Définition

L'**ignifugation** désigne un ensemble de traitements utilisés pour améliorer la [tenue au feu](https://fr.wikipedia.org/wiki/Inflammabilit%C3%A9) d'un [matériau](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau) tel le [caoutchouc naturel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Caoutchouc_(mat%C3%A9riau)). De nombreuses applications exigent des matériaux ignifugés. À cette fin, on peut incorporer à la matière des molécules [halogénées](https://fr.wikipedia.org/wiki/Halog%C3%A9nure) ([X](https://fr.wikipedia.org/wiki/Halog%C3%A8ne)), [phosphorées](https://fr.wikipedia.org/wiki/Phosphore) (P), [borées](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bore) (B), [azotées](https://fr.wikipedia.org/wiki/Azote) (N), des [hydroxydes métalliques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyde_m%C3%A9tallique) ([M](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tal)[(OH)n](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyde)), ou des composés de l'[antimoine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Antimoine) avec des donneurs d'[halogène](https://fr.wikipedia.org/wiki/Halog%C3%A8ne).

À cause de leur [composition](https://fr.wikipedia.org/wiki/Composition_chimique), la plupart des [matières plastiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mati%C3%A8re_plastique) (et des [élastomères](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lastom%C3%A8re)) sont très inflammables. Pour prévenir ou minimiser la [combustion](https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustion) des mélanges, on peut utiliser des ignifugeants, aussi appelés agents ignifuges (tels les [bromés](https://fr.wikipedia.org/wiki/Agent_ignifuge_brom%C3%A9)) ou retardateurs de [flamme](https://fr.wikipedia.org/wiki/Flamme_(combustion)) (sigle FR en anglais). L'usage d'ignifugeants peut entraîner des effets indésirables (modification de certaines propriétés du matériau)[1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation" \l "cite_note-1). Les [polymères](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polym%C3%A8re) halogénés comme le [PVC](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polychlorure_de_vinyle) sont quant à eux auto-extinguibles (auto-ignifuges), cependant, le PVC [plastifié](https://fr.wikipedia.org/wiki/Plastifiant) est inflammable[2](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#cite_note-2),[3](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#cite_note-3).

**Sommaire**

* [1Exemples d'ignifugeants](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#Exemples_d.27ignifugeants)
  + [1.1Composés halogénés](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#Compos.C3.A9s_halog.C3.A9n.C3.A9s)
    - [1.1.1Principe](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#Principe)
    - [1.1.2Exemples](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#Exemples)
  + [1.2Composés azotés](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#Compos.C3.A9s_azot.C3.A9s)
  + [1.3Hydroxydes métalliques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#Hydroxydes_m.C3.A9talliques)
* [2Méthodes d'essais](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#M.C3.A9thodes_d.27essais)
* [3Notes et références](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#Notes_et_r.C3.A9f.C3.A9rences)

Exemples d'ignifugeants :

En ce qui concerne les mélanges, on peut employer comme ignifugeants des :

* [charges](https://fr.wikipedia.org/wiki/Charge_(substance)) minérales « hydratées » telles les [hydroxydes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyde_m%C3%A9tallique) d'[aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyde_d%27aluminium) (Al(OH)3) et de [magnésium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyde_de_magn%C3%A9sium) (Mg(OH)2), et des charges minérales [inertes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Inerte) telles les [fibres de verre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_de_verre) (utilisées dans les [couvertures antifeu](https://fr.wikipedia.org/wiki/Couverture_antifeu)) ;
* [additifs](https://fr.wikipedia.org/wiki/Additif) tels les retardateurs de flamme [bromés](https://fr.wikipedia.org/wiki/Agent_ignifuge_brom%C3%A9) et [chlorés](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chlore) qui sont toxiques, ou azotés tels la [mélamine](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9lamine) ;
* [plastifiants](https://fr.wikipedia.org/wiki/Plastifiant) à base de [phosphate](https://fr.wikipedia.org/wiki/Phosphate), tels ceux de [tricrésyl](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tricr%C3%A9sylphosphate" \o "Tricrésylphosphate) ou d'[ammonium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Phosphate_d%27ammonium).

Des systèmes [intumescents](https://fr.wikipedia.org/wiki/Intumescent), qui forment une couche épaisse pour diminuer le contact avec le [dioxygène](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dioxyg%C3%A8ne), sont aussi à considérer.

Des associations binaires ou ternaires sont souvent utilisées. Par exemple, il existe une [synergie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Synergie) entre les retardateurs de flamme halogénés (surtout chlorés) et le Sb2O3, entre les retardateurs de flamme halogénés et le [borate de zinc](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Borate_de_zinc&action=edit&redlink=1) [**(en)**](https://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_borate), et entre ce dernier et les hydroxydes [métalliques](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tal).

Le [trioxyde d'antimoine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Trioxyde_d%27antimoine) (Sb2O3) lui-même n'a pas de fonction de retardateur de flamme[4](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#cite_note-4), il joue le rôle d'agent de synergie lors de l'utilisation de retardateurs de flamme halogénés dans des polymères tels que les [polyesters](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyester), [polyamides](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyamide), [polyoléfines](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyol%C3%A9fine), [polyuréthanes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyur%C3%A9thane), [polyacrylonitrile](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyacrylonitrile) et le [polystyrène](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polystyr%C3%A8ne)[5](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#cite_note-5). Toutefois, il peut parfois être utilisé seul dans les polymères halogénés tels que le PVC plastifié, à cause de l'effet synergétique avec le chlore.

**Composés halogénés**

**Principe**

Il existe quatre types de composés halogénés : les composés iodés, bromés, chlorés et fluorés. L’efficacité de ces composés repose sur leur aptitude à libérer les halogènes sous forme de [radicaux](https://fr.wikipedia.org/wiki/Radical_libre) ou d’halogénure à la température de décomposition du polymère dans lequel ils sont incorporés ; ils doivent aussi rester stable à la température de mise en œuvre dans ces mêmes polymères.

Leur efficacité est inversement liée à leur stabilité thermique. Plus le composé est stable thermiquement moins il sera apte à libérer les espèces actives et donc il sera moins efficace. Les composés iodés présentent une faible stabilité thermique, ils sont donc théoriquement les plus efficaces mais ceci rend leur mise en œuvre dans la plupart des polymères impossible. Les composés fluorés au contraire sont les plus stables thermiquement et sont donc inactifs et ne libèrent pas d’halogénures ni de radicaux. Les additifs *bromés* et *chlorés* se trouvent dans des gammes de stabilité thermique et de réactivité intermédiaires et seront donc choisis comme retardateurs de flamme.

Ces composés ont une action principalement chimique en phase gaz. Ils vont arrêter le processus radicalaire de combustion. Les radicaux H• et OH• formés lors de la combustion sont très réactifs et sont responsables de la combustion :

* les radicaux H• sont à l’origine des réactions de [réticulation](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9ticulation) des radicaux libres dans la flamme ;
* les radicaux OH• sont à l’origine de l’oxydation du CO en CO2, réaction très exothermique responsable d'une grande partie de la chaleur générée dans la flamme.

En présence de retardateurs de flamme halogénés, ces radicaux (H• et OH•) vont réagir avec les radicaux halogénés X• issus de la dégradation de ces retardateurs de flamme, créant des radicaux moins réactifs qui diminuent la cinétique de combustion.

Pour obtenir des propriétés retard au feu satisfaisantes, ils sont généralement utilisés en grande quantité dans les polymères, typiquement 40 % et 20 % en masse respectivement pour les composés chlorés et bromés.

**Exemples**

Exemples de retardateurs de flamme halogénés[6](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#cite_note-6) :

* [bromés](https://fr.wikipedia.org/wiki/Brome) :
  + les [polybromodiphényléthers](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polybromodiph%C3%A9nyl%C3%A9ther" \o "Polybromodiphényléther) (PBDE) dont le [décabromodiphényléther](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=D%C3%A9cabromodiph%C3%A9nyl%C3%A9ther&action=edit&redlink=1" \o "Décabromodiphényléther (page inexistante)) [**(en)**](https://en.wikipedia.org/wiki/Decabromodiphenyl_ether) (DBDO) ;
  + l’[hexabromocyclododécane](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hexabromocyclodod%C3%A9cane" \o "Hexabromocyclododécane) (HBCD) ;
  + le [tétrabromobisphénol A](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C3%A9trabromobisph%C3%A9nol_A&action=edit&redlink=1" \o "Tétrabromobisphénol A (page inexistante)) [**(en)**](https://en.wikipedia.org/wiki/Tetrabromobisphenol_A) (TBBPA) ;
  + les bromo[phénols](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ph%C3%A9nol_(groupe)) ;
* [chlorés](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chlore) :
  + le dodécachloropentacyclooctadéca-7,15 diène ;
  + l'anydride chlorendique.

**Composés azotés**

Les retardateurs de flamme azotés sont des composés le plus souvent à base de [mélamine](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9lamine). Celle-ci peut être utilisée de trois manières différentes en tant que retardateur de flamme[7](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#cite_note-7) :

* la mélamine pure ;
* les dérivés de mélamine tels les sels issus du mélange avec des acides organiques ou inorganiques comme les acides borique, cyanurique et phosphorique ;
* les condensats de la mélamine : le melam, le melem.

Les retardateurs de flamme à base de mélamine permettent d’obtenir d’excellentes propriétés retard au feu. Ces composés libèrent des fumées peu opaques et peu toxiques[8](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#cite_note-8).

**Hydroxydes métalliques**

cette famille d’additifs se compose principalement de l’[hydroxyde d'aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyde_d%27aluminium) et de l’[hydroxyde de magnésium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydroxyde_de_magn%C3%A9sium). Ce type de composés agit simultanément en phase condensée et en phase gaz. Lors de leur dégradation thermique, ils subissent une déshydratation endothermique :

* 2 Al(OH)3 → 3 H2O + Al2O3 (200 °C, +1 050 kJ·kg-1)
* Mg(OH)2 → H2O + MgO (300 °C, +1 300 kJ·kg-1).

La libération d’eau refroidit le système et dilue les gaz dans la zone des flammes, provoquant ainsi un retard à l’inflammation. De plus, après ignition, en surface du matériau, la céramique protectrice formée (oxydes d'[aluminium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Oxyde_d%27aluminium) ou de [magnésium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Oxyde_de_magn%C3%A9sium)) à l’issue de leur dégradation joue un rôle de bouclier thermique.

L’utilisation de l'hydroxyde d'aluminium est limitée aux polymères dont la température de mise en œuvre n’excède pas 200 °C ; il est surtout utilisé dans les [élastomères](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lastom%C3%A8re), les résines [thermodurcissables](https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermodurcissable) et les matières [thermoplastiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermoplastique). L'hydroxyde de magnésium est stable jusqu'à 300 °C et peut être incorporé à des polymères tels que les polyamides, mais son utilisation dans les polyesters est déconseillée à cause de la tendance de ce composé à catalyser la décomposition thermique de ces polymères pendant la mise en œuvre[9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ignifugation#cite_note-9).

Méthodes d'essais

Articles détaillés : [Indice limite d'oxygène](https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_limite_d%27oxyg%C3%A8ne) et [Pouvoir calorifique inférieur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique_inf%C3%A9rieur).

La tenue (ou résistance, comportement) au feu d'un matériau fait l'objet d'une grande variété de [normes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Normes_et_standards_industriels), selon les conditions opératoires [le classement au feu du matériau se fait selon de nombreux critères tels l'[indice limite d'oxygène](https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_limite_d%27oxyg%C3%A8ne) (ILO) concernant les matières plastiques ou le [pouvoir calorifique inférieur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique_inf%C3%A9rieur) (PCI)], les domaines d'application (transports tels la [SNCF](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soci%C3%A9t%C3%A9_nationale_des_chemins_de_fer_fran%C3%A7ais), matériaux de construction, câblerie, etc.) et les pays.

Parmi les tests couramment utilisés, on retrouve :

* le [calorimètre à cône](https://fr.wikipedia.org/wiki/Calorim%C3%A8tre_%C3%A0_c%C3%B4ne) ;
* l'[indice limite d'oxygène](https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_limite_d%27oxyg%C3%A8ne).