

Chimie et physique de la pyrotechnie



Sommaire

1	Informations générales sur la combustion et la mise à feu d'engins d'artifice	2
2	Composition pyrotechnique	3
2.1	Oxydants (comburants)	3
2.2	Combustibles.....	3
2.3	Adjuvants	3
2.3.1	Exemple: la poudre noire	4
3	Allumage.....	4
4	Lumière et coloration des flammes.....	5
5	Lumière et étincelles.....	5
6	Détonation	5
7	Sifflements et hurlements.....	6
8	Fumée et brouillard	6
8.1	Fumée blanche.....	6
8.2	Fumée colorée	6
8.3	Brouillard blanc.....	7
8.3.1	Brouillard de neige carbonique / CO ₂	7
8.3.2	Machine à fumée (brouillard)	7
9	Feux sans fumée	7
10	Feux de scène	8
11	Mouvement	8
12	Consignes de sécurité	9
13	Aspects légaux.....	9
14	Sources tirées de la littérature et de l'internet	9

Remarque: *les textes en italique permettent d'approfondir le sujet.*

1 Informations générales sur la combustion et la mise à feu d'engins d'artifice

Il est bien connu qu'une combustion a besoin d'air, en particulier de l'oxygène qu'il contient. Une fois allumée, la matière combustible (le bois, le charbon, le fioul, le gaz naturel, etc.) se lie à l'oxygène et forme un nouveau corps, un oxyde. C'est ainsi que le chimiste parle d'oxydation. L'un des produits d'oxydation les plus connus est le dioxyde de carbone (CO_2).

(En chimie, la combustion est une réaction «redox». En d'autres mots, l'oxydant est réduit et la matière qui brûle est oxydée. Il s'agit d'une réaction impliquant la migration d'électrons, qui n'est pas exclusive à l'oxygène. Nous n'irons pas plus loin en explications ici, elles sortiraient du cadre de ce cours.)

Mais comment brûle donc une pièce d'artifice, par exemple un volcan, qui peut fonctionner sans arrivée d'air, même sous l'eau? La résolution de cette question a conditionné tout le développement des feux d'artifice. Il a fallu trouver une matière qui contient elle-même de l'oxygène, de l'oxygène sous forme de poudre en quelque sorte. Cette matière existe bel et bien. La première à avoir été découverte était le «salpêtre» (du nitrate de potassium ou de sodium), un sel produit naturellement par la décomposition de matières organiques contenant de l'azote (par ex. des excréments). Une fois chauffé, il se décompose et libère une quantité relativement élevée d'oxygène. Dans le cas du nitrate de potassium, l'élément principal de la poudre noire, cette quantité correspond à 40 pour cent du poids. C'est tout à fait par hasard que l'on a découvert l'effet d'intensification du feu que possédait cette matière lorsqu'elle était jetée sur des braises. Le salpêtre et autres nitrates sont dits oxydants. Entretemps, on a découvert une multitude d'oxydants. Ceux-ci ont tous pour but de pourvoir le mélange d'artifice ou, plus précisément, la composition pyrotechnique, en oxygène. La combustion d'une composition pyrotechnique peut se produire à des vitesses très différentes. Cette vitesse dépend d'une part du type et de la composition de la formulation et, d'autre part, de la façon dont la charge est intégrée à la pièce d'artifice (si elle simplement contenue dans une chambre ou si elle y est compactée). La vitesse de combustion peut aller de quelques millimètres par seconde (par ex. pour les feux de Bengale) à plus de mille mètres par seconde (par ex. pour les charges détonantes). Dans tous les cas, de l'énergie est libérée sous forme de chaleur. C'est ce que les chimistes appellent une réaction exotherme.

(Jusqu'à des vitesses de 1500 m/s, on parle de déflagration; au-delà, c'est une détonation. Dans ce dernier cas, pour certains explosifs, on mesure des vitesses pouvant aller jusqu'à plus de 8 000 m/s).

2 Composition pyrotechnique

On entend par composition pyrotechnique un mélange de matières dont la combustion, avec dégagement d'énergie, produit l'effet recherché. Cet effet peut être de type lumière, étincelle, sifflement, détonation, fumée, brouillard, poussée et mouvement. Une pièce d'artifice peut mettre en œuvre plusieurs compositions (charges) pyrotechniques différentes, qui peuvent produire différents effets. Les principaux éléments d'une composition sont décrits ci-dessous:

2.1 Oxydants (comburants)

Sous l'action de la chaleur, ces éléments libèrent l'oxygène nécessaire à la combustion à l'abri de l'air.

Principaux oxydants:

- **nitrates:** *nitrate de potassium (salpêtre), nitrate de sodium, nitrate de strontium, nitrate de baryum et nitrate d'ammoniaque;*
- **chlorates:** *chlorate de potassium, chlorate de baryum;*
- **perchlorates:** *perchlorate de potassium, perchlorate d'ammonium;*
- **oxydes:** *oxydes de fer, oxydes de cuivre, oxydes de plomb rouge, dioxyde de manganèse;*
- **peroxydes:** *peroxyde de baryum.*

2.2 Combustibles

Ces éléments sont ceux qui fournissent l'énergie, qui produisent de la chaleur, de la lumière et des gaz.

Principaux combustibles:

- **non-métaux:** *charbon de bois, soufre, silicium, bore;*
- **composés organiques:** *sucre, amidon, résines naturelles, benzoates, résines synthétiques, salicylates, etc.;*
- **métaux:** *magnésium, aluminium, alliages de magnésium et d'aluminium («magnalium»), titane, fer, zinc, zirconium, etc.;*
- **sulfures métalliques:** *trisulfure d'antimoine.*

2.3 Adjuvants

- **Liants:** les résines naturelles et les résines synthétiques permettent de transformer une composition sous forme de poudre en solide.

Exemples d'application: tête d'allumette, comète, étoile, etc.

Catégories de matière utilisées: amidon, gomme arabique, résine accroïde, colophane, gomme-laque, gélatine

Polymère: époxy, PUR et autres résines synthétiques

- **Agents de couleur:** les combinaisons réalisées avec les éléments suivants colorent la flamme comme suit:

sodium	Na	coloration jaune
calcium	Ca	coloration orange
strontium	Sr	coloration rouge
baryum	Ba	coloration verte
cuivre	Cu	coloration bleue

Des mélanges permettent également d'obtenir des nuances intermédiaires, comme le violet, le bleu-vert, le turquoise, le vert tirant sur le jaune, etc.

Les compositions sont le plus souvent des carbonates, des nitrates, des oxalates et des sulfates. Les nitrates et les chlorates agissent simultanément en tant qu'oxydants et agents de couleur.

- **Catalyseurs:** ces adjuvants permettent de jouer sur la vitesse de combustion d'une composition pour la ralentir ou l'accélérer.

Exemple: pour un feu de Bengale, le catalyseur ralentit la combustion, pour une bombe détonante, il l'accélère.

2.3.1 Exemple: la poudre noire

Exemple type, la poudre noire est la plus importante composition pyrotechnique. Elle est tout à la fois ancêtre et «reine» des compositions pour feux d'artifice. Cette matière est fabriquée plus ou moins de la même façon depuis plus de mille ans (!). Aujourd'hui encore, la pyrotechnie ne serait pas imaginable sans poudre noire.

Exemples d'applications actuelles:

- abattage à l'explosif en carrière;
- remplissage de mèches d'allumage;
- charges de poudre pour fusées d'artifice;
- charges de lancement pour compacts, chandelles romaines et bombes d'artifice de tout type;
- composition des charges des volcans, étoiles, comètes, etc.;
- mise à feu d'articles pyrotechniques de tout type;
- poudre à canon pour reconstitutions historiques;
- charges de tir pour charges propulsives d'artillerie.

Composition usuelle de la poudre noire:

- nitrate de potassium 75% oxydant
- charbon de bois 15% combustible
- soufre 10% combustible

Si l'on se contente de mélanger les différents composants de la fameuse poudre, on ne pourra qu'être déçu. Ce n'est qu'en mélangeant intimement ses ingrédients et en compressant le mélange à l'aide de moulins à poudre spéciaux, puis en le transformant en grains par granulation qu'on obtient une poudre noire de haute qualité.

Les caractéristiques techniquement intéressantes d'une poudre noire sont: une très bonne inflammabilité, une très bonne stabilité à la conservation (pendant des décennies), une production de gaz moyenne et de bonnes caractéristiques de combustion (sous pression, la vitesse de combustion n'augmente que relativement peu, contrairement à la nitrocellulose - la poudre sans fumée).

3 Allumage

Pour qu'une combustion se produise, il doit y avoir allumage, c'est-à-dire apport d'énergie de l'extérieur pour induire la réaction chimique de la combustion. Le chimiste parle d'énergie d'activation. Cette énergie peut être de la chaleur (amorce électrique, allumette, etc.), un frottement ou un coup. Sans apport d'énergie du dehors, il n'y a pas d'auto-inflammation des compositions pyrotechniques chimiquement stables.

4 Lumière et coloration des flammes

La lumière et les couleurs naissent de phénomènes physiques. Prenons l'exemple d'une ampoule à incandescence classique, dont la lumière peut être atténuée.

Lors de la mise en fonction du variateur, moins de courant (moins d'énergie) est transmis au filament. Le fil de l'ampoule ne s'échauffe que peu et émet une lumière rouge (environ 800 °C). En augmentant la quantité d'énergie fournie, le filament devient plus chaud et la couleur passe à l'orange, au jaune, puis au blanc (environ 2800 °C). La lumière blanche neutre est formée par l'addition de toutes les couleurs du spectre dans le domaine visible. Celui-ci va de 380 nm (violet) à 780 nm (rouge). La lumière émise par les feux d'artifice est soumise aux mêmes principes physiques. Au lieu du courant, c'est l'énergie de la combustion qui est utilisée pour chauffer des particules solides.

A des températures de combustion relativement basses, les flammes sont rouge-orange à jaune, comme pour le feu de bois, les flambeaux, les barbecues, les comètes d'or, les palmiers d'or, les bombes kamuro, etc. Avec l'augmentation de la température, qui suppose la présence de métaux dans les pièces d'artifice, la lumière émise est plus intense et plus blanche encore. Des températures de plus de 3000 °C sont atteintes avec le magnésium et certains oxydants.

Certains éléments chimiques, le plus souvent des métaux ou leurs composés, ont la propriété d'émettre à température élevée une partie de leur charge énergétique sous forme de lumière. En choisissant soigneusement les conditions de réaction, on obtient une lumière colorée. Les éléments qui interviennent à ce niveau sont décrits à la section 2.3.

Le processus physique d'émission de lumière se produit dans les couches d'électrons extérieures de l'enveloppe atomique. Lors d'un fort échauffement, les électrons sautent brièvement de la couche inférieure à la couche immédiatement supérieure, pour retomber rapidement ensuite. Lors de cette chute, ils relâchent l'énergie emmagasinée auparavant sous forme de quanta de lumière (photons).

5 Lumière et étincelles

Les charges d'artifice qui contiennent des métaux comme le magnésium, l'aluminium, le titane et leurs alliages sont utilisées pour générer de la **lumière** sous forme d'étoiles claires, de bombes éclairs et de poudres éclairantes. Les **étincelles**, comme on en voit dans les comètes, les cierges magiques, les étoiles filantes, les fontaines, les bombes à chrysanthèmes, les cascades, etc. sont produites à partir de particules métalliques la plupart du temps de grande taille ou de types spéciaux de charbon de bois.

Dans les pièces d'artifice produisant de longues queues d'étincelle, un effet de combustion supplémentaire est ajouté. Les différentes particules de combustible, qu'il s'agisse de métaux ou de charbons de bois, sont échangées lors de la combustion de la charge et expulsées par les gaz chauds pour obtenir l'oxygène nécessaire à la poursuite de la combustion dans l'air. C'est ainsi que l'on obtient les pluies d'or et d'argent de longue durée ainsi que les longues queues de comète.

6 Détonation

La composition de charges à haute énergie brûlant extrêmement vite à base de fines poudres de métal (combustible) et d'oxydants adaptés permet de produire des effets de détonation. En jouant sur la formulation de la charge, le type de bourrage et la quantité mise en œuvre, il est possible d'adapter le son et son intensité à l'effet recherché.

La détonation est une modification soudaine et violente de la densité de l'air qui peut être provoquée, notamment, par une explosion. L'onde de choc est perçue comme un son.

7 Sifflements et hurlements

Les pièces d'artifice sifflantes et hurlantes produisent un effet tout particulier. L'effet provient de ce que la charge sifflante n'est compressée que partiellement dans un tube en carton ou en plastique. La combustion se produit de manière intermittente (par à-coups) à intervalles très courts. Des ondes de choc sont générées dans la colonne d'air située au-dessus de la charge, lesquelles sont perçues comme des sifflements ou des hurlements. Le ton change et devient plus grave en raison de l'espace aérien qui grandit de plus en plus au-dessus de la charge au cours de la combustion. Ainsi naît le sifflement et hurlement typiques des sifflets (sirènes) pyrotechniques.

8 Fumée et brouillard

La plupart des réactions pyrotechniques produisent de la fumée et du brouillard, que cela soit souhaité ou non. Mais penchons-nous d'abord sur la différence entre la fumée et le brouillard.

La **fumée** se compose de fines particules solides distribuées dans l'air (poussières fines). Il s'agit des produits réactionnels solides du processus de combustion. Pour les fumigènes, ces produits réactionnels sont générés intentionnellement.

Le **brouillard** est composé de minuscules gouttes de liquide (le plus souvent de l'eau) en suspension dans l'air.

Un brouillard se forme si l'humidité relative de l'air augmente à plus de 100% et qu'il y a condensation. Des matières présentant des propriétés hygroscopiques fortes peuvent contribuer à la formation de brouillard lorsqu'elles sont distribuées finement dans l'air et en présence d'une humidité dans l'air naturelle suffisante.

8.1 Fumée blanche

Pour l'extérieur

La fumée produite pour un usage à l'extérieur se compose le plus souvent d'une combinaison de produits chimiques. Cette fumée est irritante et nocive, il convient d'éviter de la respirer. En outre, elle attaque le métal et peut engendrer des dommages par corrosion. Ce type de fumée est utilisé pour produire des effets cinématographiques et théâtraux en plein air, ainsi que dans le cadre d'entraînements des sapeurs-pompiers avec appareil respiratoire. Les grenades fumigènes militaires reposent également sur ce principe.

8.2 Fumée colorée

Pour l'extérieur

Les fumées colorées sont constituées de colorants organiques solides diffusés de manière extrêmement fine dans l'air. En pratique, cela se passe à peu près comme ceci: un pigment de couleur synthétique ou organique est ajouté à une charge d'artifice brûlant à une température relativement basse (charge à combustion lente). Lors de la combustion, la charge est sublimée et forme immédiatement une fumée de couleur dense dont la couleur dépend des pigments de couleur les plus fins. Comme elle est composée de matières solides, cette fumée se condense et les particules qu'elle contient se déposent. Elle risque ainsi de contaminer visiblement l'environnement proche du lieu de combustion. Cela en limite l'utilisation pratique. Un usage à l'intérieur est par conséquent à déconseiller.

8.3 Brouillard blanc

Sur scènes et à l'intérieur

Il existe deux méthodes pour générer du brouillard blanc. Elles reposent toutes deux sur la formation de fines gouttes de liquide (brouillard).

8.3.1 Brouillard de neige carbonique / CO₂

La neige carbonique est du dioxyde de carbone refroidi à une température de -78 °C. La génération d'un brouillard de neige carbonique s'effectue en plongeant de la neige carbonique solide dans de l'eau chaude. Au contact de l'eau, la neige produit un brouillard froid fortement enrichi en gaz carbonique. Comme le mélange est froid et que le CO₂ est plus lourd que l'air, ce brouillard rampe au sol.

Attention! Les acteurs sur la scène ne doivent plonger la tête dans le brouillard de neige carbonique que peu de temps. Le brouillard n'est pas nocif, mais il prend la place de l'oxygène au sol. Il y a donc bien un risque d'asphyxie. Il convient d'accorder toute son attention à ce phénomène si un orchestre est présent dans la fosse ou si des spectateurs sont situés en contrebas de la scène!

8.3.2 Machine à fumée (brouillard)

En intérieur et sur scène, on utilise aujourd'hui presque exclusivement la technique du fluide à fumée. Le principe en est le suivant: dans la machine électrique à fumée, un mélange d'eau déminéralisée et, par exemple, de propylène glycol chauffé par un chauffe-eau à environ 290 °C est soufflé par une fine tuyère. Dès que la vapeur chaude entre en contact avec l'air froid, il y a génération d'un aérosol composé de microgouttes formant la fumée. Le propylène glycol a pour but de former des germes de condensation. Le brouillard qui en résulte est non toxique et ne crée pas de résidus.

9 Feux sans fumée

A base de nitrocellulose (NC)

Lorsqu'il s'agit d'éviter les fumées, on utilise la plupart du temps des produits pyrotechniques à base de nitrocellulose. La nitrocellulose provient de la cellulose naturelle (coton) traitée chimiquement avec des concentrations d'acide nitrique et d'acide sulfurique (nitration) pour former un produit aux propriétés tout à fait différentes. Sa combustion se produit presque sans fumée en dégageant une flamme jaune, claire. La nitrocellulose est utilisée pour fabriquer du pyroxyle, de la ficelle et du papier, en fonction du degré de nitration. La nitrocellulose trouve également une application dans les étoiles évanescentes, les colonnes de feu et les charges de lancement de bombes de table.

Outre son avantage de ne pas produire de fumée lors de la combustion, la nitrocellulose présente une propriété problématique pour l'artificier: sa vitesse de combustion augmente exponentiellement en cas d'augmentation de la pression. Un bourrage ou des quantités plus importantes peuvent entraîner très rapidement une explosion incontrôlée. C'est pourquoi, l'utilisation de nitrocellulose exige une prudence toute particulière.

Contrairement à une charge d'artifice composée d'un mélange d'oxydant et d'un combustible, la nitrocellulose est une matière homogène. L'oxygène nécessaire à la combustion est intégré chimiquement à la molécule. Lors de la combustion (ou d'une explosion), la réaction de réduction se produit au niveau intramoléculaire.

10 Feux de scène

Les effets mentionnés ci-dessous sont utilisés principalement sur scène et ne tombent pas sous le coup de la loi relative aux substances explosibles.

Feu de scène (feu ordinaire)

Le feu de scène naît par combustion d'une pâte à feu de sécurité. Il s'agit le plus souvent d'un mélange d'alcool épaissi qui produit une belle flamme naturellement jaune sans fumée ou presque. Le feu brûle principalement dans des coupes en métal.

Feu de scène coloré

Ce type de feu fait intervenir principalement de l'alcool méthylique (toxique!) enrichi de matières colorant les flammes. Ces matières et leurs combinaisons sont plus ou moins les mêmes que celles décrites à la section 2.2 (coloration des flammes).

Attention! En raison de la toxicité de ces produits, il convient d'assurer une bonne ventilation des lieux lors de l'installation. En cas de grandes quantités, il est recommandé que l'opérateur porte un masque au charbon actif. Les gaz de combustion avec lesquels le public entre en contact n'est cependant pas critique.

Boules de feu à base de spores de *lycopodium*

Les spores de *lycopodium* proviennent d'une plante qui croît dans les régions tempérées et subarctiques. Lorsqu'ils sont finement répartis dans l'air, ces spores se distinguent par leur bonne inflammation. Cette propriété est mise à profit en soufflant de la poudre de *lycopodium* avec de l'air comprimé sur une veilleuse à l'aide d'un appareillage spécial. Les spores s'enflamment et une boule de feu se forme. Techniquement parlant, c'est un coup de poussière contrôlé accompagné d'un phénomène spectaculaire.

Projecteurs de gaz / lance-flammes (gaz)

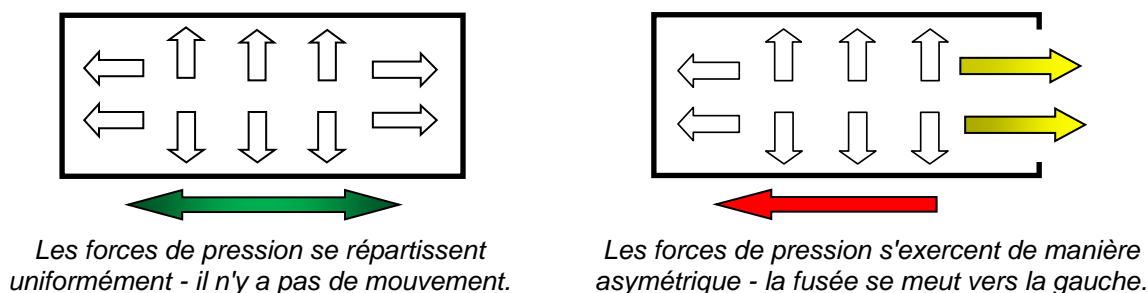
Les lance-flammes font appel le plus souvent à du butane ou à du propane liquide. Des mélanges peuvent également être utilisés. Par la pression naturelle de la bouteille de gaz ou de la cartouche, le gaz liquide est vaporisé en microfaisceaux à travers une buse dans l'air et entre en contact avec une veilleuse. Le gaz s'enflamme donc au passage. Comme le combustible n'est pas distribué de manière égale avec l'air (l'oxygène) environnant, il produit une flamme jaune, bien visible. L'utilisation de lance-flammes nécessite une installation spéciale éprouvée et exige la plus grande prudence à l'installation, à l'utilisation et au démontage. Avec un dispositif de commande moderne et plusieurs brûleurs, il est possible de chorégraphier des effets somptueux.

11 Mouvement

L'énergie issue de la combustion de compositions gazogènes déterminées est utilisée pour produire une énergie cinétique mécanique. Par exemple, lors d'un minage, l'explosion génère des gaz chauds qui arrachent la roche et des particules rocheuses sont projetées dans l'air. Les charges de fractionnement des bombes d'artifice distribuent les étoiles dans le ciel. Les charges de lancement des mortiers de feu d'artifice propulsent les bombes en hauteur. Le même phénomène se reproduit à plus petite échelle dans les chandelles romaines, les pots à feu, etc. Dans les armes à feu, cette production d'énergie cinétique est assurée par la poudre dans la cartouche ou la charge de poudre noire dans les fusils anciens. Il existe de nombreux autres exemples où la pression d'un gaz déplace des masses.

La fusée occupe une position spéciale du point de vue du principe de la propulsion. Elle fonctionne d'après le principe de la réaction formulé par Newton, le célèbre physicien anglais. Selon celui-ci, la fusée est poussée en avant par la réaction avec une force égale à celle par laquelle le moyen de propulsion (les gaz chauds) est expulsé vers l'arrière. La fusée n'a pas besoin de support (par ex. la terre, l'air) pour s'élancer, elle fonctionne de manière totalement autonome, même dans le vide. Cela explique aussi pourquoi le moteur de la fusée est le seul à fonctionner dans l'espace.

Le diagramme suivant illustre le principe de fonctionnement des fusées.



12 Consignes de sécurité

Les compositions pyrotechniques contiennent tous les éléments de réaction nécessaires au déplacement. Le déclenchement de la réaction nécessite l'énergie d'activation déjà mentionnée. Celle-ci peut être apportée non seulement par une flamme, un allumeur ou une amorce, mais aussi, par exemple, par un réchauffement, un coup ou une friction. Le degré de sensibilité dépend fortement de la composition de la charge pyrotechnique. Fondamentalement, toutes les compositions pyrotechniques et les pièces d'artifice qui en résultent doivent être manipulées avec précautions et conformément aux indications du fabricant. Les pièces d'artifice contenant une charge comprimée comme les fusées, les sifflets hurleurs, les fontaines, etc. ne doivent donc pas être jetées ou tomber, car toute chute pourrait occasionner une déchirure ou un détachement des parois de la chambre. L'agrandissement de la surface de combustion qui en résulterait peut alors provoquer des explosions spontanées lors de l'utilisation.

Les pièces d'artifice doivent être entreposées à l'abri de l'humidité! Une humidité ambiante élevée peut occasionner le gonflement de la charge et du boîtier en carton. En séchant, des déchirures peuvent apparaître, qui pourraient à leur tour être à l'origine d'explosions.

Attention aux dégâts que peuvent causer les étincelles! Les étincelles des pièces d'artifice présentent une température extrêmement élevée. Elles peuvent même endommager le verre (vitres, lunettes, etc.).

Certains produits de la réaction des pièces d'artifice (par ex. les cendres) peuvent, en contact avec l'humidité, avoir des effets corrosifs sur les métaux ou certaines peintures (carrosseries d'automobiles).

13 Aspects légaux

La fabrication de feux d'artifice nécessite une autorisation de l'Office fédéral de la police (fedpol). Un espace approprié et des installations ad hoc sont indispensables. Il est également obligatoire d'obtenir une couverture d'assurance en responsabilité civile spéciale.

14 Sources tirées de la littérature et de l'internet

www.feuerwerk.de

Livres: Conkling; *Chemistry of Pyrotechnics*

Chemistry of Pyrotechnics, Takeo Shimizu; *Fireworks, The Arts, Science and Technique*