

INSTITUT NATIONAL DES MINES  
A FRAMERIES

---

Laboratoires de Paturages

---



# Limites d'Inflammabilité

PAR

O. DE BOOSERÉ

Docteur en Sciences,  
attaché à l'Institut National des Mines, à Frameries.

---

Les gaz combustibles et les vapeurs de carburants forment avec l'oxygène ou avec l'air, des mélanges susceptibles de s'enflammer ou de produire des explosions; ces propriétés, utilisées dans un grand nombre de cas, constituent également une source de dangers. Les mélanges d'air et de gaz ou de vapeurs exigent cependant d'être mélangés en certaines proportions, afin de propager la flamme d'allumage et d'assurer ainsi la combustion du système : en augmentant progressivement la proportion d'air dans un mélange combustible, on arrive au même résultat que si l'on avait augmenté progressivement la teneur en gaz combustible : le mélange obtenu ne conduit plus la flamme et la combustion ne se propage plus.

On appelle limite inférieure d'inflammabilité, le mélange à excès d'air contenant encore strictement assez de

combustible pour propager la flamme d'allumage : le mélange à excès de combustible produisant le même résultat est appelé limite supérieure d'inflammabilité; entre ces deux extrêmes se place une gamme de proportions assurant une propagation aisée de la flamme, et l'une d'entre elles réalise la combustion complète sans excès sensible des constituants réagissants.

Quoique les limites d'inflammabilité des gaz combustibles aient été déterminées par de nombreux expérimentateurs, aucun corps n'a fait dans ce domaine l'objet d'études aussi poussées que le méthane. La cause en est due aux dégagements de grisou des houillères, constitué principalement de méthane, lequel forme avec l'air des mélanges inflammables, dont la combustion, généralement provoquée par un moyen d'inflammation (flamme, étincelle électrique, minage par explosifs), a provoqué de véritables catastrophes et anéanti des milliers de vies humaines.

Les premières études concernant les limites d'inflammabilité du méthane ont été faites par Humphrey Davy au début du siècle dernier (1); il arriva à fixer une limite inférieure comprise entre 6,3 et 6,7 % de méthane pour l'air; toutefois, cet auteur ne dégagait pas les nombreux facteurs pouvant influencer la limite inférieure; de même la limite supérieure n'est pas nettement définie.

Davy reconnut cependant que la flamme du mélange air-méthane ne se propageait pas dans des tubes de faible section (en-dessous de 3,2 mm.) et ce fut cette propriété qui lui permit l'invention de la lampe de sûreté pour mines.

Ce fut H. Le Chatelier qui fixa les limites d'inflammabilité de la majorité des gaz et des vapeurs et étudia d'une

(1) S. H. DAVY. — *Collected Works*, vol. VI, 1816.

manière systématique, les causes diverses pouvant agir sur leur détermination et modifier leurs limites (1).

Alors que Davy n'utilisa pour la détermination des limites d'inflammabilité qu'un matériel assez rudimentaire, Le Chatelier fit usage d'une burette graduée de forme déterminée dite burette à limites d'inflammabilité, et créa un véritable mode de dosage rapide et suffisamment précis; la burette originale de Le Chatelier mesurait comme diamètre dans sa partie large, 40 millimètres, et sa longueur était de 250 millimètres; son usage s'est répandu dans les mines de houille et permet de doser assez exactement la proportion de grisou existant dans l'atmosphère du fond.

Voici les limites d'inflammabilité des gaz déterminées par Le Chatelier (2) :

| Nature du gaz     | Limite inférieure | Oxygène nécessaire | Limite supérieure | Température d'inflammabilité |
|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------------------|
| Hydrogène. . .    | 10 %              | 5                  | 70 %              | 550°                         |
| Oxyde de carbone  | 15,9 %            | 8                  | 74,5 %            | 550°                         |
| Méthane . . .     | 6 %               | 12                 | 16 %              | 650°                         |
| Gaz d'éclairage . | 8 %               | 9                  | 25 %              | 600°                         |
| Acétylène . . .   | 2,8 %             | 7                  | 65 %              | 450°                         |

Les limites inférieures d'inflammabilité des vapeurs combustibles sont renseignées ci-dessous (3).

Dans ce tableau : T indique la température de saturation de l'air par le produit; P le poids en grammes de vapeur par litre de mélange à 15° C.; V le volume de vapeur dans 100 volumes du mélange; O le volume d'oxy-

(1) H. LE CHATELIER. — Dosage de petites quantités de gaz combustibles mêlés à l'air. *Ann. Physique et Chimie*, 6, XXIX, 289, 1893.

LE CHATELIER et BOUDOUARD. — Sur les limites d'inflammabilité de l'oxyde de carbone. *C. R. C.* XXVI, 1344, 1898.

(2) LE CHATELIER. — *Leçons sur le Carbone*, p. 265, édition de 1926.

(3) LE CHATELIER. — Sur les limites d'inflammabilité des vapeurs. *C. R. C.* XXVI, 1510, 1898.

gène nécessaire pour la combustion de la vapeur; Q la quantité de chaleur dégagée par la combustion du volume moléculaire du mélange.

| NATURE DE LA VAPEUR            | T     | P   | V    | O    | Q    |
|--------------------------------|-------|-----|------|------|------|
| Sulfure de carbone . . . . .   | —     | 63  | 1,94 | 5,9  | 4,9  |
| Ether de pétrole . . . . .     | —     | 45  | —    | —    | 13   |
| Essence de pétrole . . . . .   | —     | 51  | —    | —    | 13   |
| Huile de pétrole . . . . .     | 46°,5 | 57  | —    | —    | 14,5 |
| Pentane . . . . .              | —     | 34  | 1,10 | 9,0  | 9,5  |
| Hexane . . . . .               | —     | 48  | 1,30 | 12,7 | 13,1 |
| Heptane . . . . .              | —     | 47  | 1,10 | 12,3 | 12,9 |
| Octane . . . . .               | —     | 49  | 1,00 | 12,6 | 13,1 |
| Nonane . . . . .               | 12°   | 45  | 0,83 | 11,6 | 12,1 |
| Amylène . . . . .              | —     | 46  | 1,60 | 11,9 | 12,8 |
| Benzène . . . . .              | —     | 44  | 1,50 | 11,0 | 11,6 |
| Toluène . . . . .              | —     | 49  | 1,30 | 11,4 | 11,8 |
| Térébenthine . . . . .         | 30°,5 | 42  | 0,73 | 10,2 | 10,9 |
| Acétone . . . . .              | —     | 73  | 2,90 | 11,6 | 12,7 |
| Alcool méthylique . . . . .    | 8°    | 81  | 6,00 | 9,0  | 10,8 |
| Alcool éthylique . . . . .     | 13°,5 | 60  | 3,07 | 9,2  | 10,3 |
| Alcool propylique . . . . .    | 25°   | 65  | 2,55 | 11,5 | 12,5 |
| Alcool isopropylique . . . . . | 17°   | 68  | 2,65 | 12,0 | 12,7 |
| Alcool isobutylique . . . . .  | 27°,5 | 53  | 1,68 | 10,1 | 10,8 |
| Alcool allylique . . . . .     | 25°   | 74  | 3,04 | 12,5 | 13,4 |
| Alcool amylique . . . . .      | 38°   | 45  | 1,19 | 9,0  | 9,5  |
| Acide acétique . . . . .       | 36°   | 103 | 4,05 | 8,1  | 8,9  |
| Ether ordinaire . . . . .      | —     | 60  | 1,90 | 11,7 | 12,5 |
| Acétate d'éthyle . . . . .     | —     | 87  | 2,30 | 11,7 | 12,3 |
| Azotate d'éthyle . . . . .     | —     | 145 | 3,80 | —    | 12,2 |

Le Chatelier étudia l'influence du diamètre des tubes de verre dans lesquels il opérait et constata que les deux limites d'inflammabilité se rapprochaient avec la décroissance du diamètre; de même l'influence de la température sur le mélange gazeux se traduit par un abaissement de la limite inférieure.

Pour l'oxyde de carbone, par exemple, la limite inférieure de 15,9 à la température ordinaire tomba à 14,2 pour 400°, à 9,3 pour 490° et à 7,4 à la température de 600°.

Les limites d'inflammabilité de Le Chatelier sont fixées pour des propagations de flammes descendantes, obtenues en enflammant les mélanges gazeux par le haut d'un tube.

Ce même auteur définit également une formule permettant de calculer la limite inférieure d'un mélange gazeux connaissant sa composition et les limites d'inflammabilité des constituants; on l'exprime par

$$\frac{n^1}{N^1} + \frac{n^2}{N^2} + \text{etc.} = 1.$$

Dans cette formule,  $n^1$  et  $n^2$  sont les proportions des gaz dans le mélange,  $N^1$  et  $N^2$  sont les limites d'inflammabilité de chacun de ces gaz.

Dès 1912-1913, G.-A. Burell (1), plus tard en collaboration avec Seibert et Oberfeel, détermina un certain nombre de limites d'inflammabilité de gaz de mines et de gaz naturels; les valeurs citées diffèrent peu de celles de Le Chatelier :

| Gaz                        | Limite inférieure | Limite supérieure | Température d'inflammabilité |
|----------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| Méthane . . . . .          | 5,5 %             | 14,0 %            | 650-750°                     |
| Oxyde de carbone . . . . . | 15,0 %            | 73,0 %            | 650°                         |
| Hydrogène . . . . .        | 10,0 %            | 66,0 %            | 585°                         |
| Gaz naturel . . . . .      | —                 | 12,0 %            | —                            |
| Acétylène . . . . .        | —                 | 75,0 %            | —                            |
| Ethylène . . . . .         | —                 | 22,0 %            | —                            |

(1) BURELL and SEIBERT. — U. S. Bureau of Mines. *Technical paper*, 39-42, 1913.

BURELL and OBERFEEL. — U. S. Bureau of Mines, 134-12.

Vers la même époque, Taffanel et Le Floch, en France, étudièrent les mélanges d'air et de grisou, fixant principalement leur température d'inflammation et leur retard à l'inflammation (2).

R. V. Wheeler et ses collaborateurs du « Safety in Mines Research Board » complétèrent les études existant sur les limites d'inflammabilité du méthane (3) en tenant compte de toutes les conditions d'expérimentation pouvant influencer ces limites. Ils trouvent notamment que :

1° la direction de propagation de la flamme a une grande influence : en opérant dans des tubes de verre de 2 mètres de long et de 6 centimètres de diamètre ; ces expérimentateurs obtinrent :

| Direction de propagation | % de méthane dans : |                   |
|--------------------------|---------------------|-------------------|
|                          | Limite inférieure   | Limite supérieure |
| Ascendante               | 5,4                 | 14,8              |
| Horizontale              | 5,4                 | 14,3              |
| Descendante              | 6,0                 | 13,4              |

2° les dimensions du matériel employé à la recherche de la limite agissent également en dessous d'un certain diamètre ; la cause en réside dans l'accroissement de la surface refroidissante :

| Diamètre des tubes de verre | % méthane inférieure | % méthane pour limite supérieure | Rapport surface/volume | Remarque                                      |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------|
| 50,0 mm.                    | 5,40                 | 14,30                            | 0,08                   | Propagation horizontale dans tous les essais. |
| 25,0 "                      | 5,80                 | 13,30                            | 0,16                   |                                               |
| 9,0 "                       | 7,80                 | 11,60                            | 0,44                   |                                               |
| 8,1 "                       | 8,30                 | 10,90                            | 0,49                   |                                               |
| 7,2 "                       | 8,45                 | 10,60                            | 0,55                   |                                               |
| 5,6 "                       | 8,50                 | 10,50                            | 0,71                   |                                               |
| 4,5 "                       | 9,95                 | 9,95                             | 0,89                   |                                               |
| 3,6 "                       | pas de propagation   |                                  | > 1                    |                                               |

(2) TAFFANEL et LE FLOCH. — *C. R.*, 156-157, 469 et 1545.

(3) WHEELER and BURGESS. — Limits of Inflammability of Firedamp and air. — Safety in Mines Research Board, paper n° 15.

COWARD and HARTWELL. — Limits of Inflammability of firedamp in atmospheres which contain blackdamp. — Safety in Mines Research Board, paper n° 19.

Au delà de 50 millimètres de diamètre, les limites ne sont point modifiées ; et en dessous de 4,5 millimètres de diamètre, les mélanges air-méthane ne conduisent plus la flamme : comme nous l'avons dit, cette constatation avait été faite par Davy (1) il y a plus d'un siècle et avait conduit cet expérimentateur à la découverte de la lampe de sûreté ;

3° la nature du matériel employé influe également : les tubes métalliques rayonnant plus aisément la chaleur que les tubes de verre, les limites d'inflammabilité se resserrent.

Cette propriété des tubes métalliques fut également appliquée dans les lampes de sûreté ;

4° de même, provoquer l'inflammation de mélanges air et méthane dans des tubes fermés ou ouverts aux extrémités, influence les limites. Cette action ne se manifeste cependant que pour les inflammations en propagation ascendante ; la limite inférieure est de 5,25 % au lieu de 5,40 % et la limite supérieure de 14 % au lieu de 14,80 %.

L'étude des conditions physiques où se trouvent les mélanges d'air et de méthane montra également à Wheeler et à ses collaborateurs que ces influences sont loin d'être négligeables : l'influence de la température en sera le premier exemple.

Lorsqu'on provoque dans un tube de verre l'inflammation d'un mélange d'air et de méthane, se trouvant entre les limites, on peut concevoir que la source de chaleur introduite dans ce mélange en porte une fraction à sa température de combustion, celle-ci se manifeste et la zone incandescente transmet sa chaleur aux couches gazeuses voisines, les amenant successivement à la température d'inflammation ; la flamme progresse donc dans le tube malgré la suppression de la source d'allumage. Il n'en est

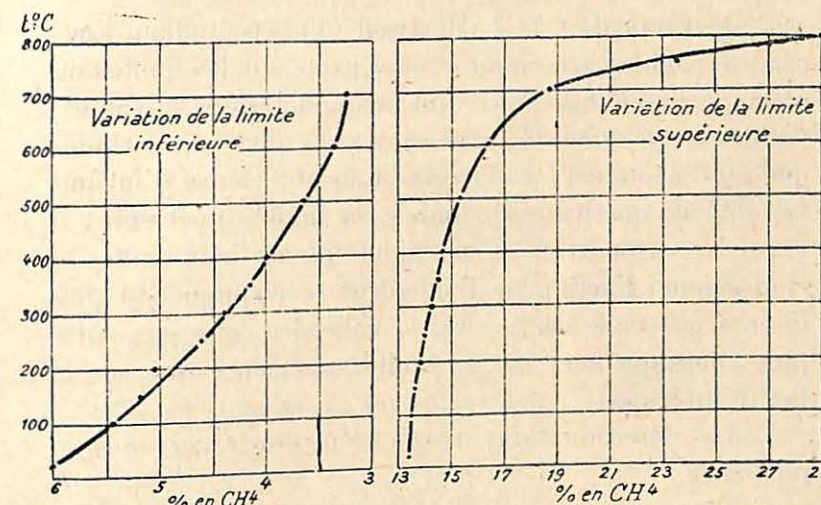
(1) S.-H. DAVY. — *Loc. cit.*

pas de même dans un mélange se trouvant en dehors des limites d'inflammabilité; une flamme introduite dans un tel mélange échauffe celui-ci dans le voisinage de la source de chaleur, en provoque la combustion locale, mais la chaleur dégagée est insuffisante pour porter les zones voisines à la température requise pour leur inflammation; le mélange ne propagera donc pas la flamme, en d'autres termes, il ne brûle pas; la flamme introduite dans ces mélanges change d'aspect, augmente de volume et s'entoure d'une zone chaude, formant le phénomène de l'auréole; celle-ci est produite par la combustion du méthane existant dans le gaz au voisinage de la flamme. Cette propriété est mise à profit et permet de déceler au moyen d'une lampe de sûreté à flamme, la présence de grisou dans l'atmosphère de la mine.

Il est donc clair que si la combustion ne se propage pas dans les mélanges air-méthane se trouvant en dehors des limites d'inflammabilité, il suffira d'un certain apport de chaleur pour permettre à l'inflammation de passer d'une couche gazeuse à l'autre.

Le tableau suivant et le graphique I renseignent les limites d'inflammabilité du méthane à différentes températures (propagation descendante):

| Température | % méthane pour :  |                   |
|-------------|-------------------|-------------------|
|             | Limite inférieure | Limite supérieure |
| 20° C.      | 6,00              | 13,40             |
| 100° C.     | 5,45              | 13,50             |
| 150° C.     | 5,20              | 13,60             |
| 200° C.     | 5,05              | 13,85             |
| 250° C.     | 4,60              | 14,00             |
| 300° C.     | 4,40              | 14,25             |
| 350° C.     | 4,15              | 14,50             |
| 400° C.     | 4,00              | 14,70             |
| 500° C.     | 3,65              | 15,35             |
| 600° C.     | 3,35              | 16,40             |
| 700° C.     | 3,25              | 18,75             |
| 750° C.     | —                 | 23,60             |
| 800° C.     | —                 | 29,00             |



GRAPHIQUE I.

L'influence de la pression est également manifeste d'après les chiffres suivants :

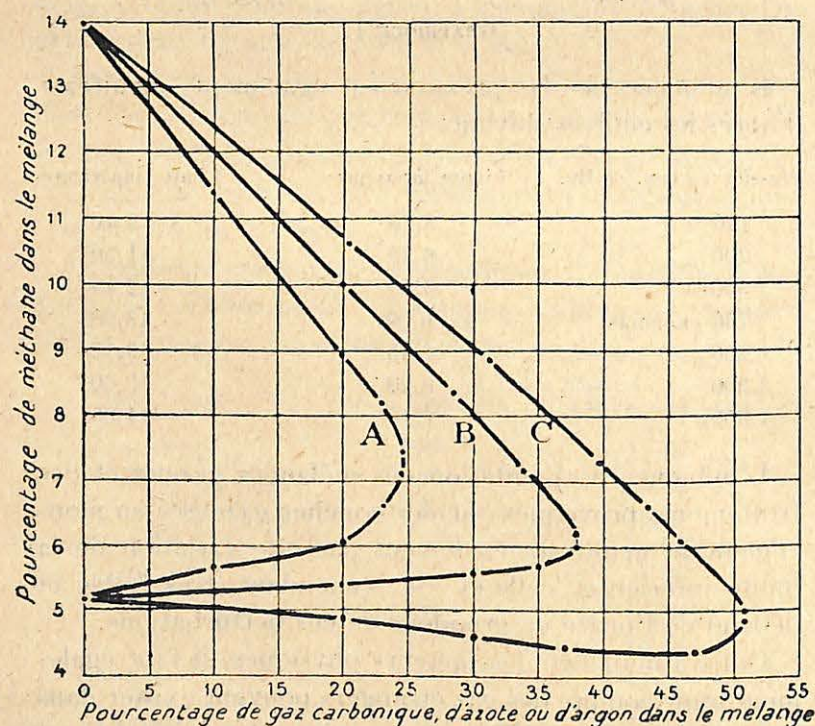
| Pression en mm. de Hg. | Limite inférieure | Limite supérieure |
|------------------------|-------------------|-------------------|
| 120                    | 8,75              | 9,40              |
| 200                    | 6,30              | 11,50             |
| 300                    | 6,10              | 12,40             |
| 760 (normal)           | 6,00              | 13,00             |
| 1.250                  | 6,05              | 13,15             |
| 2.900                  | 6,20              | 13,60             |
| 4.650                  | 6,40              | 14,05             |

L'influence de l'agitation des mélanges gazeux et des frottements provoqués par des couches gazeuses en mouvement se manifeste également par une variation de la limite inférieure; celle-ci est cependant très faible et dépend de l'ordre de grandeur de ces perturbations.

Outre l'influence des facteurs physiques, il faut également tenir compte des gaz étrangers pouvant exister dans les mélanges air-méthane et comprenant principalement l'acide carbonique, l'azote et la vapeur d'eau.

H.-F. Coward et F.-J. Hartwell (1), en étudiant l'action de l'acide carbonique et de l'azote sur les limites du mélange air-méthane, arrivent aux conclusions suivantes : l'addition de quantités croissantes d'anhydride carbonique ou d'azote à l'air élève la limite inférieure d'inflammabilité du méthane et abaisse sa limite supérieure ; il existe une proportion de gaz ajouté où les deux limites se confondent ; l'action de l'anhydride carbonique est plus intense que celle de l'azote, et celle des deux gaz porte plus énergiquement sur la limite supérieure que sur la limite inférieure.

Leurs déterminations permettent de tracer le graphique II :



GRAPHIQUE II.

(1) COWARD and HARTWELL. — Safety in Mines Research Board, paper 15, 1925.

On remarquera qu'il faut que l'atmosphère employée contienne 25 % de  $\text{CO}_2$  pour arriver à la limite mixte de 7,3 % de méthane (courbe A) ; en utilisant l'azote, il faut en employer 38 % pour arriver à la limite mixte de 6,15 % (courbe B) ; cette différence d'action est sensible et il semble qu'il faille l'attribuer aux chaleurs spécifiques différentes des deux gaz (2) ; pour le prouver, Coward et Hartwell reprirent les mêmes déterminations en employant l'argon (courbe C) dont la chaleur spécifique est bien moindre ; ils reconnurent qu'il faut ajouter 47 % d'argon à l'atmosphère pour porter la limite du méthane à 4,41 % ; de même, 51 % d'argon abaissent la limite supérieure à 5 %.

Coward et Hartwell concluent, en terminant leur étude, que des mélanges de méthane avec des atmosphères composées : d'air contenant 25 % de gaz carbonique ou plus ; ou, d'air contenant 38,5 % d'azote ou plus, sont inflammables ; ces atmosphères jouent un rôle extincteur et l'oxygène y figure en quantité insuffisante pour brûler le méthane en proportion plus forte que celle trouvée dans la limite mixte.

Au cours de nos recherches sur les mélanges air-grisou, nous avons été amené à vérifier l'action du gaz carbonique et de l'azote comme gaz extincteur, en recherchant en même temps l'influence de la température.

Nous rechercherons également l'action de la vapeur d'eau, dont la chaleur spécifique assez élevée agira probablement d'une manière analogue au gaz carbonique et à l'azote.

(2) Les tables annuelles des constantes et données numériques de chimie, physique et technologie, 1914, renseignent les valeurs suivantes de  $C_p$  (quantité de chaleur en grammes-calories pour une molécule-gramme du gaz sous volume constant) :

|                                     |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| Anhydride carbonique, de 0° à 2100° | 10,47.            |
| Azote de 0° à 2500°                 | 4,9 + 0,000 45 t. |
| Argon de 0° à 2500°                 | 2,977.            |
| Eau vapeur de 0° à 2500°            | 10,54.            |

Dans nos déterminations, il n'a pas été fait usage de méthane pur, mais de grisou naturel, capté dans une galerie abandonnée, située à 450 mètres de profondeur, Siège du Grand Trait, des Charbonnages Belges (puits n° 3), à Frameries.

Ce gaz, après enlèvement de l'anhydride carbonique et de l'oxygène, contient 73,80 % de méthane et 26,20 % d'azote; ses limites d'inflammabilité furent déterminées pour un tube de verre de 20 millimètres de diamètre et 1 mètre de longueur, en propagation horizontale; on obtint une limite inférieure de 7,7 % de grisou, soit 5,7 % de méthane, et une limite supérieure de 17 % de grisou, soit 12,55 % de méthane.

Différents mélanges gazeux ont été soumis aux essais d'inflammabilité.

Le tube servant à la détermination des limites est couché dans un four pouvant être chauffé par résistance électrique; un pyromètre très sensible permet de contrôler les diverses températures auxquelles on le porte.

Lorsque l'inflammation ne se manifeste pas à la température ordinaire, le mélange est réchauffé très progressivement et les essais d'inflammabilité sont continués jusqu'à ce que le mélange s'allume au contact d'une petite flamme et propage la combustion.

#### Mélanges air-méthane-gaz carbonique.

Ces mélanges ont été divisés en deux catégories, suivant qu'ils se trouvent en dessous ou au-dessus de la limite de Coward et Hartwell, c'est-à-dire de la limite inférieure extrême en présence de gaz carbonique, soit 7,1 à 7,2 % de  $\text{CH}_4$ .

#### Mélanges se trouvant en dessous de la limite

1. *Mélange A* tenant 8,62 % de grisou, soit 6,36 % de méthane + 2,26 % d'azote.

Observation : la quantité d'azote introduite par le grisou est additionnée dans les tableaux suivants à l'azote de l'air :

| COMPOSITION DU MÉLANGE |         |       |                | Rapport :<br>oxygène<br>méthane | Température<br>d'inflammabilité       |
|------------------------|---------|-------|----------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Méthane                | Oxygène | Azote | Gaz carbonique |                                 |                                       |
| %                      | %       | %     | %              |                                 | s'allume et propage la combustion dès |
| 6,36                   | 17,00   | 66,64 | 10             | 2,67                            | 90°                                   |
| 6,36                   | 15,96   | 62,68 | 15             | 2,51                            | 155°                                  |
| 6,36                   | 14,92   | 58,72 | 20             | 2,34                            | 240°                                  |
| 6,36                   | 13,87   | 54,77 | 25             | 2,18                            | 310°                                  |
| 6,36                   | 12,83   | 50,81 | 30             | 2,01                            | 395°                                  |
| 6,36                   | 11,78   | 46,86 | 35             | 1,85                            | 460°                                  |
| 6,36                   | 10,74   | 42,90 | 40             | 1,69                            | 540°                                  |
| 6,36                   | 9,69    | 38,95 | 45             | 1,52                            | 615°                                  |

Au delà de 650°, les observations deviennent difficiles, le tube étant chauffé au rouge; nos essais n'ont pas dépassé cette température.

2. *Mélange B* tenant 7,15 % de grisou, soit 5,27 % de méthane + 1,88 % d'azote.

| COMPOSITION DU MÉLANGE |         |       |                | Rapport :<br>oxygène<br>méthane | Température<br>d'inflammabilité                 |
|------------------------|---------|-------|----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|
| Méthane                | Oxygène | Azote | Gaz carbonique |                                 |                                                 |
| %                      | %       | %     | %              |                                 | s'allume et propage la combustion dès           |
| 5,27                   | 17,32   | 67,41 | 10             | 3,28                            | 220°                                            |
| 5,27                   | 16,27   | 63,46 | 15             | 3,08                            | 270°                                            |
| 5,27                   | 15,23   | 59,50 | 20             | 2,89                            | 335°                                            |
| 5,27                   | 14,18   | 55,55 | 25             | 2,69                            | 380°                                            |
| 5,27                   | 13,14   | 51,59 | 30             | 2,49                            | 410°                                            |
| 5,27                   | 12,09   | 47,64 | 35             | 2,29                            | 465°                                            |
| 5,27                   | 11,05   | 43,68 | 40             | 2,09                            | 515°                                            |
| 5,27                   | 10,00   | 39,73 | 45             | 1,90                            | 590°                                            |
| 5,27                   | 8,96    | 35,77 | 50             | 1,70                            | probablement vers 660°<br>visibilité difficile. |

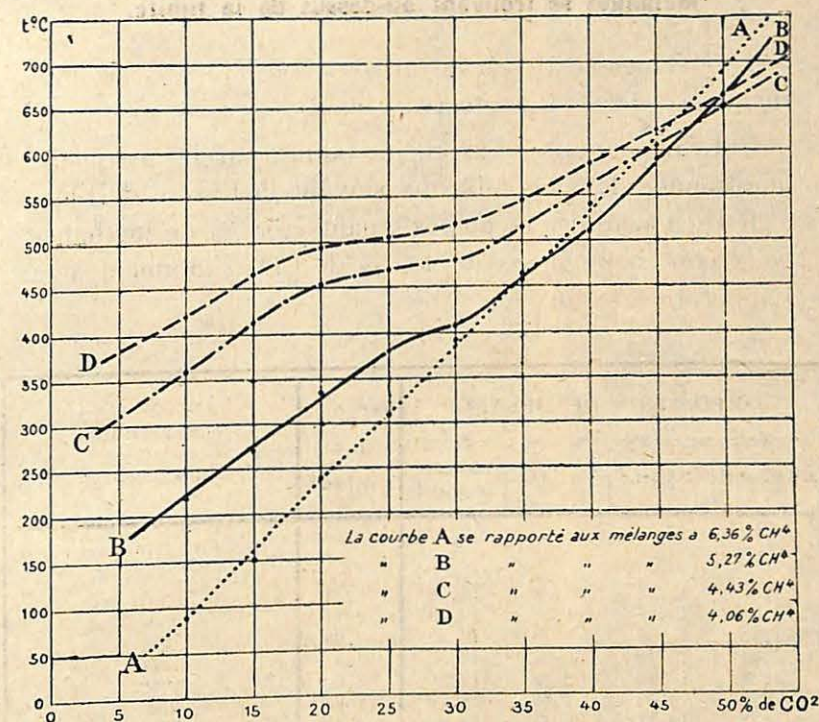
3. Mélange C tenant 6 % de grisou, soit 4,43 % de méthane + 1,57 % d'azote.

| COMPOSITION DU MÉLANGE |         |       |                | Rapport :<br>oxygène<br>méthane | Température<br>d'inflammabilité                                               |
|------------------------|---------|-------|----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Méthane                | Oxygène | Azote | Gaz carbonique |                                 |                                                                               |
| %                      | %       | %     | %              |                                 |                                                                               |
| 4,43                   | 17,55   | 68,02 | 10             | 3,96                            | s'allume et propage la combustion des 360° (flamme très pâle à peine visible) |
| 4,43                   | 16,51   | 64,06 | 15             | 3,72                            | 360°                                                                          |
| 4,43                   | 15,47   | 60,10 | 20             | 3,49                            | 415°                                                                          |
| 4,43                   | 14,42   | 56,15 | 25             | 3,25                            | 455°                                                                          |
| 4,43                   | 13,38   | 52,19 | 30             | 3,02                            | 470°                                                                          |
| 4,43                   | 12,33   | 48,24 | 35             | 2,78                            | 480°                                                                          |
| 4,43                   | 11,29   | 44,28 | 40             | 2,54                            | 515°                                                                          |
| 4,43                   | 10,24   | 40,33 | 45             | 2,31                            | 560°                                                                          |
| 4,43                   | 9,20    | 36,37 | 50             | 2,07                            | 605°                                                                          |
|                        |         |       |                |                                 | probablement vers 650° visibilité difficile.                                  |

4. Mélange D tenant 5,5 % de grisou, soit 4,06 % de méthane + 1,44 % d'azote.

| COMPOSITION DU MÉLANGE |         |       |                | Rapport :<br>oxygène<br>méthane | Température<br>d'inflammabilité              |
|------------------------|---------|-------|----------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Méthane                | Oxygène | Azote | Gaz carbonique |                                 |                                              |
| %                      | %       | %     | %              |                                 |                                              |
| 4,06                   | 17,66   | 68,28 | 10             | 4,35                            | s'allume et propage la combustion des 420°   |
| 4,06                   | 16,61   | 64,33 | 15             | 4,09                            | 465°                                         |
| 4,06                   | 15,57   | 60,37 | 20             | 3,83                            | 495°                                         |
| 4,06                   | 14,52   | 56,42 | 25             | 3,57                            | 505°                                         |
| 4,06                   | 13,48   | 52,46 | 30             | 3,32                            | 520°                                         |
| 4,06                   | 12,43   | 48,51 | 35             | 3,06                            | 545°                                         |
| 4,06                   | 11,39   | 44,55 | 40             | 2,80                            | 585°                                         |
| 4,06                   | 10,34   | 40,60 | 45             | 2,54                            | 620°                                         |
| 4,06                   | 9,30    | 36,64 | 50             | 2,29                            | probablement vers 660° visibilité difficile. |

Les résultats expérimentaux de ces quatre séries de mélanges en dessous de la limite sont portés dans le graphique III.



GRAPHIQUE III.

La courbe A est sensiblement une droite. La courbe B présente une inflexion; il en est de même, et d'une façon plus marquée, pour les courbes C et D. Remarquons également que ces différentes courbes se recoupent; à ces points de rencontre, nous trouvons des températures d'inflammabilité identiques, pour des mélanges gazeux, de compositions assez différentes quant au méthane et à l'oxygène, mais à teneurs égales en CO<sub>2</sub>; au delà de ces points de rencontre, les mélanges gazeux à teneur plus faible en méthane s'enflamment et propagent la combustion à des températures inférieures à celles requises par des mélanges plus riches en hydrocarbure.

**Mélanges se trouvant au-dessus de la limite.**

1. Mélange à 10 % de grisou, soit 7,38 % de méthane + 2,62 % d'azote (courbe D).

R I. La quantité d'azote introduite par le grisou est additionnée dans les tableaux suivants à l'azote de l'air.

R II. Parmi ces mélanges tenant 7,38 % de méthane, ceux contenant moins de 14 % de CO<sup>2</sup> s'allument à la température ordinaire.

| COMPOSITION DU MÉLANGE |         |       |                | Rapport :<br>oxygène<br>méthane | Température<br>d'inflammabilité                 |
|------------------------|---------|-------|----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|
| Méthane                | Oxygène | Azote | Gaz carbonique |                                 |                                                 |
| %                      | %       | %     | %              |                                 | s'allume et propage la combustion dès           |
| 7,38                   | 15,78   | 62,34 | 14,50          | 2,14                            | 30°                                             |
| 7,38                   | 15,57   | 61,55 | 15,50          | 2,11                            | 60°                                             |
| 7,38                   | 15,36   | 60,76 | 16,50          | 2,08                            | 95°                                             |
| 7,38                   | 15,15   | 59,97 | 17,50          | 2,05                            | 125°                                            |
| 7,38                   | 14,73   | 58,39 | 19,50          | 2,00                            | 175°                                            |
| 7,38                   | 14,42   | 57,20 | 21,00          | 1,95                            | 210°                                            |
| 7,38                   | 14,21   | 56,41 | 22,00          | 1,92                            | 235°                                            |
| 7,38                   | 13,69   | 54,43 | 24,50          | 1,85                            | 295°                                            |
| 7,38                   | 13,27   | 52,85 | 26,50          | 1,80                            | 335°                                            |
| 7,38                   | 12,96   | 51,66 | 28,00          | 1,75                            | 380°                                            |
| 7,38                   | 12,64   | 50,48 | 29,50          | 1,71                            | 425°                                            |
| 7,38                   | 12,33   | 49,29 | 31,00          | 1,67                            | 455°                                            |
| 7,38                   | 11,70   | 46,92 | 34,00          | 1,58                            | 520°                                            |
| 7,38                   | 11,07   | 44,55 | 37,00          | 1,50                            | 595°                                            |
| 7,38                   | 10,45   | 42,17 | 40,00          | 1,41                            | probablement vers 660°<br>visibilité difficile. |

2. Mélange à 12,15 % de grisou, soit 8,97 % de méthane + 3,18 % d'azote (courbe C).

R. Parmi ces mélanges tenant 8,97 % de méthane, ceux en dessous et jusque 10 % de CO<sup>2</sup> s'allument et propagent la combustion à la température ordinaire.

| COMPOSITION DU MÉLANGE |         |       |                | Rapport :<br>oxygène<br>méthane | Température<br>d'inflammabilité       |
|------------------------|---------|-------|----------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Méthane                | Oxygène | Azote | Gaz carbonique |                                 |                                       |
| %                      | %       | %     | %              |                                 | s'allume et propage la combustion dès |
| 8,97                   | 15,22   | 60,81 | 15             | 1,69                            | 165°                                  |
| 8,97                   | 14,18   | 56,85 | 20             | 1,58                            | 320°                                  |
| 8,97                   | 13,13   | 52,90 | 25             | 1,46                            | 470°                                  |
| 8,97                   | 12,09   | 48,94 | 30             | 1,35                            | 625°                                  |

3. Mélange à 14,35 % de grisou, soit 10,59 % de méthane + 3,75 % d'azote (courbe B).

R. Le mélange de 14,35 % de grisou et de 85,65 % d'air s'allume à la température ordinaire; il se trouve en dessous de la limite supérieure (17 % de grisou ou 12,55 % de méthane) déterminée pour le matériel employé.

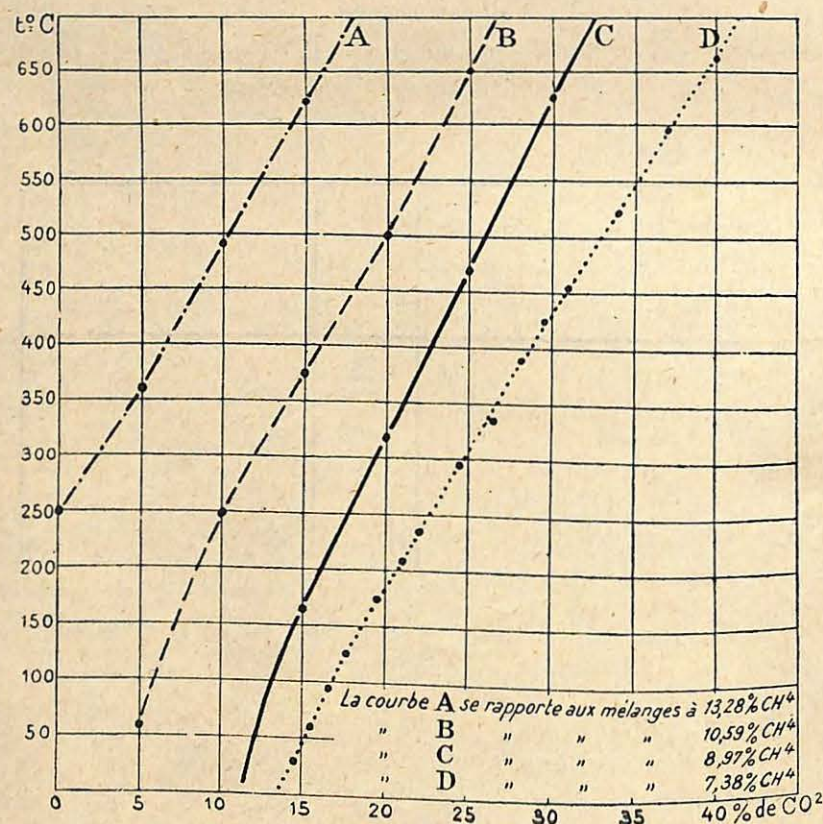
| COMPOSITION DU MÉLANGE |         |       |                | Rapport :<br>oxygène<br>méthane | Température<br>d'inflammabilité                     |
|------------------------|---------|-------|----------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Méthane                | Oxygène | Azote | Gaz carbonique |                                 |                                                     |
| %                      | %       | %     | %              |                                 | s'allume et propage la combustion dès               |
| 10,59                  | 16,85   | 67,56 | 5              | 1,59                            | 60°<br>(la propagation de la flamme est très lente) |
| 10,59                  | 15,81   | 63,60 | 10             | 1,49                            | 250°                                                |
| 10,59                  | 14,76   | 59,65 | 15             | 1,39                            | 375°                                                |
| 10,59                  | 13,72   | 55,69 | 20             | 1,29                            | 500°                                                |
| 10,59                  | 12,67   | 51,74 | 25             | 1,19                            | probablement vers 650°<br>visibilité difficile      |

4. Mélange à 18 % de grisou, soit 13,28 % de méthane + 4,72 % d'azote (courbe A).

R. Le mélange à 18 % de grisou et 82 % d'air se trouve au-dessus de la limite supérieure d'inflammabilité: il ne s'allume et propage la combustion qu'à 250°.

| COMPOSITION DU MÉLANGE |         |       |                | Rapport :<br>oxygène<br>méthane | Température<br>d'inflammabilité       |
|------------------------|---------|-------|----------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Méthane                | Oxygène | Azote | Gaz carbonique |                                 |                                       |
| %                      | %       | %     | %              |                                 | s'allume et propage la combustion dès |
| 13,28                  | 17,14   | 69,58 | 0              | 1,29                            | 250°                                  |
| 13,28                  | 16,09   | 65,63 | 5              | 1,21                            | 360°                                  |
| 13,28                  | 15,05   | 61,67 | 10             | 1,13                            | 480°                                  |
| 13,28                  | 14,00   | 57,72 | 15             | 1,05                            | 620°                                  |
| 13,28                  | 12,96   | 49,04 | 20             | 0,98                            | n'a pas enflammé à 660.               |

Les résultats expérimentaux de ces quatre séries de mélanges se trouvant au-dessus de la limite sont portés dans le graphique IV.



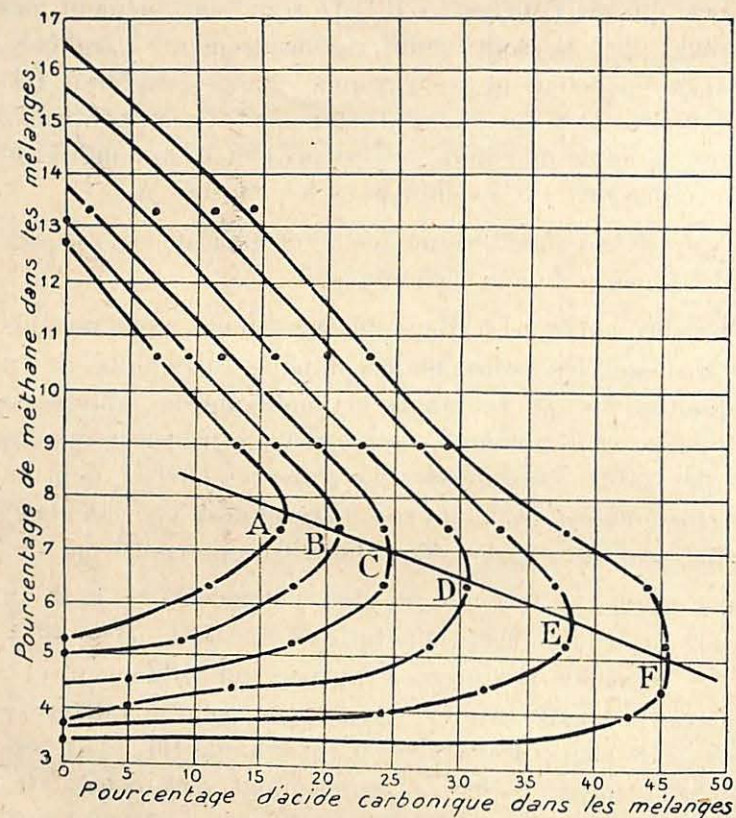
GRAPHIQUE IV.

Les quatre courbes A-B-C-D sont sensiblement des droites; elles ne sont point rigoureusement parallèles, mais ne se recoupent point comme dans le graphique III. La courbe D a été assez fortement développée, mais comme aucune inflexion ne s'est présentée, le nombre de déterminations a été réduit pour les courbes A-B-C.

Nous avons ainsi terminé les déterminations se rapportant à l'action du gaz carbonique.

Remarquons que si, dans un diagramme, nous portons en abscisses les pourcentages d'acide carbonique et en ordonnées les pourcentages de méthane des différents mélanges expérimentés, nous pouvons tracer pour des températures déterminées, une série de courbes, dont un certain nombre de points sont déterminés expérimentalement, et d'autres sont déterminés par interpolation.

Le graphique V donne les allures des courbes A, B, C, D, E, F, pour les températures de 100, 200, 300, 400, 500 et 600 centigrades; on voit immédiatement que ces courbes sont du même genre que celle des déterminations de Coward et Hartwell (graphique II), elles possèdent la même forme et représentent sensiblement les mêmes essais aux températures indiquées ci-dessus; chacune de ces courbes est donc un isotherme.



GRAPHIQUE V.

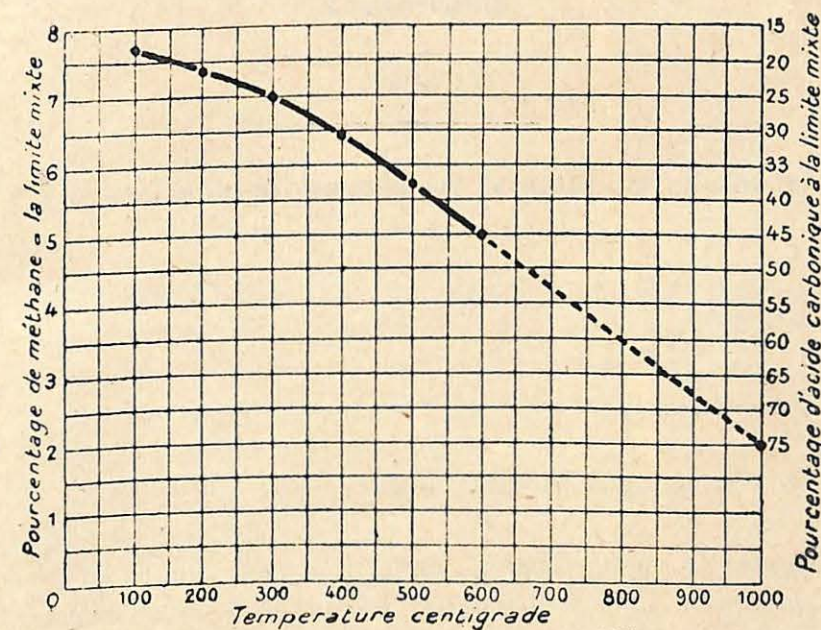
Comme dans la courbe de Coward et Hartwell, nous constatons l'abaissement de la limite supérieure et l'élévation de la limite inférieure d'inflammabilité; d'autre part, l'influence de la température se traduit comme dans les essais de Wheeler (graphique I), par un abaissement de la limite inférieure; dans ce cas-ci, de la limite mixte.

En réunissant les points extrêmes de chacun de ces isothermes A, B, C, D, E, F, nous obtenons sensiblement une droite réunissant les limites mixtes aux différentes températures indiquées.

Le tableau suivant indique les caractéristiques de ces limites mixtes :

| Courbe | Température | Méthane à la limite % | Gaz carbonique % |
|--------|-------------|-----------------------|------------------|
| A      | 100°        | 7,70                  | 17,0             |
| B      | 200°        | 7,35                  | 21,0             |
| C      | 300°        | 7,00                  | 24,5             |
| D      | 400°        | 6,45                  | 30,5             |
| E      | 500°        | 5,70                  | 38,5             |
| F      | 600°        | 5,00                  | 45,5             |

Par extrapolation graphique, ces valeurs peuvent nous fournir la teneur en méthane de la limite mixte, à des températures plus élevées; le graphique VI donne en pointillé la partie extrapolée.



GRAPHIQUE VI.

A 700°, la limite serait de 4,25 % de méthane pour 52,5 % de gaz carbonique; à 800°, elle serait de 3,5 % de méthane pour 60 % de gaz carbonique; à 900°, elle serait de 2,75 % de méthane pour 67,5 % de gaz carbonique, et à 1000°, le mélange combustible de la limite mixte tiendrait 2 % de méthane, 75 % de gaz carbonique et 23 % d'air, soit 4,80 % d'oxygène et 18,2 % d'azote.

SERVICE DES ACCIDENTS MINIERS ET DU GRISOU

## LES ACCIDENTS SURVENUS

DANS LES

# Charbonnages de Belgique

pendant l'année 1923

PAR

G. RAVEN

Ingénieur en chef-Directeur des Mines, à Bruxelles.

## Accidents survenus dans les travaux souterrains.

(Suite) (1).

### Les accidents provoqués par l'emploi des explosifs.

Pendant l'année 1923, ces accidents ont été au nombre de 16, ce qui correspond à 8,55 % du nombre total des accidents survenus dans les travaux souterrains.

Ils ont causé la mort de 8 ouvriers et occasionné des blessures graves à 11 autres.

Pour 10.000 ouvriers de l'intérieur, la proportion de tués a été de 0,73.

Le nombre des ouvriers qui ont trouvé la mort dans les accidents de cette espèce, représente 5,3 % du nombre

(1) Voir *Annales des Mines de Belgique*, tome XXVIII (année 1927), 1<sup>re</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> livraisons.