

NOTES DIVERSES

SUR L'INFLAMMATION DU GRISOU

PAR LES

Conducteurs Électriques Incandescents

Etude comparative des expériences de M. Hauser et des nôtres.

PAR MM. COURIOT et J. MEUNIER.

Les essais entrepris par M. Hauser, professeur à l'École des mines de Madrid, sur l'inflammation du grisou par les conducteurs électriques incandescents, essais que nous connaissons par le compte rendu de M. L. Denoël dans les *Annales des Mines de Belgique* (t. XII, 1907, p. 1088), sont fort intéressants. Nous ne croyons pas que ces expériences viennent infirmer, ni contredire les nôtres, mais au contraire, qu'elles les confirment. Nous avons dit dans nos diverses publications (1) que « les conducteurs incandescents ne font pas détoner le grisou mélangé à l'air, même dans les conditions les plus favorables à l'explosion », en expliquant formellement que nous n'avions opéré qu'avec des conducteurs dont le diamètre a varié de 0.05 millimètre à 0.35 millimètre. Nous n'avons pas opéré avec des fils de diamètre plus gros et même la plupart de nos expériences, 2,000 environ, ont été faites avec du fil de clavecin, n° 30 du commerce, dont le diamètre est à peu près de 0.24 millimètre. Une fois bien maîtres de notre appareil et de notre

(1) *Académie des sciences* (Comptes rendus, t. 126, p. 750, année 1878); *Revue de Liège*, 4^e série, t. X, p. 215, juin 1905; *Génie civil* (octobre 1906).

courant électrique, nous avons obtenu des résultats réguliers, dans le sens prévu. Nous avons pu maintenir pendant 10 minutes de tels fils incandescents dans l'air à 9.5 % de grisou réel; du reste, on réussirait à les maintenir indéfiniment en modérant un peu l'intensité du courant au moment où l'éclat du fil montre qu'il va fondre. Ces essais avec les fils métalliques n'étaient pour ainsi dire que des essais préparatoires à notre étude sur les lampes électriques usuelles chargées du mélange grisouteux, qui nous ont fourni une preuve frappante de ce que nous avançons.

Or, M. Hauser vient de donner une nouvelle et pleine confirmation de ce fait (*Annales des Mines de Belgique, loc. cit.*, p. 1088). « Des fils de ferro-nickel, de 0.3 millimètre de diamètre, n'ont pas enflammé les mélanges les plus sensibles de grisou artificiel, pas plus avec fusion, que *sans fusion* ». Nous reviendrons sur le cas de la fusion, qui a dû être accompagnée d'une étincelle de rupture, et nous signalerons la cause probable de cet insuccès. Bien plus, il a appliqué cette propriété reconnue à une étude spéciale (p. 1092).

Ce fait est donc maintenant incontestable (1). Il ne peut être expliqué toutefois par la simple considération du retard à l'inflammation, car le retard, même avec le grisou, a une durée infiniment trop courte, n'étant d'après les déterminations de MM. Mallard et Le Chatelier, que de quelques secondes à 650°, et d'une seconde environ, à 1,000°. Il faut nécessairement admettre qu'un autre phénomène accompagne celui du retard.

(1) M. Hauser nous a fait remarquer amicalement que, dans une note à l'Académie des Sciences (*Comptes rendus*, t. CVL, p. 1162, 9 décembre 1907), nous avons écrit par erreur qu'il avait opéré sur des mélanges à 9 % de grisou, tandis qu'il a opéré sur des mélanges de 7 à 7.5 %. Cette proportion est précisément celle que la Commission belge du grisou a considérée comme étant la plus inflammable. Nous saisissons d'autant plus volontiers l'occasion de donner ici acte de cette rectification, qu'elle vient encore renforcer nos conclusions.

Comme il est très délicat d'établir la réalité de ce phénomène, puisque d'excellents expérimentateurs l'ont méconnu, que l'on nous permette de revenir ici sur ce que nous avons déjà écrit, particulièrement dans notre Mémoire étendu, publié par le *Génie civil*. Envisageons le cas des fils de diamètre assez gros pour enflammer, sans l'intervention de l'étincelle de rupture; voici comment nous nous sommes exprimés dans ce Mémoire, p. 14 : « Que ce fait d'inexplosivité par l'incandescence ne soit exact que dans de certaines limites, qu'en *accroissant le diamètre* des conducteurs et l'intensité du courant, l'on arrive à l'allumage, cela nous paraît vraisemblable... En portant à l'incandescence des conducteurs de gros calibre, on franchit du coup deux étapes dont l'existence nous a été révélée par l'étude méthodique des conducteurs déliés analogues aux filaments des lampes électriques. Bien plus, nous avons constaté le fait en employant ces lampes électriques elles-mêmes..... Il est admis que la température nécessaire à l'inflammation des mélanges grisouteux est d'environ 600 degrés; il est certain que la température de la couche gazeuse en contact avec le fil incandescent doit être bien supérieure à 1,000 degrés, puisque l'on arrive à la fusion du fer et du platine, sans que l'explosion ait lieu. Frappés de cette différence, nous l'avons expliquée en admettant qu'un *conducteur électrisé agit sur les molécules gazeuses en les mettant dans un état spécial, qui subsiste aussi longtemps que le champ électrique*, mais qui cesse aussitôt qu'il disparaît, c'est-à-dire au moment où l'étincelle de rupture se produit. Dans le champ électrique, certaines molécules seraient attirées (généralement les molécules comburantes, oxygène), les autres repoussées, les molécules étant ainsi séparées, l'élévation de température serait impuissante à déterminer l'explosion..... (Voir « Attraction de l'oxygène par le conducteur électrisé », dans notre

Mémoire, pp. 30 et suivantes)..... Cette explication permet d'ailleurs de concevoir que le phénomène est limité, car, l'action du champ s'affaiblissant à distance, avec des conducteurs incandescents d'un certain volume, le rayonnement calorifique peut devenir suffisant pour porter à 600° et au-delà, les couches gazeuses éloignées dans lesquelles les molécules d'oxygène et d'hydrocarbure ne sont pas suffisamment séparées..... »

En d'autres termes, supposons que la *gaine gazeuse*, rendue inexplosible autour du conducteur ait une épaisseur de 3 millimètres, il faudra que celui-ci soit assez gros pour pouvoir rayonner à 600° ou 650°, à la distance de 3 millimètres, sinon l'explosion ne se produira pas. C'était donc un résultat prévu que M. Hauser a atteint avec des fils de fer doux de 0.9 millimètre de diamètre, quatre fois plus gros que nos fils de clavecin n° 30, et, encore ce diamètre paraît-il être faible pour atteindre ce but, car six essais seulement ont réussi sur dix-sept. L'existence d'une spire au milieu du fil doit faciliter le résultat en favorisant le rayonnement.

Nous avons observé, comme M. Hauser, la formation rapide sur nos fils de clavecin d'oxyde de fer avec des nœuds en certains points. L'expérience citée à la page 31 de notre Mémoire, faite sur une spirale de 1 mètre et contenant une centaine de spires a donné sous ce rapport un résultat des plus frappants; mais nous ne pouvons admettre qu'à une température inférieure à celle de sa fusion, « le fer se volatilise et s'oxydant à l'état de vapeur produise une flamme ». Le fer se transforme dans ces conditions en oxyde de fer magnétique Fe^3O^4 , lequel étant absolument fixe ne perd pas de poids quand on le chauffe. Admettons par impossible que la volatilisation et la flamme aient lieu; elles se seraient aussi bien produites avec un fil rectiligne qu'avec un fil incurvé, et mieux encore avec un

petit fil qu'avec un gros. Il nous semble par suite que cette explication doive être rejetée. Les résultats obtenus avec des fils d'acier de 0.6 millimètre donnent lieu aux mêmes remarques que les précédents, c'est-à-dire qu'avec ces fils, il est assez difficile de faire rayonner la température d'inflammation à la distance nécessaire.

Les fils de platine présentent une particularité et nous ne sommes nullement surpris que des fils de 0.5 millimètre aient provoqué l'explosion sans se rompre, car dans des expériences nouvelles dont nous avons rendu compte dans notre Mémoire (p. 37), nous l'avons obtenue également avec des fils de 0.2 millimètre; mais il faut, pour réussir, ménager l'intensité du courant de manière à produire le phénomène d'*incandescence vive* que M. Hauser a observé comme nous, qu'il considère, et nous aussi, comme l'annonce de l'explosion. Ce phénomène s'observe sous le verre de l'éprouvette contenant le mélange explosif, en raison des buées qui enveloppent le filament, il n'est pas facile de s'en rendre un compte exact; quand au contraire, on procède à l'allumage d'un jet de grisou à l'air libre, ses phases apparaissent nettement. Transcrivons ici la description de l'expérience: « Nous avons opéré avec un fil de platine de 0.2 millimètre de diamètre et de 2 centimètres de longueur; la résistance de 8 ohms étant en parallèle, un courant de 5.5 ampères portait ce fil à la température du rouge seulement. Quand la vitesse du jet grisouteux était trop grande, le fil sur lequel il était projeté se refroidissait et devenait obscur, mais quand le jet était convenablement réglé, la température s'élevait d'elle-même rapidement, il se formait autour du fil rouge une sorte d'aurole régulière parfaitement visible, une nappe ovoïde ayant le fil pour axe, puis le fil devenait rouge blanc éblouissant, avec cet éclat particulier bien connu de ceux qui ont observé le platine incandescent; enfin le jet de grisou

s'allumait, non pas sur le fil de platine, mais à sa sortie de l'ajutage en avant de la nappe, avec un léger crépitement. Cette expérience montre qu'il se produit spontanément une élévation de température du fil par l'arrivée du jet grisouteux, élévation de température à laquelle le courant électrique est étranger, puisque le fil reprend l'éclat rouge ordinaire dès que l'on supprime le jet. L'allumage n'avait lieu qu'après quelques secondes ». On peut répéter l'expérience cinq ou six fois au moins en une minute. Nous ne l'avons pas réussie avec le même jet de grisou et des fils de platine de 0.1 millimètre; avec des fils de cette grosseur, par l'étincelle de rupture, on obtenait à coup sûr l'explosion des mélanges grisouteux.

Nous trouvons dans cette expérience la confirmation de nos idées. Si le jet de grisou enveloppe le fil rougi et empêche le contact avec l'oxygène de l'air, le fil devient obscur; si au contraire la pointe du jet où l'air est entraîné et mélangé à l'hydrocarbure arrive près du fil, le phénomène d'incandescence se produit. Il est attribuable à l'action du conducteur incandescent sur les molécules gazeuses, puisqu'il cesse dès que le jet est supprimé. Avant que l'allumage ait lieu, il se fait une combustion localisée autour du fil, combustion jetant un vif éclat et sans flamme, parce que l'oxygène se trouve condensé dans l'ambiance et ne s'en écarte pas facilement (1). L'auréole ovoïde semble avoir 2 à 3 millimètres de rayon. Remarquons aussi que le platine ne se combinant pas à l'oxygène, l'effet au lieu d'être intérieur et de se traduire par une

(1) Nous sommes loin d'avoir la primeur de cette idée, puisqu'elle rappelle la « Lampe sans flamme » que H. Davy obtenait avec la mousse de platine et les vapeurs d'alcool, et l'attraction de l'oxygène par le platine très divisé, démontrée par son contemporain Dœbereiner. Rappelons aussi que H. Ste Claire Deville et Debray ont démontré que le platine fondu acquérait la propriété de la lampe sans flamme, quand après l'avoir rougi, on le laissait légèrement refroidir, et que l'on faisait arriver des vapeurs inflammables.

oxydation, comme dans le cas du fer, est extérieur. L'explosion qui accompagne l'allumage ne se produit pas dans l'auréole, mais en avant, là où la composition du jet gazeux est explosive et seulement quand la température en ce point est arrivée au degré d'inflammation. Ici l'influence du retard à l'inflammation semble manifeste, car l'allumage, ainsi que nous l'avons noté, exige encore une ou deux secondes. Si l'on substitue un jet de gaz d'éclairage au grisou, l'allumage n'est pas instantané, mais plus rapide et l'influence du retard semble encore réelle, mais beaucoup moindre.

Les mélanges de gaz d'éclairage se comportent d'ailleurs comme ceux de grisou, à l'intensité près, c'est-à-dire que l'on peut y maintenir des fils incandescents, pourvu que le diamètre en soit assez fin; nous l'avons démontré page 40 de notre Mémoire.

Nous pouvons encore expliquer d'autres faits établis d'une manière certaine. D'abord celui de l'abaissement des limites d'inflammabilité.

Nous ferons remarquer que les chiffres que M. Hauser vient de publier sont en parfait accord avec ceux que nous avons publiés précédemment; il admet, comme nous, la limite inférieure d'inflammation électrique à 5 % et à 12.5 % la limite supérieure. Les limites d'inflammation par les flammes sont respectivement 6 % et 13 à 14 %. Si l'attraction de l'oxygène et la répulsion du carbure par le conducteur électrisé sont réelles, la composition de la couche où l'inflammation a lieu sera changée, et dans le mélange à 5 %, il se formera à la périphérie de la gaine inexplosible une couche à 6 % plus ou moins épaisse, inflammable, en sorte que le mélange à 5 % paraîtra explosif, mais incomplètement. Nous avons trouvé que 30 % environ du carbure étaient ainsi brûlés, mais on conçoit que la proportion varie beaucoup avec les

conditions de l'explosion. De même dans les mélanges à 12.5 %, il peut se former une couche périphérique à 13 ou 14 % ininflammable, qui formera comme une barrière à la propagation de l'explosion, et la limite paraîtra par suite abaissée.

Que doit-il se passer dans cette gaine protectrice que le conducteur a créée autour de lui, qui contient du carbure mais en trop faible proportion pour donner lieu à l'explosion ? Les éléments du carbure, carbone et hydrogène se trouvant dans une région riche en oxygène et portée à haute température brûleront, mais la combustion ne pouvant affecter ni la forme explosive, ni la forme de flamme, demeurera invisible et sera seulement caractérisée par la production de gaz carbonique et de vapeur d'eau. C'est le résultat que nous avons constaté dans nos lampes, où nous avons introduit un mélange gazeux préalablement desséché (Mémoire, p. 48).

Les fils de platine agissent comme les filaments de lampe ; et nous citerons à ce sujet le grisoumètre imaginé par M. Gréhan, professeur au Muséum d'Histoire naturelle de Paris, où l'inflamateur est un fil de platine rougi par un courant électrique (*Comptes rendus*, t. CXLIII, p. 813 (26 novembre 1907) et t. CXLIV, p. 555 (11 mars 1907), *Génie civil*, 1907). Ce savant a constaté que les mélanges explosifs, notamment ceux à 6 % et à 8 % de méthane ne détonent pas par le passage du courant, tandis que pour brûler complètement, ou à peu près, les mélanges inexplosifs, il fallait suspendre le courant et le faire passer successivement un nombre de fois d'autant plus grand que la teneur en hydrocarbure était plus faible : 200 passages sont nécessaires pour les mélanges à 5 %, 400 passages pour les mélanges à 3 % et à 2 %, 600 passages pour les mélanges à 1 %. Ces résultats, trouvés expérimentalement, sans idée théorique préconçue, mettent en évidence l'action

spéciale des conducteurs électrisés incandescents sur les gaz, car si les gaz comburants et combustibles restaient mélangés d'une façon homogène, suivant la proportion initiale, il vaudrait mieux laisser passer le courant sans l'interrompre pour maintenir la température du fil inflamateur, les courants gazeux de convection qui se forment par suite du refroidissement extérieur, ramenant fatalement les molécules gazeuses au contact avec le fil incandescent qui détermine la combustion. Il devra en être tout autrement si les molécules combustibles sont repoussées par le conducteur, et il faudra suspendre le courant pour produire l'action inverse et leur permettre de revenir vers le conducteur et de prendre contact avec l'oxygène chaud. Ce jeu sera à recommencer un nombre de fois d'autant plus grand que les molécules à brûler seront plus rares.

Pour les fils conducteurs en fer, le résultat est différent, car le fer s'oxydant draine ainsi l'oxygène à distance et le fait pénétrer régulièrement dans sa masse : il se forme une couche d'oxyde de fer Fe^3O^4 autour du métal que nous avons observée et que M. Hauser a signalée de son côté. Comment concevoir que l'oxygène extérieur puisse atteindre les parties intérieures de cette couche, s'il n'y a pas attraction ? Faute d'une quantité suffisante d'oxygène dans la gaine enveloppante chaude, en présence du fer rouge les molécules de l'hydrocarbure demeurent intactes, ainsi que nous l'avons démontré (notre Mémoire, pp. 31 et 32).

Il ne faut pas perdre de vue que tous ces phénomènes ont lieu dans une atmosphère d'azote, et méconnaître l'influence de ce gaz sur les résultats. Il est certain qu'avec de l'oxygène pur, les explosions seraient beaucoup plus difficiles à éviter. L'azote joue un rôle considérable d'atténuateur, dans le sens du retard à l'inflammation. Nous avons démontré que si on prive un mélange à 9.2 % de méthane d'une partie notable de son oxygène, en l'absor-

bant par exemple au moyen du fil de clavecin incandescent, il est impossible de le faire détoner ou de l'enflammer après une nouvelle addition d'air; il faut absolument restituer l'oxygène perdu sous forme d'oxygène exempt d'azote.

En terminant cette note, nous devons dire quelques mots de l'action de l'étincelle, car nous avons déjà signalé que M. Hauser a déclaré qu'il n'avait pas enflammé les mélanges les plus sensibles du grisou par des fils de fer-nickel de 0.3 millimètre amenés à la fusion. L'étincelle de rupture enflamme les mélanges explosifs, cela est certain, à moins que la composition n'en ait été altérée, soit par la formation de CO_2 , comme cela arrive dans les ampoules de lampes, soit par l'absorption de l'oxygène, dans le cas des métaux oxydables, comme le fer.

L'étude de l'action de l'étincelle est celle qui nous a retenus de beaucoup le plus longtemps. Nous avons cherché précisément dans quelles conditions on peut éviter l'explosion, car nous avons remarqué, au cours d'expériences entreprises sans idée préconçue, que dans de certaines conditions l'étincelle de rupture enflammait, que dans d'autres, elle n'enflammait pas. Nous étions embarrassés pour trouver les raisons de cette différence. Enfin, nous avons reconnu qu'une portion du courant seulement passant dans notre fil incandescent, le courant continuait à passer après la rupture dans le conducteur à côté, et que la puissance de l'étincelle dépendait du rapport des résistances électriques de ces deux conducteurs. L'action inflammatoire de l'étincelle n'est pas précisément en rapport avec ce que nous appellerons « son volume », puisque, avec des fils d'argent de 0.05 millimètre, qui sont aussi fins que des cheveux, nous enflammons à coup sûr le grisou. L'étincelle de rupture est si petite dans ce cas, qu'elle est difficile à voir. Mais il faut opposer à la résistance du fil d'argent,

une résistance beaucoup plus forte, comme celle d'une lampe électrique de 110 volts par exemple. C'est ce que nous avons appelé le *principe de la dérivation*. En somme, le phénomène est comparable à celui de la circulation de l'eau dans une canalisation urbaine: quand on arrête brusquement la circulation dans une conduite et qu'on la laisse continuer dans la conduite à côté, le coup de bélier est d'autant plus fort, que le diamètre de cette dernière est plus faible par rapport à l'autre, et par suite que sa résistance est plus grande.

Nous ne pouvons pas consigner ici les nombreuses expériences que nous avons faites en ce sens avec les fils métalliques; nous citerons plutôt les essais des petites lampes de mineurs que la Société d'Arras nous avaient remises; ces essais ont trait au même objet et sont de nature à intéresser davantage les ingénieurs des mines en raison de leur application directe (notre Mémoire, p. 51).

Nous avons d'abord découpé l'ampoule de verre à sa base, au moyen d'une pointe de feu, puis nous l'avons brisée à la pointe pour faire pénétrer l'air; après cela, nous avons pu la détacher de la douille sans effort et sans briser le filament. Cette dernière partie a été montée dans une éprouvette contenant de l'air à 9.5 % de grisou. Avec un accumulateur de deux éléments qui donne un courant de 2 ampères sous 4 volts, nous avons amené facilement le filament à la rupture, mais l'étincelle n'a pu enflammer le mélange. Dans ce cas, le rapport de la résistance propre de l'accumulateur à celle du filament est de 2 environ. Il n'en est plus ainsi quand la résistance correspondante à la résistance de l'accumulateur est plus considérable et que le rapport acquiert une valeur plus forte; l'étincelle n'est guère plus visible et cependant la détonation a lieu. Nous avons reconnu que pour éviter sûrement l'explosion, la valeur du rapport ne devait guère dépasser 3.

Il est vrai que les expériences où nous avons eu l'explosion n'ont pas été faites avec l'accumulateur, mais nous considérons que le même résultat eût été atteint en couplant en tension, un plus grand nombre d'éléments, 8 à 10 par exemple, sur une même lampe. C'est ce qu'il faudra éviter dans la pratique (1). Nous admettons que la résistance propre de l'appareil électrique, pile ou accumulateur, correspond à ce que nous avons appelé *dérivation parallèle* ou *résistance extérieure* au récipient où se produit l'explosion.

Certainement le champ des explorations sur ce sujet reste toujours largement ouvert. Nous avons insisté sur ces deux principes, à savoir: 1° *inefficacité des conducteurs de petit diamètre* à produire l'explosion par incandescence; 2° *principe de la dérivation*, car nous croyons qu'en les méconnaissant dans les expériences, on s'expose à enregistrer des résultats confus et souvent même contradictoires.

(1) Il faudrait dans ce cas monter en parallèle un nombre de lampes correspondant, ou augmenter convenablement la résistance du filament de la lampe.