combustion de quelques litres d'huile provoque déjà un nuage de fumées dangereuses.

On imagine bien la perturbation apportée dans l'aérage par un volume aussi important de feux. Nous pensons qu'il y a moyen d'étendre encore la longueur de la flamme en introduisant dans le circuit des fumées un apport d'air frais. Nous comptons continuer ces expériences en utilisant une pression d'injection d'huile beaucoup plus élevée.

E. — Enfin, nous avons tenté d'éteindre, avec un jet puissant d'eau, un incendie d'huile provoqué dans un tronçon reconstitué de puits.

L'huile divisée comme relaté ci-dessus, d'un débit de 20 litres/minute, brûle en flamme de 7 à 8 m de hauteur. Pendant que dure l'alimentation en huile, les pompiers ne parviennent pas à éteindre l'incendie, avec une lance débitant plus de 800 litres d'eau/minute, alors même qu'ils peuvent diriger le jet d'eau, d'une distance de 3 m, sur l'orifice débitant l'huile enflammée, et cela pendant tout le temps que dure l'alimentation en huile.

SOMMAIRE

I. — Essais effectués en 1957	60
Dispositif expérimental	60
Résultats des expériences	65
A. — Au point de vue inflammation	65
B. — Au point de vue électrique	68
C. — Effets calorifiques des arcs sur les câbles	75
D. — Influence de ces effets calorifiques sur l'inflammation de l'huile	75
E. — Influence de la pression unitaire de choc	76

I. — Essais effectués en 1957

A la suite d'expériences effectuées par l'Institut National des Mines, nous avons commencé le 14 février 1957, une série d'essais destinés à étudier, d'une part, le comportement d'un câble armé électrique de puits de mine sous un choc et sous tension et, d'autre part, le comportement d'une nappe d'huile plus ou moins divisée projetée sur le câble à l'endroit du choc.

Dispositif expérimental.

1. Le mouton (fig. 1).

1.1. Dispositif.

Le mouton destiné à blesser le câble électrique sous tension est essentiellement constitué par une

poutrelle P dont l'extrémité B s'articule par une charnière sur un encadrement métallique.

Sur cet encadrement métallique, constitué de cornières, est monté un portique auquel est fixée une poulie. Ceci permet de relever l'extrémité A de la poutrelle P par l'intermédiaire d'un câble y attaché, passé sur la poulie et balé ou relâché par un palan.

Une fois la poutrelle soulevée par ce moyen à la hauteur désirée, on place une béquille soutenant la poutrelle. On détache le câble de l'extrémité A et la poutrelle est maintenue en équilibre assez instable sur la béquille. Pour que la poutrelle tombe brusquement, il suffit de tirer sur la béquille qui se dérobe sous la charge.

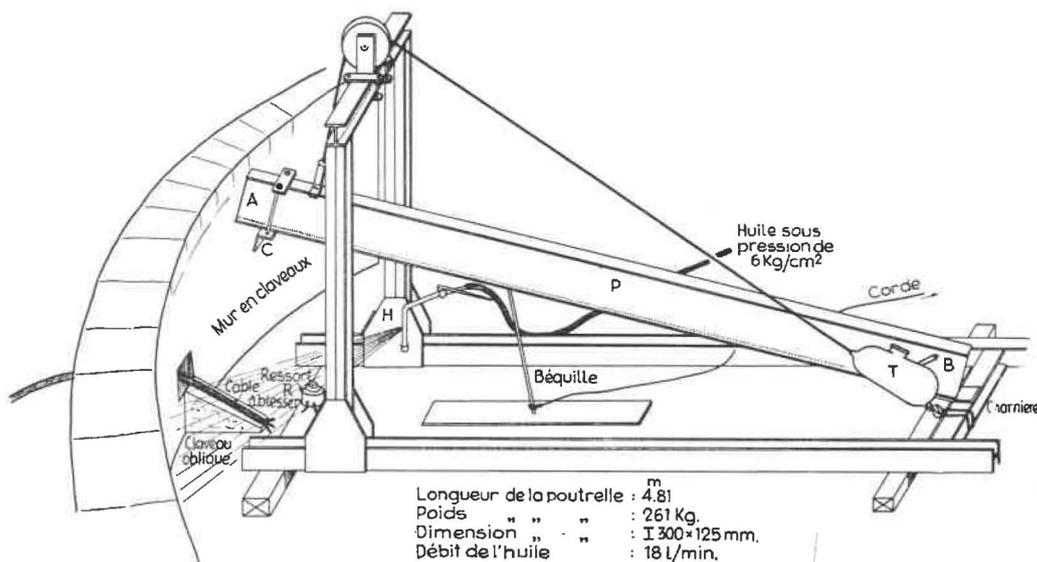


Fig. 1.

A l'extrémité A de la poutrelle P, nous avons placé une cornière C qui nous a servi dans un certain nombre de nos expériences à blesser le câble de façon localisée.

Nous décrivons plus loin les autres procédés utilisés pour blesser le câble.

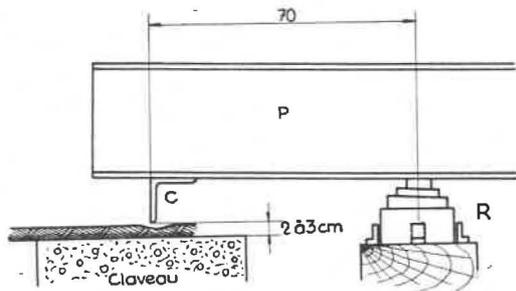


Fig. 2.

Nous avons placé également à l'aplomb de la poutrelle un ressort R en hélice disposé de telle façon que la poutrelle, après la chute, puisse être relevée de 2 à 3 cm (fig. 2). De cette manière, la cornière C ne reste pas sur la blessure du câble. En effet, sauf dans le cas où le câble est posé horizontalement au sol, l'objet blessant le câble ne reste pas en contact avec ce dernier.

Un jet d'huile arrive sur le câble à l'endroit où il doit être blessé.

1.2. Energie du choc dans nos essais.

L'énergie du choc peut être estimée comme étant le produit du poids de la poutrelle par le déplacement de son centre de gravité. Pour une hauteur de chute de 0,80 m, l'énergie du choc est de :

Poids de la poutrelle : $54,2 \text{ kg} \times 4,8 = 260,7 \text{ kg}$

Déplacement du centre de gravité : 0,40 m

Energie : $260,7 \text{ kg} \times 0,40 \text{ m} = 104,3 \text{ kgm}$

Pour une hauteur de chute de 0,40 m, cette énergie est de 52,1 kgm.

L'étude complète du problème amènerait à considérer le travail de la réaction du câble sur le mouton et ces travaux peuvent être négligés parce que le déplacement de ces appuis, qui est un des facteurs du travail, est faible.

Il faut retrancher aussi :

a) le travail de la réaction à la charnière B ;

b) l'énergie absorbée par le ressort (fig. 2) qui s'affaisse de quelque 2 à 3 cm, sous le poids de la poutrelle, pendant que la cornière pénètre dans le câble.

Il s'agit d'un ressort de butoir de wagons dont l'étalonnage a été fait à l'Institut National des Mines. Cet étalonnage donne en abscisses la flèche et en ordonnées l'effort F (fig. 3). La loi de variation n'est pas linéaire comme on pourrait s'y attendre.

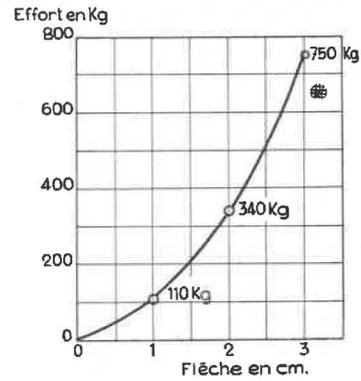


Fig. 3.

L'énergie maximum est $\int_0^3 F \text{ de}$

Si la loi était linéaire, cette énergie serait de $\frac{750 \text{ kg}}{2} \times 0,03 = 375 \times 0,03 = 11,2 \text{ kgm}$; elle est représentée par la surface d'un triangle.

L'énergie est un peu inférieure à cette valeur du fait de la concavité de la courbe.

Pour une hauteur de chute de 0,80 m, l'énergie de choc serait de $104,3 \text{ kgm} - 10,5 \text{ kgm} = 94 \text{ kgm}$.

Pour une hauteur de chute de 0,40 m, cette énergie serait de $52,1 \text{ kgm} - 10,5 \text{ kgm} = 42 \text{ kgm}$.

1.3. Organe de choc.

Dans une première série d'essais, nous avons muni l'extrémité A d'une cornière C de 120 mm \times 120 mm et de 10 mm d'épaisseur. Cette cornière écrase le câble reposant sur un claveau en béton horizontal (fig. 4).

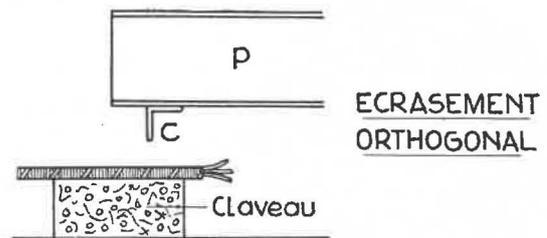


Fig. 4.

Cependant, pour figurer le choc sur un câble disposé le long de la paroi oblique de raccord d'un envoi au puits, nous avons, dans une autre série d'essais, laissé tomber la cornière sur un claveau en

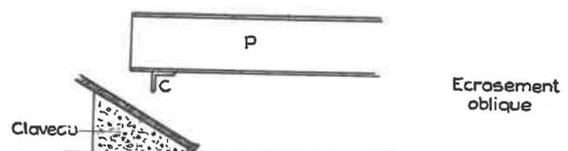


Fig. 5.

béton à paroi oblique à 30° environ sur l'horizontale (fig. 5).

Nous avons étendu notre étude à des essais de coincement : le câble descend verticalement, contre une cornière disposée le long du mur en claveaux ; l'extrémité A de la poutrelle coince, en tombant, le câble contre la cornière (fig. 6 A).

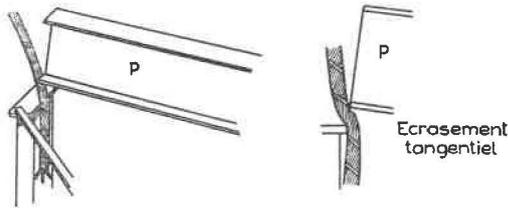


Fig. 6a.

Enfin, nous avons recherché l'influence éventuelle d'une diminution de pression unitaire de choc ; dans cette série d'essais, nous avons abandonné la cornière attachée à la poutrelle ; l'aile de cette poutrelle tombe à plat sur le câble, lui-même disposé sur le bourrelet d'un rail de 17 kg par mètre ; les directions du câble et du rail sont obliques l'une par rapport à l'autre (fig. 6 B).

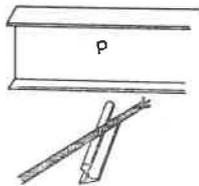


Fig. 6b.

2. Câbles.

Les câbles essayés sont des bouts de câble armé de mine, de $3 \times 25 \text{ mm}^2$ ou de $3 \times 35 \text{ mm}^2$, avec isolement au papier imprégné et gaine en plomb (fig. 6 C).

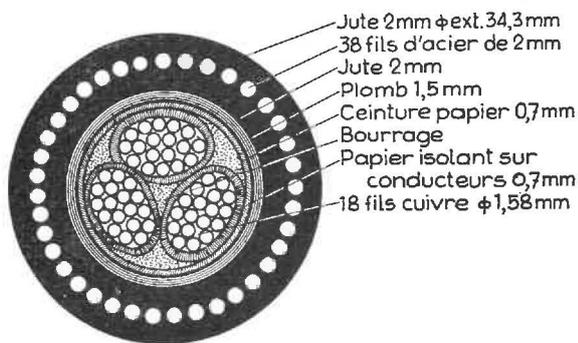


Fig. 6c.

Dans les 12 premiers essais, nous avons, en bout de ligne, alimenté un moteur asynchrone de 50 ch tournant à vide, dont nous parlerons dans la partie électrique.

Les essais suivants ont été effectués avec un câble ouvert en bout de ligne.

3. Projection d'huile.

Nous avons projeté de l'huile sur le câble à l'endroit où il reçoit le choc. Cette projection d'huile

sous la pression de 6 kg/cm^2 avant, pendant et après le choc, dure tout le temps de l'expérience.

L'huile est contenue dans un réservoir cylindrique, posé verticalement, alimenté à son sommet par une arrivée d'air comprimé à 6 kg/cm^2 . De la base du réservoir partent un ou deux flexibles de 15 mm de diamètre, amenant l'huile à la lance. Cette lance, qui se termine par un bouchon, est entamée par un trait de scie transversal, créant un orifice rectangulaire de $0,8 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$. Une nappe d'huile s'échappe de l'orifice sous forme d'éventail ; son débit est de 17,96 litres/minute, soit 18 litres/minute à la température de 20° .

Le jet en éventail ainsi projeté est dirigé sur l'endroit de rencontre câble-poutrelle.

L'analyse des huiles utilisées a été faite par l'Institut National des Mines (tableau 1).

TABLEAU I.

	Huile neuve pour balance	Huile usagée d'inverseur	
		brute	filtrée
Densité à 15°	0,907	0,909	0,909
Point d'éclair (vase ouvert)	192°	160°	160°
Point de combustion	223°	184°	188°
Viscosité Engler			
à 20°	$5,96^\circ$	$8,09^\circ$	$6,89^\circ$
à 50°	$2,02^\circ$	—	—
à 100°	$1,208^\circ$	—	—

La distance entre l'orifice de projection et l'endroit où le câble est blessé, est de 60 à 92 cm.

Le point d'impact de la poutrelle sur le câble se trouve à 0,40 m de distance d'un mur en claveau de béton de 1,30 m environ de hauteur et formant arc de circonférence de 3,50 m de diamètre. La corde sous-tendant cet arc mesure 2 m environ.

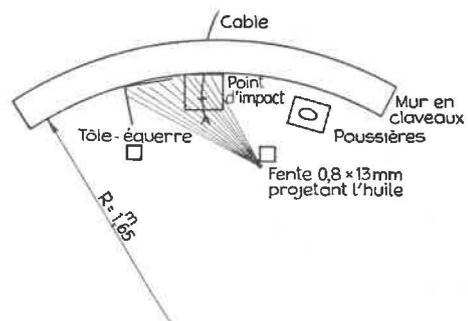


Fig. 7a.

Comme le jet d'huile arrive obliquement vis-à-vis de ce mur, nous avons placé une tôle équerre à une distance de 0,60 à 0,75 m du point d'impact et sur le côté (fig. 7 A).

4. Projection de poussières.

Pour rechercher l'influence possible d'un nuage de poussières qui se mélange à l'huile projetée, nous avons, lors de 30 expériences, disposé environ 1 dm^3 de poussières très fines sur un claveau (fig. 7 A) voisin de la fente débitant l'huile. A l'aide d'un boyau à air comprimé, on provoque un nuage de poussières dans la nappe d'huile et on maintient le nuage pendant la production de l'arc et après, c'est-à-dire pendant la durée de l'essai.

La « folle farine » employée a la composition suivante :

- 14,9 % matières volatiles
- 13,6 % de cendres
- 1,5 % d'eau.

Quelques essais d'inflammation des poussières seules dans l'arc électrique ont été tentés, et n'ont pas donné d'inflammation.

5. Projection d'eau.

Un pulvérisateur à eau a été disposé à 2,20 m de hauteur, puis 1,70 m au-dessus du point d'impact.

L'eau divisée a été déversée après inflammation, afin de se rendre compte si elle pouvait éteindre l'incendie.

Nous avons ensuite fait pleuvoir le pulvérisateur pendant plusieurs minutes avant la production de l'arc, en maintenant cette pluie divisée pendant tout l'essai.

Enfin, nous avons concentré cette pluie sur le point d'impact en disposant, sur les montants de la charpente, à 1,40 et 1,60 m de hauteur, d'un côté le pulvérisateur déjà utilisé et, de l'autre côté, une pomme d'arrosoir des bains douches (fig. 7 B).

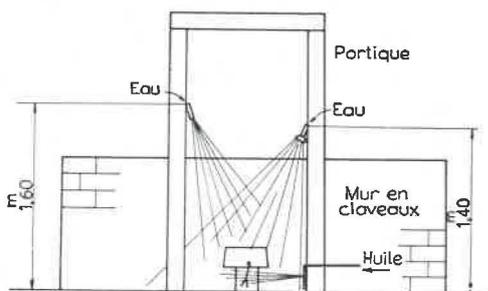


Fig. 7b.

Le débit des deux dispositifs est de l'ordre de 20 litres/min.

6. Schéma électrique (fig. 8).

Nous avons branché ce câble aux bornes à 525 V d'une sous-station.

Quittant ces barres, nous rencontrons successivement :

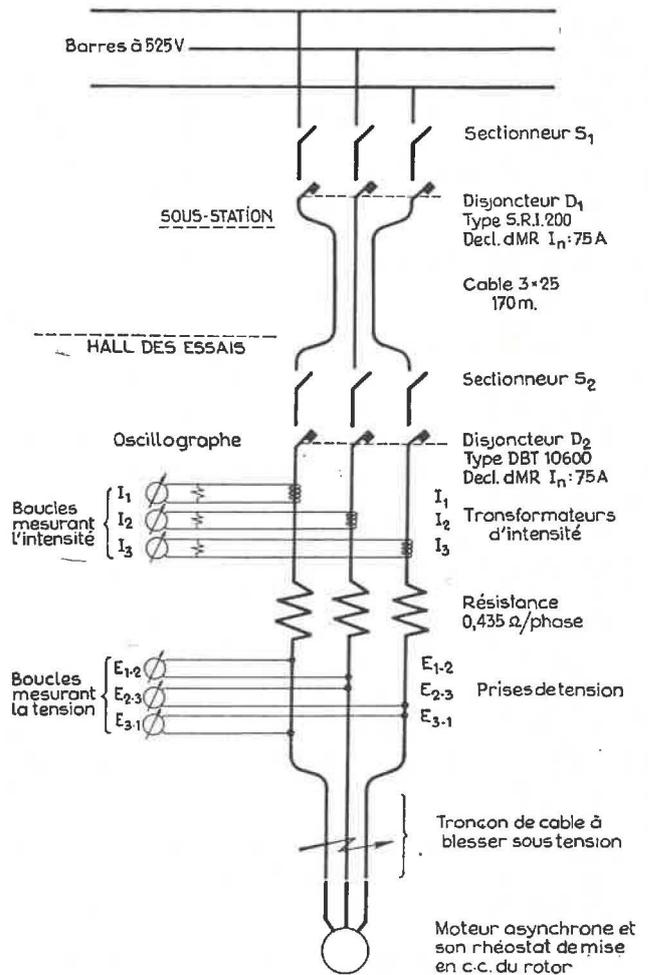


Fig. 8.

- 1 sectionneur triphasé S_1
- 1 disjoncteur triphasé D_1 à huile type S.R. 1.200 commandé par deux déclencheurs type dMR (75 A d'intensité nominale)
- 1 câble 3×25 , triphasé de 170 m environ de longueur amenant la puissance, sous le hall des essais
- 1 sectionneur S_2
- 1 disjoncteur triphasé D_2 à huile type DBT 10.600 commandé par 3 déclencheurs type dMR (75 A d'intensité nominale) et 1 bobine à minima de tension
- des résistances (éléments de fonte) à raison de 0,58 ou 0,435 ohm par phase
- 1 câble de faible longueur amenant la puissance au tronçon de câble à blesser sous le mouton
- 1 tronçon de câble à essayer
- 1 moteur en bout de ligne, ce moteur étant ou n'étant pas raccordé suivant les expériences.

7. Sources d'énergie.

En général, nous avons utilisé 2 transformateurs 5900/515 V, couplés en parallèle, de 450 kVA chacun.

Le 15 février 1957, nous avons disposé de 4 transformateurs totalisant une puissance de 2.000 kVA.

Enfin, les 20, 21, 22 mars et le 4 avril 1957, nous avons utilisé un seul transformateur, en branchant les prises de façon à disposer de 510 V au secondaire, tension la plus basse qu'il nous a été possible d'atteindre dans les conditions actuelles de charge du réseau.

8. Transport de l'énergie.

A partir de la centrale, nous avons amené l'énergie à notre station par un câble de 170 m de longueur et de $3 \times 25 \text{ mm}^2$.

Dans chacune des phases de ce câble, nous avons inséré une résistance robuste en fonte de 0,58 ohm pouvant varier de 0,145 en 0,145 ohm.

Ces résistances ont été introduites pour tenir compte des impédances du tronçon de câble compris entre la surface et l'endroit du choc.

On a remarqué que la self de câble était peu importante par rapport à sa résistance.

Ces résistances sont en fonte.

Elles ont été mesurées au plancher d'essais, avec un appareillage de haute précision; la résistance de chaque élément est de 0,145 ohm, à la température ordinaire.

Ces résistances varient avec la température; au plancher d'essai, une très forte intensité a été maintenue pendant 15 secondes sans que les résistances ne rougissent.

La plupart de nos essais ont été effectués avec disjonction « instantanée », le courant n'était donc maintenu sur les résistances que pendant 0,1 seconde, avec intervalle de 10 minutes. Les résistances n'ont pas chauffé et la valeur de 0,145 ohm par élément peut être considérée comme exacte.

9. Récepteur alimenté par le câble.

Les moteurs alimentés par un des câbles étaient en marche au moment de l'accident.

Pour rechercher l'influence que peut avoir, à l'endroit de la blessure d'un câble, le moteur en marche qu'il alimente, nous avons, dans certains de nos essais, fait débiter le câble éprouvé sur un moteur de 50 ch; ce moteur asynchrone, à rotor bobiné, tournait à vide.

Quand on met en court-circuit les conducteurs d'alimentation d'un moteur asynchrone, le flux rotorique ne disparaît pas immédiatement et le moteur fonctionne pendant un certain temps en génératrice, il renvoie en amont dans le défaut de court-circuit, un courant appréciable qui subsisterait dans le défaut après la disjonction dans l'alimentation en amont du défaut.

Pour étudier ce phénomène, nous avons disposé en bout de ligne, un moteur de 50 ch; à défaut de moteur à « cage d'écurie », nous avons placé un

moteur asynchrone à rotor bobiné. Nous avons fait tourner ce moteur à vide.

La plupart des essais ont été effectués avec un câble ouvert en bout de ligne, ceci dans le but de multiplier les essais. Avec moteur en bout de ligne, il était nécessaire en effet, pour chacun d'eux, de faire un nouveau raccord de câble, opération assez longue.

10. Disjoncteurs.

Le disjoncteur D₂ (fig. 8) est un disjoncteur neuf, triphasé, tripolaire à bain d'huile, type DET 10.600, de 10.000 V maximum avec un pouvoir de coupure de 100.000 kVA sous 10.000 V.

Il est équipé de trois déclencheurs également neufs du type dMR. Ce sont des déclencheurs électromagnétiques, à maximum de courant, et action directe sur les tiges de traversée des disjoncteurs.

Rappelons que, pour ces types, le temps de déclenchement est indépendant de l'intensité.

L'intensité nominale est de 75 A; la surcharge peut être fixée de 90 à 150 A; nous avons choisi 150 A. Le courant de court-circuit peut être réglé de $4 \times 75 = 300 \text{ A}$ à $8 \times 75 = 600 \text{ A}$; nous avons, dans nos essais, fait varier cette intensité à 375, 400, 450 et 600 A.

Le temps de retard est de 0 à 6 sec; nous avons choisi, soit 2, soit 6 sec.

Deux réglages sont encore possibles: CCI (déclenchement instantané en cas de court-circuit) ou CCR (blocage de ce déclenchement instantané).

Rappelons le principe de la disjonction:

Pour un réglage: surcharge: 150 A, 2 sec. CCI: 375 A.

— Le disjoncteur fonctionne en deux secondes ($\pm 10 \%$) quand le courant qui traverse le déclencheur est compris entre 150 A ($\pm 5 \%$) et 375 A ($\pm 10 \%$) et il déclenche en « instantané » quand le courant dépasse 375 A ($\pm 10 \%$).

Pour un réglage: surcharge: 150 A, 2 sec. CCR: 375 A.

— Le disjoncteur fonctionne en 2 sec quand le courant dépasse 150 A.

Ce retard de 2 sec est maintenu même si le courant dépasse 375 A.

Le disjoncteur D₂ est aussi muni d'une bobine à minimum de tension. Pendant les 43 premiers essais, cette bobine était branchée sur les barres d'arrivée du disjoncteur D₂.

A partir du 44^e essai, nous avons déconnecté les bobines à minimum de tension et les avons alimentées par une source indépendante, de façon à nous permettre de provoquer volontairement le déclenchement du disjoncteur D₂ en cas de non-fonctionnement des déclencheurs.

De cette façon, nous avons pu étudier le comportement des seuls déclencheurs à maximum de cou-

rant, l'influence possible du minimum de tension étant supprimée.

A partir de l'essai 58, nous avons calé le disjoncteur D_1 de tête, qui a été muni de deux nouveaux déclencheurs identiques à ceux du disjoncteur D_2 .

Ceci nous a permis d'étudier le comportement des seuls déclencheurs à maximum de courant du disjoncteur D_2 .

11. Oscillographe.

Nous avons à notre disposition un oscillographe à 6 boucles, nous permettant ainsi l'étude des intensités et tensions dans chacune des trois phases, avant, pendant et après la blessure du tronçon de câble essayé.

Cet appareil, dont les organes vitaux sont les « boucles », permet l'enregistrement des phénomènes sur papier photographique. On utilise des ampèremètres ressemblant en principe à l'appareil Deprez d'Arsonval, mais où l'inertie de l'équipage mobile, appelé « boucle », est excessivement réduite de manière à pouvoir suivre toutes les fluctuations du courant, même de fréquence élevée. Ces boucles portent un petit miroir qui renvoie le spot lumineux sur le papier photographique enregistreur placé sur un tambour qui tourne à une vitesse constante mais réglable à volonté.

De cette manière, avec six boucles, nous avons pu enregistrer 6 grandeurs : 3 intensités (celles du courant dans chacune des phases) et 3 tensions (celles régnant entre phases prises 2 à 2).

Les boucles devant enregistrer les intensités sont shuntées et raccordées au secondaire de transformateurs d'intensités placés sur chacune des phases du circuit principal à la sortie du disjoncteur D_2 (fig. 8).

Les boucles devant enregistrer les tensions sont branchées entre les phases prises 2 à 2 à l'issue des résistances mises en ligne.

La vitesse réglable du tambour enregistreur permet d'étaler plus ou moins le phénomène.

Pour pouvoir utiliser les enregistrements avec un maximum de profit, il faut pouvoir y mesurer les valeurs atteintes tant en intensité qu'en tension. Il fallait donc effectuer régulièrement et soigneusement les étalonnages en intensité et en tension.

De cette manière, nous pouvons dire que tant de millimètres sur le diagramme représentent tant de volts ou tant d'ampères.

La bande de papier photographique est peu large et nous avons dû superposer chaque fois l'enregistrement des intensités à celui des tensions pour avoir sur ce diagramme des amplitudes de phénomène que l'on puisse mesurer sans erreur exagérée.

Résultats des expériences.

A. Au point de vue inflammation.

1^{re} série.

La nomenclature des essais ci-dessous a été arrêtée au 2 mars 1957. Nous avons exécuté un grand nombre d'essais avec un réglage en CCI à notre disjoncteur. Ceci a entraîné, pour ces essais, un déclenchement au bout de 80 à 100 millisecondes.

Quand on ne projette pas d'huile, on remarque souvent, au moment du choc, un jet d'étincelles sortant du câble à l'endroit de l'impact ; dans ces conditions de disjonction, le jet est, soit insignifiant, soit plus important, mais en tous cas peu spectaculaire. Le câble n'est pas sectionné : il est aplati ; la section écrasée est plus ou moins elliptique et sa hauteur vaut environ la moitié du diamètre initial du câble. Il n'y a pas de fils d'armature coupés.

D'autre part, nous avons exécuté 15 essais avec huile et avec réglage en CCR de notre disjoncteur.

1. Essai avec réglage CCI des déclencheurs.

Les essais ci-après ont été effectués avec projection d'huile « de balance » par une fente de $0,8 \times 13$ mm, disposée à une distance de 0,60 à 0,90 m de l'impact, donnant une nappe d'huile horizontale plus ou moins divisée.

La température de l'huile a varié de 13° à 22° C. La disjonction dite instantanée a été assurée en 80 à 100 millisecondes.

1.1. Ecrasement orthogonal par la cornière sur clavier horizontal (tableau II).

TABLEAU II.

Hauteur en m	Nombre d'essais	Nombre d'inflammations	Nombre de non-inflammations	Flamme fugace	Ratés
0,35	2	0	2	0	0
0,40	1	1	0	0	0
0,50	4	3	0	1	0
0,60	2	2	0	0	0
0,80	2	1	1	0	0
1,00	2	2	0	0	0
	13	9	3	1	0
	100 %	69 %	23 %	8 %	

Nous appelons inflammation, une flamme se maintenant tant que l'alimentation en huile se poursuit, et qui donc se stabilise.

Nous appelons « flamme fugace » une inflammation de l'huile sur l'arc, mais inflammation qui s'éteint d'elle-même.

Nous avons considéré comme « ratés » les expériences qui, pour une raison ou l'autre, ne peuvent être prises en considération.

On remarque l'influence de la hauteur de chute : pour plus de 0,40 m, l'inflammation est quasi certaine, l'énergie mise en jeu est dans ce cas de l'ordre de 42 kgm.

Pour des hauteurs plus petites, les câbles sont peu blessés et il n'y a pas de jet visible d'étincelles.

1.2. Ecrasement oblique de la cornière sur claveau incliné (tableau III).

TABLEAU III.

Hauteur de chute	Nombre d'essais	Nombre d'inflam-mations	Nombre de non-inflam-mations	Flamme fugace	Ratés
0,80 m	17	11	1	3	2
	100 %	64,8 %	5,9 %	17,6 %	11,7 %

Pour deux de ces flammes fugaces, il y a eu interruption intempestive de l'alimentation en huile au moment de la production de l'arc ; pour l'autre, la température de l'huile était de 10°.

1.3. Coincement tangentiel (tableau IV).

TABLEAU IV.

Hauteur de chute	Nombre d'essais	Nombre d'inflam-mations	Nombre de non-inflam-mations	Flamme fugace	Ratés
0,80 m	12	1	5	1	5

Pour les ratés, il n'y a pas eu d'étincelles visibles ; le disjoncteur n'a pas fonctionné et les oscillogrammes ne montrent pas de court-circuit. La pièce d'appui se dérochant lors du choc, laisse passer la poutrelle avec un jeu de l'ordre de l'épaisseur du câble.

Pour les non-inflammations, nous avons observé que la poutrelle, en éraflant le câble, le cache par sa masse et empêche l'huile d'atteindre l'endroit blessé.

Ces essais seront repris ultérieurement.

1.5. Ecrasement oblique sur coupon de rail de 17 kg/mct.

Trois essais ont été effectués avec disjonction instantanée. La hauteur de chute a été de 1 à 1,50 m.

On a enregistré : 1 inflammation, 1 non-inflammation et 1 flamme fugace, ces expériences ayant été faites sans la tôle équerre formant écran.

Les essais ci-après ont été faits dans les mêmes conditions, c'est-à-dire avec disjonction dite instantanée et projection d'huile par la fente de 0,8 × 13 mm, mais on a introduit dans le jet d'huile un nuage de poussières, puis un nuage de poussières et de l'eau, avant et pendant l'essai, de l'eau après inflammation, enfin de l'huile seule et de l'eau.

Toutes ces expériences ont été faites avec écrasement oblique et une hauteur de chute de 0,80 m (conditions 1.2.) (tableau V.).

La flamme paraît encore plus violente avec le nuage de poussières.

L'eau déversée avant l'expérience n'empêche pas l'inflammation.

2. Essais avec réglage en position CCR des déclencheurs.

Nous avons exécuté 15 essais avec projection d'huile de 15 à 20°, avec ou sans projection d'eau et de poussières, et écrasement oblique décrit en 1.2.

Les résultats sont condensés au tableau VI.

TABLEAU V.

	Nombre d'essais	Inflam-mations	Non-inflam-mations	Flamme fugace	Ratés
Huile + poussières	2	2	0	0	0
Huile + poussières + eau préalable	7	7	0	0	0
Huile + poussières + eau après	6	5	1	0	0
Huile + eau préalable	5	4	1	0	0
Totaux :	20	18	2	0	0
	100 %	90 %	10 %		

TABLEAU VI.

	Nombre d'essais	Inflam-mations	Non-inflam-mations	Flamme fugace	Ratés
Huile seule	2	1	0	1	0
Huile + poussières	4	4	0	0	0
Huile + poussières + eau préalable	3	3	0	0	0
Huile + poussières + eau après	5	5	0	0	0
Huile + eau préalable	1	1	0	0	0
Total :	15	14	0	1	0
soit	100 %	93 %	0 %	7 %	0 %

Ceci prouve nettement que l'huile s'enflamme « a fortiori » dans de semblables conditions, ce qui est naturel.

3. Essais des 20, 21, 22 mars. — 2^e série.

Ces essais ont été effectués pour étudier le comportement de l'huile de transformateurs, soit neuve, soit usée, dans l'arc électrique.

Les conditions d'essais sont les mêmes qu'en 1.2, c'est-à-dire :

fente de $0,8 \times 13$ mm

température huile de 15 à 25° C

écrasement oblique de la cornière sur claveau - incliné.

Nous ne disposons plus à ce moment de l'oscillographe.

Résultats :

TABLEAU VII.
Huile neuve.

Hauteur	Nombre d'essais	Nombre d'inflam-mations	Nombre de non-inflam-mations
0,40 m	1	0	1
0,50 m	3	1	2
0,60 m	2	2	0
0,80 m	1	1	0
	7	4	3

TABLEAU VIII.
Huile usée.

Hauteur	Nombre d'essais	Nombre d'inflam-mations	Nombre de non-inflam-mations
0,40 m	3	0	3
0,45 m	1	0	1
0,50 m	3	2	1
0,60 m	6	5	1
0,70 m	2	2	0
0,80 m	5	5	0
	20	14	6

On voit que, pour une hauteur de choc de 0,60 m au moins, on a inflammation dans tous les essais.

Quand la hauteur tombe à 0,50 m, on a 50 % d'inflammations.

La hauteur de 0,40 m paraît être le seuil des non-inflammations.

L'huile de transformateur, neuve ou usée, se comporte sensiblement de la même façon que l'huile neuve pour balance.

4. Conclusions.

Si nous écartons le mode de choc 1.3 par coincement tangentiel, dont le dispositif n'est pas au point, nous pouvons résumer comme suit les résultats des essais.

Ecartons aussi les 15 essais avec disjonction retardée de 2 à 6 secondes : 14 d'entre eux ont allumé l'huile.

Avec disjonction instantanée, c'est-à-dire en 80 à 100 millisecondes, on a effectué 80 essais, dont 77 avec le choc par la cornière (tableau IX).

TABLEAU IX.

Hauteur	Nombre d'essais	Nombre infl.	Flammes fugaces	Non-inflam-mations	Ratés
0,35 m	2	0	0	2	0
0,40 m	5	1	0	4	0
0,45 m	1	0	0	1	0
0,50 m	10	6	1	3	0
0,60 m	10	9	—	1	0
0,70 m	2	2	—	—	—
0,80 m	45	36	3	4	2
1,00 m	2	0	0	0	0
	77	56	4	15	2
		72,7 %	5,2 %	19,5 %	2,6 %

72,7 % des essais ont donné lieu à inflammation soutenue (flamme de quelque 5 m de hauteur pendant toute la durée de la projection de l'huile).

Nous remarquons que, pour une hauteur de chute d'au moins 0,50 m et plus, ce pourcentage des inflammations atteint 80 %.

Une hauteur de chute de 0,40 m correspondant à une énergie de 43 kgm, paraît bien être le seuil des non-inflammations.

Les flammes fugaces ont été obtenues quand la tôle équerre écran n'était pas placée : ce rôle de l'écran avait déjà été relevé par l'Institut National des Mines.

Une température trop basse de l'huile (moins de 10°) paraît être la cause d'un certain nombre de flammes fugaces et de non-inflammations.

Parmi ces non-inflammations, il faut citer certaines interruptions partielles d'huile, par bouchage de l'orifice de projection, le jet tombant sur l'arc n'étant pas alors assez important.

Les huiles fluides essayées pour balances, pour transformateurs, neuves ou usées, ont le même comportement.

L'huile grossièrement divisée s'allume donc facilement dans l'arc électrique produit sur un câble par un choc d'une énergie d'au moins 55 kgm, ce qui correspond à une hauteur de chute de 0,50 m et plus. Avec disjonction dite instantanée, les gerbes d'étincelles sont peu spectaculaires et leur durée totale n'a jamais excédé 100 millisecondes.

B. Au point de vue électrique.

1. Les oscillogrammes.

1.1. Généralités.

Les diagrammes ou « oscillogrammes » enregistrent les courants I_1 , I_2 et I_3 , ainsi que les tensions E_{1-2} , E_{2-3} et E_{3-1} .

L'interprétation ou lecture de ces diagrammes est fort intéressante mais assez complexe.

On décèle un arc par le passage d'un courant et la chute brutale de la tension existante entre les phases intéressées par l'arc.

On repère le début d'un court-circuit par la chute de la tension entre les phases en court-circuit et par l'augmentation brutale des intensités du courant parcourant les phases intéressées.

Les temps sont facilement mesurés, vu que la fréquence est de 50 Hz et qu'une période dure 20 millisecondes. On peut mesurer sur le diagramme l'espace occupé par une période et donc nous pouvons savoir pour un diagramme que tant de millimètres représentent 20 millisecondes.

L'étude des diagrammes telle que nous l'avons faite, permet de préciser les points suivants :

- le déclenchement ou le non-déclenchement du disjoncteur ;
- la nature de la blessure du câble ou plus exactement le genre de défaut au point de vue électrique ;
- la durée des défauts avant déclenchement ;
- les intensités dans 3 phases, à chaque instant ;
- les tensions entre phases à chaque instant ;
- le nombre d'arcs prenant naissance entre phases.

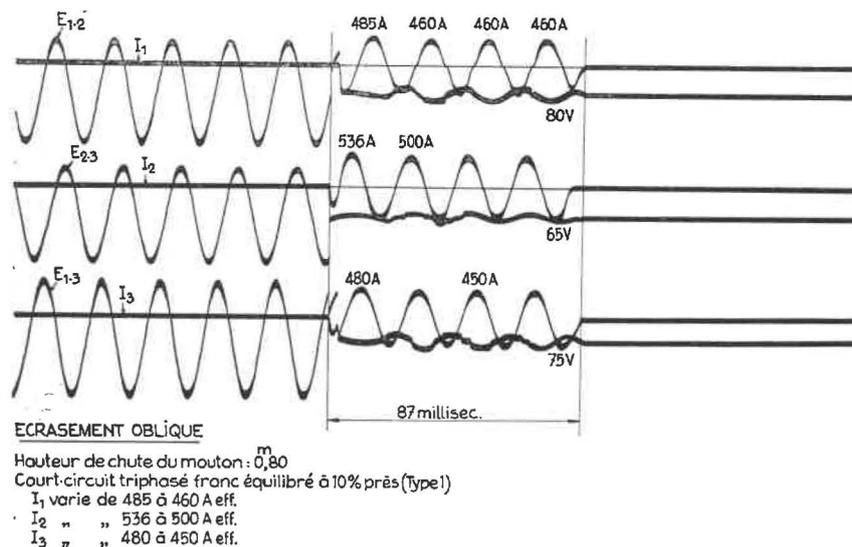
1.2. Les types d'oscillogrammes.

Les oscillogrammes obtenus ont des traits de ressemblance et nous avons été amenés à envisager un certain nombre de types caractéristiques qui, à première vue, semblaient bien différenciés.

Tout d'abord, nous avons séparé les diagrammes correspondant à un déclenchement retardé ou temporisé du disjoncteur de ceux correspondant à un déclenchement instantané de ce disjoncteur.

Nous avons donc divisé en deux classes :

- classe des CCI
- classe des CCR.



N.B. - Les valeurs inscrites sur les oscillogrammes sont des valeurs efficaces

Fig. 9.

Dans la classe des CCI, nous avons distingué trois types principaux. Remarquons qu'on peut passer d'un type au voisin de façon progressive.

Les types choisis sont les suivants :

Type I : Court-circuit triphasé franc.

Nous entendons par court-circuit « biphase » ou « triphasé », un court-circuit entre 2 ou 3 conducteurs d'un câble triphasé.

Le court-circuit est d'autant plus franc que les tensions apparaissant entre phases lors du défaut sont plus basses.

Ce type de défaut est illustré par les figures 9, 10 et 11. La figure 9 présente les particularités suivantes :

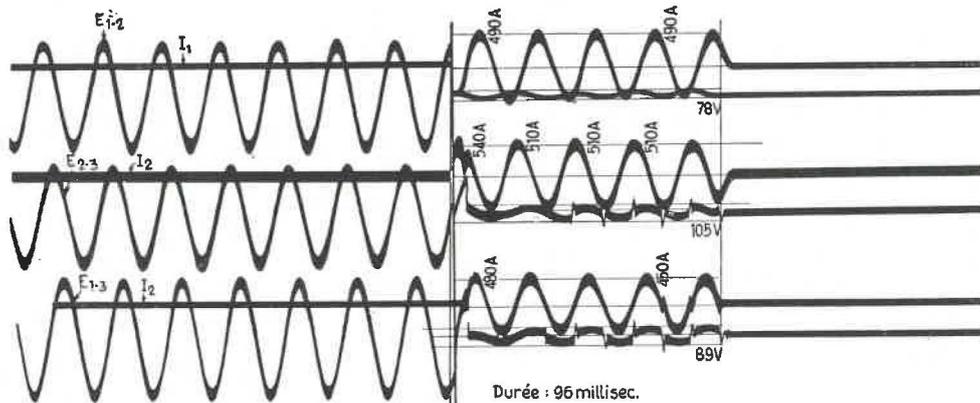
- les intensités sont presque égales en grandeur dans les trois phases (à 10 % près) ;

- les tensions d'arc entre phases sont assez proches et, dans tous les cas, faibles.

Ce type de court-circuit peut être accompagné de petits arcs répétés.

La figure 10 est caractérisée par :

- un contact étroit des deux phases 1 et 2 avec écartement légèrement plus grand de la troisième phase (3) vis-à-vis de l'ensemble des deux premières. Entre la troisième phase (3) et ce groupe éclatent des arcs ;
- l'intensité approximativement et généralement égale des phases 1 et 2 en contact étroit ; la troisième phase étant parcourue par une intensité inférieure aux deux autres ;
- la tension E_{1-2} entre les deux phases en contact étroit, inférieure à celle régnant entre une de ces phases et celle plus éloignée (E_{1-3} et E_{2-3}).

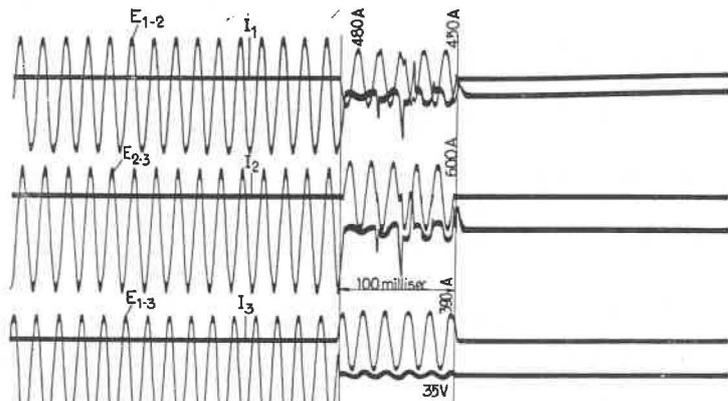


ECRASEMENT OBLIQUE

Hauteur de chute du mouton : 0,80 m
 Court-circuit triphasé franc avec apparition de tensions d'arc de plus en plus grandes entre la phase 3 et le groupe (1-2)
 Durée de disjonction : 96 ms.

N.B. Les valeurs portées sur les oscillogrammes sont des valeurs efficaces

Fig. 10.



ECRASEMENT ORTHOGONAL

Hauteur de chute du mouton : 1,00 m
 Court-circuit triphasé avec difficultés de réallumage avec la phase 2.
 Durée de disjonction env. 100 milliseconde.
 Type I

N.B. Les valeurs portées sur les oscillogrammes sont des valeurs efficaces

Fig. 11.

La figure 11 montre un contact étroit et franc entre les trois conducteurs au début, puis deux conducteurs (1 et 3) restent en contact étroit, le conducteur 2 tend à s'écarter de ce groupe provoquant un certain déséquilibre.

Type II : *Court-circuit triphasé durant une à deux périodes, puis biphasé ensuite* (fig. 12).

Ce type est analogue à celui de la figure précédente, mais l'écartement entre la phase 1 et le groupe constitué par les deux autres phases 2 et 3

Type III : *Court-circuit biphasé franc.*

Ce défaut est établi dès les premiers instants, et sans contacts parasites avec la troisième phase.

- Ce type est caractérisé (fig. 13) par :
- une intensité nulle dans la phase (2), celle qui n'est pas intéressée par le défaut biphasé, 1-3 ;
 - deux intensités équivalentes, aux erreurs de lecture près, régnant dans les phases en contact, 1 et 3 ;
 - des tensions équivalentes, aux erreurs de mesure près, entre la phase (2) restée indépendante et

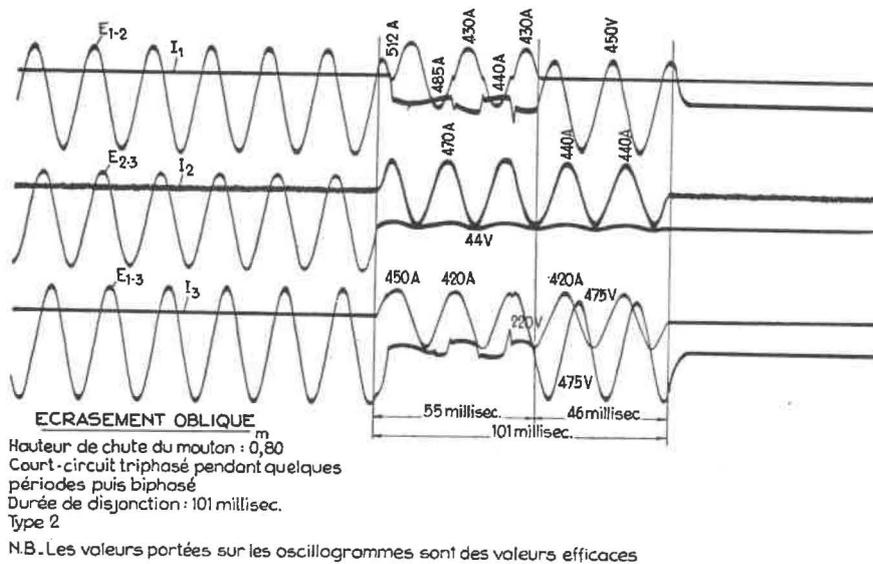


Fig. 12.

se fait beaucoup plus rapidement et complètement au point de n'avoir plus qu'un défaut biphasé au bout d'un certain temps, 55 millisecondes.

chacune des deux autres, ces tensions ayant une valeur relativement grande ;

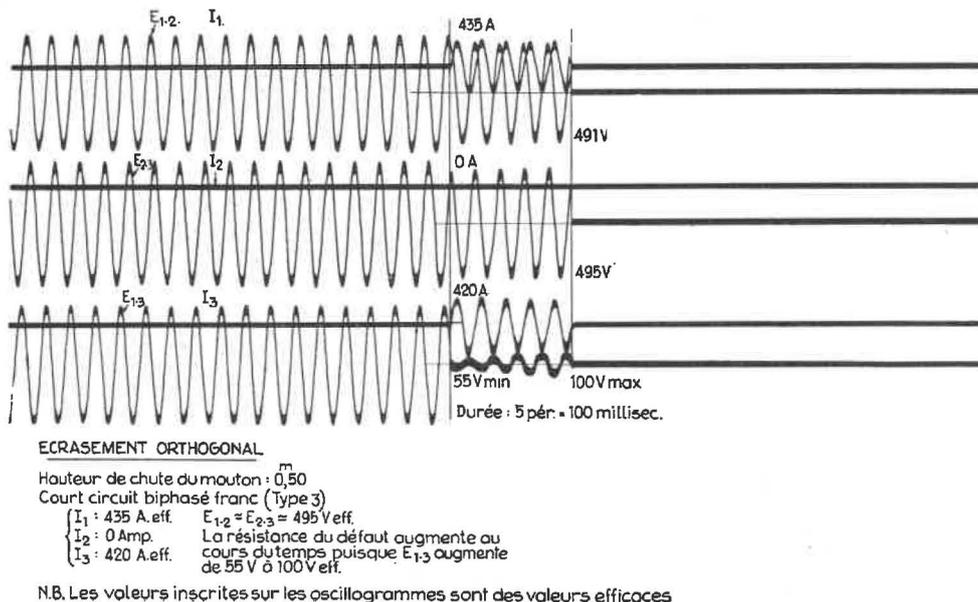


Fig. 13.

— une tension E 1-3 entre phases en contact comparativement très faible.

On voit facilement que les Types I, II sont liés entre eux et constituent des étapes de l'évolution d'un même phénomène.

On peut concevoir la raison de cette évolution comme suit.

Au moment où la poutrelle tombe sur le câble et l'écrase, les trois phases du câble sont en contact ; par suite du relèvement de la cornière sous la répulsion du ressort, un conducteur tend à s'écarter des deux autres qui restent groupés.

Le type III pourrait être en relation avec une blessure plus légère du câble et une position déterminée des conducteurs à l'intérieur de celui-ci, vis-à-vis de l'endroit de l'impact de la poutrelle.

Nous n'avons pas pu classer tous les oscillogrammes dans des catégories bien définies. Certains ont une allure excentrique et sont classés comme « divers ». D'autres ne montrent aucun phénomène du fait que le câble n'a pas été blessé suffisamment et que les tensions et intensités n'ont pas varié. Tous ces cas se rapportent au coincement tangentiel, pour lequel le dispositif expérimental n'était pas au point.

1.3. Répartition de ces oscillogrammes en différents types.

Classe CCI			
Type 1 (triphasé)	Type 2 (triphasé puis biphasé)	Type 3 biphasé	Divers
45	2	4	8

On remarque que les court-circuits biphasés n'ont été qu'exceptionnels dans les conditions de choc des essais.

Dans la classe CCR, nous avons fait 12 essais ; les courts-circuits sont toujours triphasés, dès le début ; toutefois, un court-circuit biphasé peut apparaître et disparaître au cours du retard au déclenchement.

1.4. Relation entre le type d'oscillogramme et le mode de blessure du câble.

Examinons la répartition des expériences faites avec un réglage en position CCI des déclencheurs du disjoncteur D₂ et les deux modes principaux de blessure.

TABLEAU X.
Ecrasement orthogonal.

	Nombre d'essais avec oscillos	Type 1 triphasé	Type 2 triphasé biphasé	Type 3 biphasé
0,30 m	1	0	0	1
0,35 m	1	0	0	1
0,40 m	4	4	0	0
0,50 m	11	10	0	1
0,60 m	2	2	0	0
0,80 m	2	2	0	0
1 m	3	3	0	0
	24	21	0	3

Remarquons que les 3 types 3 (c'est-à-dire court-circuit biphasé franc) ont été obtenus pour des faibles hauteurs de chute de la poutrelle sur le câble. Il semble que le court-circuit biphasé soit en relation avec une faible blessure du câble.

TABLEAU XI.
Ecrasement oblique.

	Nombre d'essais avec oscillos	Type 1 triphasé	Type 2 triphasé biphasé	Type 3 biphasé
0,80 m	23	22	1	0

Les court-circuits biphasés obtenus et cités plus haut sont les seuls que nous connaissons dans toutes nos expériences. Il est certain qu'un court-circuit de l'espèce ne se produit que par des circonstances de choc et de blessure du câble très spéciales.

2. Les disjonctions.

2.1. Résultats obtenus avec le réglage en position CCI.

Un déclenchement instantané a été observé lors de tous les essais qui ont provoqué un défaut électrique.

Ce déclenchement s'est fait en un temps variant de 80 à 100 millisecondes.

Pour les 45 premiers essais, on pourrait soupçonner l'intervention du dispositif à minimum de tension du disjoncteur D₂.

Pour les essais suivants cependant, le disjoncteur n'a pu fonctionner que sous l'impulsion de ses relais à maximum d'intensité.

Les intensités devant provoquer le déclenchement instantané ont été fixées soit à 375 A, soit à 400, 450 ou 600 A.

Examinons sous quelle intensité les relais ont fonctionné et comparons ces intensités à celles fixées aux déclencheurs et citées ci-dessus.

Les oscillogrammes montrent que l'intensité dans chacune des phases est quasi symétrique, à quelque 10 % près. Nous n'avons donc pas pu déceler la présence de la composante continue asymétrique qui aurait pu apparaître lors des premières périodes du

TABLEAU XII.
Classe CCI — Type 1.

N° des essais	I ₁	I ₂	I ₃	Dates	ID ₂
2	450	417	480	15/2	400
4	450	518	480	15/2	400
5	450	480	450	15/2	600
6	480	490	450	15/6	600
8	420	525	534	16/2	600
9	465	487	450	16/2	600
10	466	585	480	16/2	600
11	510	500	417	18/2	600
12	450	600	415	18/2	600
13	450	600	390	18/2	600
15	450	600	415	18/2	600
17	450	475	480	19/2	450
18	450	450	480	19/2	375
19	450	450	420	19/2	375
22	450	450	435	19/2	375
25	500	470	475	20/2	375
29	480	510	512	20/2	450
30	515	530	530	21/2	450
32	475	500	473	21/2	450
36	530	466	505	22/2	450
45	485	536	485	26/2	450
46	485	505	460	26/2	450
54	485	495	480	27/2	600
55	500	450	450	27/2	600
56	485	500	510	27/2	600
66	480	550	480	28/2	600
68	490	540	480	28/2	375
69	480	540	480	28/2	375
70	490	480	450	28/2	375
71	465	510	450	28/2	375
73	465	480	450	28/2	375
80	450	436	410	1/3	375
82	440	410	410	1/3	375
83	440	440	440	1/3	375
93	490	450	480	2/3	375
94	465	440	450	2/3	375
96	465	440	450	2/3	375
104	490	442	450	2/3	375
105	475	580	480	2/3	375
106	490	485	480	2/3	375
107	465	473	480	2/3	375
108	490	475	450	2/3	375
109	490	505	450	2/3	375

court-circuit et porter l'intensité à 2,5 fois sa valeur normale de court-circuit.

Rappelons ici que le disjoncteur D₂ est muni d'un déclencheur sur chacune des phases.

La valeur de l'amplitude maximum des oscillations enregistrées, tant pour la tension que pour l'intensité, a été étalonnée en tensions et intensités efficaces, de telle sorte que nous obtenons directement les valeurs efficaces sur les oscillogrammes en mesurant les amplitudes maximums de ces oscillations.

Les mesures des intensités peuvent comporter une erreur par excès qui n'a pas dépassé 10 %.

L'erreur de mesure sur les tensions d'arc, peu élevées, est relativement plus importante. Cette mesure est très malaisée.

Les tableaux 12 à 15 reproduisent, pour les réglages en position CCI et CCR, les intensités mesurées dans chacune des phases. Dans la dernière colonne des tableaux se rapportant à la position CCI, nous avons noté le réglage de l'intensité pour le déclenchement instantané.

TABLEAU XIII.
Classe CCI — Type 2.

n°	I ₁	I ₂	I ₃	Dates	ID ₂
14	450	600	495	18/2	600
57	485	470	450	27/2	600

TABLEAU XIV.
Classe CCI — Type 3.

n°	I ₁	I ₂	I ₃	Dates	Disj. 2 à
21	0	425	420	19/2	375
26	433	0	420	20/2	450
39	425	436	0	22/2	450

On remarque que, dans les cas de réglage à 375, 400 et 450 A, la valeur du courant efficace a, dans une des phases au moins, dépassé les intensités fixées pour le déclenchement instantané ± 10 %.

Cependant, pour le réglage à 600 A, nous remarquons que dans aucune phase l'intensité efficace relevée n'atteint 600 A ± 10 % (Essais 54, 56, 57 et 66, alors que le minimum de tension était rendu opérant).

— à la suite de cela, extinction des arcs durant près de 2 sec. L'intervalle de temps durant lequel il n'y a plus aucun arc ni contact entre phase, et où les intensités et les tensions sont redevenues ce qu'elles étaient avant la blessure du câble, dure 1.700 millisecondes, soit plus de 1,5 seconde ;

— ensuite, des arcs triphasés réapparaissent par groupes séparés à des intervalles de temps beaucoup plus courts, où il ne se passe rien ;

— le disjoncteur a dû être déclenché par nous-mêmes. Toujours est-il que, durant le laps de temps de 1,7 seconde, le mécanisme de la minuterie des déclencheurs a pu revenir au zéro.

Etude de l'oscillogramme n° 110 (fig. 15).

L'oscillogramme montre principalement :

— Un court-circuit triphasé, contact triphasé prolongé durant 2.670 ms avec une légère interruption où le contact a été passagèrement biphasé (2,5 périodes ou 50 ms).

Ce contact triphasé donne lieu à des tensions complexes et assez élevées. Par moment apparaissent des tensions de réapparition, alors que l'arc tendait à disparaître.

— Un intervalle de temps de 1.240 ms durant lequel les intensités et les tensions retrouvent les valeurs qu'elles avaient antérieurement à la blessure du câble, comme si le défaut n'existait pas.

— Un court laps de temps durant lequel le défaut triphasé se manifeste à nouveau.

— Le disjoncteur a dû être manœuvré par la commande du déclenchement par « minimum de tension ».

Il en résulte que, pour une blessure faite dans les conditions décrites, le court-circuit peut disparaître pendant un certain temps, réapparaître ensuite et disparaître à nouveau. Pendant ces interruptions de court-circuit, la minuterie peut avoir le temps de revenir en arrière et même à zéro.

Dans ce cas, le temps de fonctionnement du relais peut être supérieur au temps pour lequel il a été réglé. Cette particularité est d'ailleurs mentionnée par le constructeur : « Si après un temps ne dépassant pas les 2/3 du retard du déclenchement, le courant a une valeur n'excédant pas le courant nominal de la bobine, toutes les pièces reprennent immédiatement leur position primitive et l'appareil est prêt pour un nouveau fonctionnement ».

3. Influence du moteur en bout de ligne.

Lors des 12 premiers essais, un moteur asynchrone de 50 ch à rotor bobiné, tournant à vide, se trouvait en bout de ligne. Les boucles « intensité » et « tension » de l'oscillographe étaient raccordées comme indiqué à la figure 8. Les oscillogrammes relatifs à ces essais, montrent l'existence d'une tension pouvant atteindre 180 V entre les phases, subsistant après disjonction et s'amortissant plus ou moins rapidement.

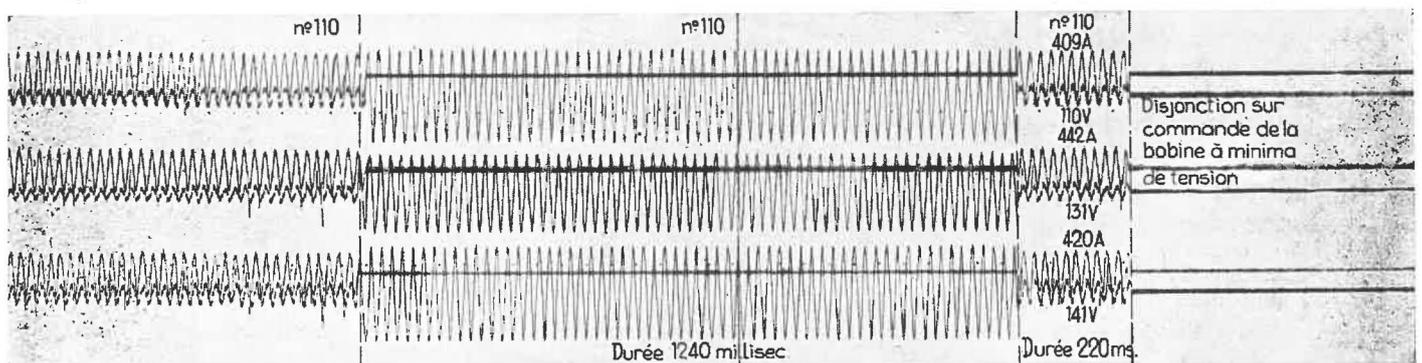
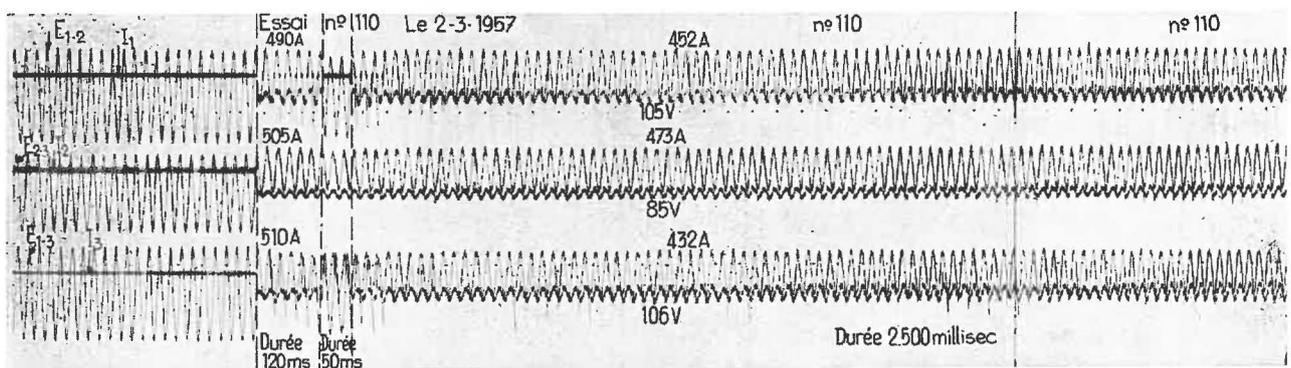


Fig. 15.

Pour étudier le courant renvoyé par le moteur dans le défaut, nous avons raccordé les boucles « intensité » de l'oscillographe aux transformateurs d'intensité placés cette fois entre le moteur et le défaut.

Tant en amont qu'en aval de ce trou, les fils d'armature sont soudés par groupes de 2 à 5 ; le feuillard lui-même est soudé aux fils d'armature. Les conducteurs en cuivre sont perlés, tant en amont qu'en aval, et ne sont pas soudés entre eux.

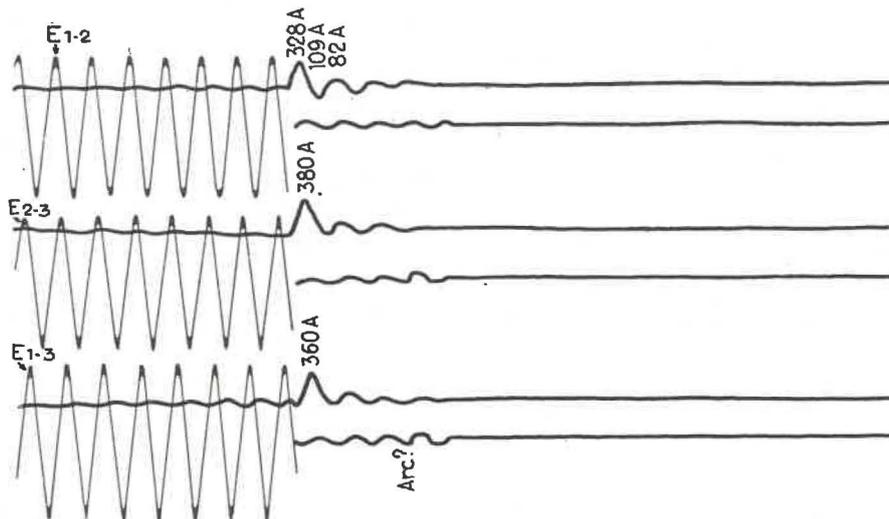


Fig. 16.

L'oscillogramme n° 92 (fig. 16) relatif à cet essai montre le renvoi d'un courant triphasé de 328 à 380 A, s'amortissant en 3 périodes. Il n'est pas possible de se rendre compte si ce courant a provoqué un arc à l'endroit du défaut.

C. — Effets calorifiques des arcs sur les câbles.

Lors des essais précédents, sur le mode de choc orthogonal de 0,80 m de hauteur, cornière sur claveau plat ou incliné, nous avons remarqué :

1) Lorsque le disjoncteur fonctionne en instantané : un jet d'étincelles, plus ou moins important, sort du câble à l'endroit de l'impact ; ce jet est parfois insignifiant. Le câble est aplati à l'endroit de l'impact. Il n'y a pas de fil d'armature sectionné ni soudé.

Les échantillons que nous avons ouverts pour examen montrent que les fils d'armature ont pénétré dans la gaine en plomb, mettant souvent à nu les fils de cuivre des conducteurs sur une petite surface. Parfois même, les fils de cuivre ne sont pas apparents à l'œil nu, alors que ces échantillons ont donné lieu à inflammation.

Certains de ces échantillons présentent un trou, avec traces de fusion, dans la gaine de plomb ; on observe alors un léger perlage sur 1 ou 2 fils de cuivre.

2) Lorsque le disjoncteur fonctionne en retardé, il y a souvent des arcs, dont certains sont spectaculaires. Dans ce cas, le câble est troué et presque complètement sectionné, quelques fils seulement de l'armature sur les bords extérieurs n'étant pas coupés.

Ces conducteurs ont fondu sur une distance variant de 1 à 5 cm ; dans un même échantillon, la longueur fondue dans chaque conducteur est variable.

D. — Influence de ces effets calorifiques sur l'inflammation de l'huile.

Le 4 avril 1957, nous avons fait une série d'essais dans les conditions suivantes :

— Alimentation par un transformateur qui donne 510 V au secondaire, comme pour les essais des 20, 21 et 22 mars 1957 ;

— Choc orthogonal par cornière sur claveau incliné, hauteur de chute : 0,80 m ;

— Disjonction : CCR 150 A, 3 ou 6 sec. ;

— Le câble $3 \times 35 \text{ mm}^2$ cuivre n'a plus de jute extérieur ;

— Projection d'huile par la fente $15 \times 0,8 \text{ mm}$;

— CCR 6 sec : on projette l'huile 4 secondes après le choc : inflammation ;

— CCR 6 sec : on projette l'huile plusieurs secondes après la disjonction, soit au maximum 3 secondes après : 2 essais sur 4 ont donné inflammation ;

— CCR 3 sec : l'huile projetée 1 à 3 sec après disjonction : 6 essais : 6 inflammations.

Lors de 3 de ces essais, les matières en fusion projetées lors de l'arc enflamment la boue huileuse se trouvant au sol à 20 à 30 cm sous le câble blessé, dans un rayon de 70 cm. L'huile est projetée alors que ces flammes subsistent. Cette boue huileuse continue à brûler ; lors d'un essai nous avons attendu 1/4 heure avant de les éteindre. L'huile projetée sur ces points chauds s'enflamme.

Nous cachons la flaque d'huile par une planche.

Un essai provoque une petite flamme sur le bout du câble lui-même avant que l'huile ne soit projetée.

Lors des deux autres essais, l'huile s'enflamme certainement sur les points chauds de l'armature du câble lui-même.

En conclusion de ces essais, nous pouvons dire qu'avec réglage en CCR (déclenchement instantané bloqué) disjonction après 3 ou 6 secondes, les effets calorifiques des arcs peuvent :

- 1) par des projections allumer de la boue huileuse dans le voisinage (30 à 60 cm) ;
- 2) enflammer le bout du câble (petite flamme) ;
- 3) produire des points chauds sur l'armature, soit visibles par petites perles de soudure de fils, soit sans métal fondu visible à l'extérieur.

E. — Influence de la pression unitaire de choc.

Le 5 avril 1957, nous avons changé l'organe de choc (fig. 17).

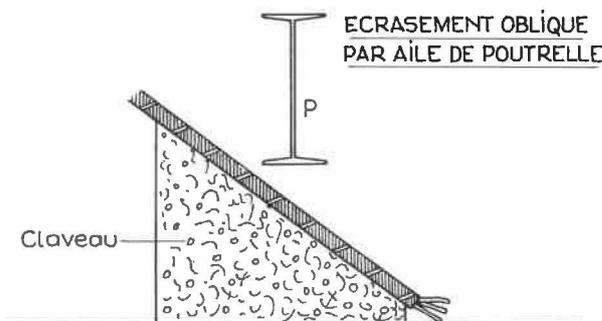


Fig. 17.

La cornière n'est pas utilisée ; c'est l'aile de la poutrelle qui frappe le câble placé longitudinalement sur un claveau oblique de 32°. La hauteur de chute est de 0,80 m et souvent 1,20 m.

Le câble est souvent blessé en 2 endroits : l'écrasement est moins important qu'avec le choc orthogonal par la cornière.

Dans le tableau XVI sont consignés les résultats, avec réglage en CCI d'abord (7 essais) et CCR (déclenchement instantané bloqué : 14 essais).

TABLEAU XVI.

N° essai	Réglage	Temporisation	Déclenchement	Hauteur chute	Project. d'huile	Inflammation	Observations
187	400 CCI		oui	0,80	avant	non	le claveau se dérobe
188	400 CCI		oui	0,80	avant	non	le claveau se dérobe
199	400 CCI		non	1,20	avant	non	
200	400 CCI		oui	1,20	avant	oui	même bout que le 199
201	400 CCI		oui	0,80	avant	non	le claveau bouge sous le choc
202	400 CCI		non	1,20	avant	oui	débit d'huile avec fente 13 × 0,8 et Ø 3,5 grandes flammes immédiates
203	400 CCI		oui	1,20	avant	oui	même remarque
189	CCR	3" 150 A	oui	0,80	après	non	pas d'arc visible (claveau se dérobe au choc)
190	CCR	3" 150 A	oui	0,80	après	non	même remarque
191	CCR	3" 150 A	oui	1,00	après	non	même remarque
192	CCR	3" 150 A	oui	1,20	après	non	arcs de courte durée
193	CCR	3" 150 A	oui	1,20	après	non	arcs de courte durée
194	CCR	6" 150 A	oui	1,20	après	non	arcs de courte durée
196	CCR	6" 150 A	oui	1,20	après	oui	même bout que 195, gros arcs
198	CCR	6" 150 A	oui	1,20	après	non	quelques arcs
206	CCR	3" 150 A	oui	1,20	après	non	débit d'huile par fente et Ø de 3,5 mm
195	CCR	6"	non	1,20	après	non	pas d'arcs
197	CCR	6"	non	1,20	après	non	pas d'arcs
204	CCR	3"	non	1,20	après	non	1 arc-débit d'huile doublé
205	CCR	3"	non	1,20	pendant	oui	1 arc-débit d'huile doublé
207	CCR	3"	non	1,20	pendant	oui	1 arc-débit d'huile doublé

Pour ces essais faits en CCI, il semble qu'il faut augmenter la hauteur de chute pour produire régulièrement une inflammation, mais ce n'est pas probant.

A partir de l'essai 202, nous avons augmenté le débit d'huile en ajoutant l'orifice rond de 3,5 mm de diamètre, 14 litres/min ; nous avons, en effet, remarqué qu'avec ce dispositif de choc (poutrelle à proximité du claveau et celui-ci se dérobant) les chances d'atteindre l'impact avec un jet suffisamment nourri d'huile étaient amoindries.

L'influence de cette augmentation du débit d'huile est effrayante et les flammes occupent instantanément toute la section du segment circulaire en claveaux et s'écrasent contre la toiture du hangar.

Le disjoncteur n'a pas fonctionné pour deux essais, bien qu'un de ces essais ait donné lieu à une grosse inflammation.

Ce mode de choc, qui donne une pression unitaire plus faible, provoque des courants de court-circuit qui peuvent être incapables de provoquer le déclenchement.

Avec réglage en CCR (disjonction instantanée bloquée) : lors de 5 essais, il n'y a pas eu de déclenchement ; l'huile projetée après disjonction n'a donné lieu qu'à une inflammation ; les effets calorifiques des arcs sont moins importants.

A défaut momentané d'oscillographe, nous n'avons pu mesurer l'intensité de court-circuit pour nous rendre compte si cette intensité est inférieure à l'intensité qui provoque certainement un déclenchement instantané.