

CHRONIQUES de L'ENVIRONNEMENT

La nature est-elle bonne ?



Chronique 13 : Au feu !!

ROGER PAPP

Professeur honoraire de l'Ecole Centrale de Paris

Conseil National des Experts en Environnement de l'Industrie Chimique

CNEEIC

2013

L'ensemble des Chroniques

- Chronique 1 Le bon vieux temps ?
- Chronique 2 La Nature est- elle bonne ?
- Chronique 3 Les produits naturels sont-ils meilleurs pour la santé ?
- Chronique 4 La peur de l'Apocalypse
- Chronique 5 Histoires de Dioxines
- Chronique 6 Un trou sur l'Antarctique
- Chronique 7 Histoire de chenilles et autres histoires
- Chronique 8 La dictature des modèles
- Chronique 9 L'Homme va-t-il disparaître ?
- Chronique 10 Greenwashing
- Chronique 11 Le droit gazeux et le principe de précaution
- Chronique 12 Le steak-frites est-il dangereux pour la santé ?
- Chronique 13 Au feu !!**
- Chronique 14 Experts et contre-experts

Liste des sigles utilisés

Table des unités utilisées

Les opinions exprimées dans ces chroniques n'engagent que leur auteur

© CNEIIC, 2013 tous droits réservés



Préface

Roger Papp a achevé la rédaction de ces chroniques quelques mois avant son décès en janvier 2012. Co-fondateur du CNEEIC, ingénieur industriel de grande réputation doté également de compétences scientifiques, pédagogiques et humaines reconnues, l'enseignement qu'il a dispensé tant à l'Ecole Centrale de Paris qu'aux sessions de formation du CNEEIC a toujours été basé sur une approche scientifique et technique rigoureuse et exhaustive.

Dans cet ouvrage, il se livre à un exercice délicat et salutaire de passage au crible de la plupart des thématiques environnementales trop souvent sujettes à controverse : les produits bio, la foi absolue dans les modélisations, l'influence des perturbateurs endocriniens sur la fertilité humaine, le rôle et les limites de l'expertise pour n'en citer que quelques uns.

Avec une grande honnêteté intellectuelle, les articles scientifiques publiés sur chaque thème sont passés en revue, commentés, dans le souci de dépasser les présentations trop souvent schématiques des médias ou la recherche du sensationnel.

Il s'apprêtait à publier en 2012 ces chroniques dans un ouvrage qui aurait représenté sa pensée, son opinion, sa contribution d'une qualité scientifique inestimable au débat sur l'environnement. Nous remercions son neveu Stéphane Papp de nous avoir autorisés à publier ces chroniques car c'est un honneur pour le CNEICC de rendre ainsi hommage à la contribution majeure qu'il a apportée à nos travaux.

Mars 2013,

Pierre Jomier, Président du Conseil Scientifique,

Michel Monzain, Délégué Général

Jacques de Gerlache, Président du CNEEIC

« Il se fait en ce moment une religion de la nature (dans un sens qui est celui de Jean-Jacques Rousseau) et elle est aussi redoutable. »

Pierre - Gilles De Gennes, Prix Nobel de physique

Chronique 13 : AU FEU !

« Les accidents de la vie courante constituent un problème majeur de santé publique en France, sous-estimé par les professionnels de santé, et plutôt mal connu du grand public, ou tout au moins vécu comme un événement hasardeux, malchanceux, « bête, stupide et imprévisible », alors qu'en fait les études épidémiologiques peuvent aujourd'hui en définir les risques, les conditions de survenue, et les mesures de prévention. » Ce texte est extrait de l'éditorial du bulletin BEH n°19-20/2004 de l'Institut de veille sanitaire, *Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire*, (Gilles Brucker, Directeur général) consacré aux accidents de la vie courante, qui font chaque année environ 20.000 morts en France, soit beaucoup plus que les accidents de la circulation, objets de toutes les attentions des Pouvoirs Publics.

Chaque année, les feux domestiques font environ huit cents morts en France, soit 1,28 pour 100.000 habitants. Mais aussi plus de 10.000 blessés graves, soit environ 16 victimes pour 100.000 habitants. Les feux domestiques sont la deuxième cause de mortalité pour les enfants de moins de cinq ans (après la noyade). Dans tous les pays développés, les statistiques sont identiques : 1 à 2 décès pour cent mille habitants sont provoqués chaque année par des incendies domestiques, et 10 à 20 blessés. La plupart des décès sont dus à la toxicité des fumées émises par la combustion incomplète des matériaux. Au premier rang desquels, il faut placer le monoxyde de carbone, responsable de 80% des décès. Lors de l'incendie de l'aéroport de Düsseldorf en 1996, les 17 morts ont tous succombé à une intoxication par le CO.

Il y a en France un feu toutes les 2 minutes (250.000 par an) Les interventions des sapeurs-pompiers sont de plus en plus fréquentes : le nombre total d'interventions pour incendies a progressé de 16 % en 5 ans, passant de 339.207 en 1998 à 394.707 en 2003, soit 10,5% du total de leurs interventions. Au sein de cet ensemble, le nombre des incendies domestiques a presque doublé en vingt ans : le Ministère de l'Intérieur dénombrait environ 51.000 feux d'habitation en 1981, 75.750 en 1986, et 98.100 en 2003, soit 24 % des incendies (Rapport du député Damien Meslot n°2554/ 2005). De telles augmentations du nombre des incendies domestiques devraient logiquement entraîner un programme de prévention et une mobilisation des pouvoirs publics.

Les incendies domestiques ont représenté aux Etats-Unis en 2007, 84% des décès dus au feu. Entre 1998 et 2007 les Etats Unis ont compté environ 400.000 feux domestiques chaque année, 414.000 en 2007, provoquant 2.895 morts et 14.000 blessés selon la National Fire Protection Association des USA.

La protection contre le feu devrait donc être une priorité nationale.

Dans notre civilisation technicienne, un danger qui ne diminue pas avec le temps, est un danger à combattre.

De fait on investit beaucoup dans les moyens de lutte contre le feu, une fois celui-ci allumé. Mais beaucoup moins dans la prévention. A titre d'exemple, l'Arrêté du 31 Janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des immeubles d'habitation concerne surtout les moyens d'accès des secours. Il fixe des durées de tenue au feu qui augmentent avec la hauteur de la construction, mais se contente pour les habitations individuelles à un quart d'heure ! Seuls les bâtiments recevant du public et les immeubles de grande hauteur sont plus réglementés. Les collèges, dits Pailleron, en référence au collège de la rue Edouard Pailleron dans le 19^e arrondissement de Paris, avaient une tenue au feu de 20 minutes. Le 6 février 1973 à 19h40, un incendie s'y déclare alors que 42 adolescents et 4 adultes sont en classe de solfège. Le bâtiment s'effondre à 20h10, entraînant la mort de 20 personnes. La structure métallique était insuffisamment protégée, et l'acier perd sa résistance mécanique au-delà de 400°C. En outre les faux plafonds permettent une propagation rapide des flammes. Des logements sociaux construits dans les années 1960 présentent toujours ces défauts. Une manifestation d'habitants en colère s'est déroulée à Rouen en juillet 2011 suite à des incendies trop fréquents dont le dernier avait causé la mort de deux enfants. Un des habitants expliquait comment ses cloisons en bois avaient pris feu sous l'action d'une lampe à halogène.

En 1988, la Grande Bretagne a mis en vigueur un plan de protection incendie destiné aux meubles et à l'ameublement : le taux de décès dus au feu est passé de 1,7 pour 100.000 habitants à 1,0 en 2000. (1,28 en France). Les pompiers confirment : « *A l'intérieur de chaque logement, le niveau de sécurité par rapport au feu est insuffisant... Lors des feux d'appartements, des canapés et fauteuils ou matelas rembourrés très inflammables font des centaines de victimes* » (Commandant Becker, Services d'incendie et de secours, SDIS 59). Les polyuréthanes ou polyéthers non ignifugés, utilisés fréquemment dans les rembourrages, brûlent facilement et violemment. Et les polystyrènes expansés encore davantage. Le décret 2000-164 du 23 février 2000 s'applique dans sa version actuelle aux articles de literie garnis, et vise à assurer la sécurité des utilisateurs par la prévention du risque d'allumage et du risque pathogène pour les articles comportant des plumes et duvets. Pour l'application du décret, les articles de literie désignent les coussins, les traversins, les oreillers, les couettes, les édredons et les couvertures matelassées.

Sont donc exclus du champ d'application du décret les coussins conçus pour être intégrés, de quelque manière que ce soit, dans un siège, et on peut se demander pourquoi les canapés et fauteuils font l'objet de telles dérogations. Les pompiers n'ont donc pas obtenu satisfaction. La Commission de Sécurité des Consommateurs met en cause la Commission Européenne : « *Les experts ont*

regretté que la Commission européenne n'ait pas autorisé la France à prendre un décret réglementant la fabrication des meubles rembourrés destinés aux particuliers, dans le but de limiter leur inflammabilité. Ils ont réitéré la nécessité d'interdire les mousses facilement inflammables pour le rembourrage des matériaux d'ameublement ». Selon un rapport de l'Association Européenne des producteurs de retardateurs de flamme, (EFRA, 2008), les meubles rembourrés sont responsables de plus d'un tiers des décès dus aux incendies domestiques. Et le laboratoire National d'Essais avait préparé en 2007 un dossier montrant que l'ignifugation des meubles rembourrés était possible avec les produits disponibles, ne présentait aucun risque de toxicité par contact, et n'augmentait pas la toxicité des fumées en cas de feu (Chivas, 2007). Difficile de comprendre pourquoi la France ne pouvait se doter d'un arrêté, comme la Grande Bretagne. Encore une crainte de protectionnisme, bête noire de Bruxelles ? Lot de consolation : le Parlement a imposé les détecteurs de fumée dans les habitations. Mais l'expérience américaine montre qu'ils ne sont pas suffisamment entretenus, sont même parfois débranchés, car ils fonctionnent trop souvent sans raison, et ont donc une efficacité limitée.

Le feu, un fléau pour l'homme

Le feu a toujours été un fléau pour l'homme depuis la plus haute Antiquité. La construction des cités en grande partie en bois entraînait l'extension spectaculaire des sinistres. Ainsi, le grand incendie de Londres du 2 septembre 1666, parti du fournil de la boulangerie du fournisseur du Roi, dura 5 jours, détruisit plus de dix mille maisons et cent églises, dont la cathédrale Saint Paul. Mais le XXe Siècle n'a pas été épargné par le feu :

Le tremblement de terre de San Francisco de 1906 dévasta la ville, de violents incendies ayant été allumés par le séisme, alimentés par les constructions en bois. On estime à 3.000 le nombre de victimes.

En 1921, le magasin du Printemps boulevard Haussmann est complètement détruit. L'incendie des Nouvelles Galeries de Marseille, dû à un feu de transformateur électrique chargé d'huile minérale, en 1938, fera 75 morts, et sera à l'origine de l'essor en France des PCB ininflammables dans les transformateurs électriques. On a vu que cet incendie a été à l'origine de la création de la brigade des Marins-Pompiers de Marseille, organisation militaire et efficace, comme à Paris.

En 1942, l'incendie du Coconut Grove de Boston (USA) fera 492 morts ;

En 1947, l'incendie d'un cinéma à Rueil Malmaison entraîne le décès de 87 personnes ;

En 1967, encore un grand magasin : l'Innovation à Bruxelles fera 322 morts ;

En France, en 1970, l'incendie de la discothèque *Le 5-7*, à Saint-Laurent-du-Pont près de Grenoble, fera 146 morts. Les rescapés décriront la chute des éléments de décoration enflammés sur les personnes présentes, bloquées par des issues de secours obstruées ;

En 1973, l'incendie du collège Edouard Pailleron, à Paris, sera la cause de 20 morts dont 16 enfants ;

L'incendie d'Oakland en Californie en 1991 détruisit 3.000 maisons et fit 25 morts et de nombreux blessés ;

En 2000, la vieille cité de Luoyang en Chine dans le Henan fut complètement détruite par un incendie qui fit 309 morts ;

A Buenos Aires en 2004, encore un incendie de discothèque : 194 morts. Deux autres discothèques brûleront en Chine en 2008 et 2009 ;

Le 5 décembre 2009 à Perm en Russie un pétard d'artifice a mis le feu au plafond en plastique d'un night-club, faisant 109 morts et 134 blessés.

Quelles sont les causes des feux domestiques ?

Le rapport du député Damien Meslot donne quelques réponses. Certains démarrages de feu sont spontanés : c'est le cas par exemple lorsque les installations électriques ne sont pas conformes aux normes, sont mal entretenues ou surexploitées (une multiprise utilisée en excès surchauffe, altère l'installation : les gaines de protection peuvent fondre, ce qui provoque un court-circuit). Un incendie sur trois est dû à une installation électrique défectueuse. Des installations électriques trop anciennes ne permettent plus d'alimenter des appareils ménagers de plus en plus nombreux et dont la consommation électrique augmente. D'autres accidents sont dus au mauvais usage de ces appareils ménagers : une lampe halogène installée trop près de la fenêtre, qui enflamme les rideaux (une lampe de 500 watts dégage une température de 200 à 580°C) ; une guirlande de sapin de Noël non homologuée NF, qui reste branchée plusieurs heures sans interruption, enflamme le sapin, une cigarette mal éteinte jetée dans une corbeille à papier etc. L'usage de plus en plus répandu de matériels électroniques miniaturisés entraîne des concentrations d'énergie importantes, et les risques de surchauffe correspondants, alors que la ventilation est souvent très insuffisante. Même des tableaux électriques tout neufs peuvent s'enflammer : comme celui du Boeing 787 *dreamliner* en cours d'essais en vol en Novembre 2010, qui a interrompu le programme d'essais des prototypes [le vol des Boeing 787 avait à nouveau été interrompu début 2013 pour la même cause] ¹!

D'autres sont causés par des négligences : fumer au lit et s'endormir, ce qui provoque la combustion de matériaux synthétiques ; le feu peut couvrir plusieurs

¹ le vol des Boeing 787 avait à nouveau été interrompu début 2013 pour la même cause

heures avant l'apparition des flammes, et la victime succombe intoxiquée par les fumées pendant son sommeil ; des objets placés à proximité d'une bougie, qu'un courant d'air renverse et qui enflamme les objets ou supports proches.

Les flammes de la cuisinière : l'huile de cuisson s'enflamme facilement lorsque des aliments sont laissés sur le feu sans surveillance. Les fuites de gaz dues en général à un flexible de raccordement trop ancien et défectueux. La mode récente des cheminées à alcool ne va pas améliorer les statistiques.

La National Fire Protection Association des Etats Unis insiste sur les feux de literie : *« Chaque année, on estime que 20.800 feux (sur 400.000) sont dus à des matelas enflammés : ces incendies de literie font 2.200 blessés et 380 morts. 43% de ces décès ont lieu alors que la personne dort. Dans 62% des cas les détecteurs de fumée étaient absents ou n'ont pas fonctionné. »*

Le dégagement de gaz inflammables provoqué par un début d'incendie entraîne assez rapidement l'embrasement général qui devient difficile à circonscrire.

La maison doit être chauffée en hiver et la cuisine nécessite aussi des sources de chaleur ; les départs de feu ont lieu pour 25 % dans les cuisines, pour 19 % dans les caves et chaufferies, pour 16 % dans les locaux de poubelles, pour 12 % dans les escaliers, pour 11% sur les toitures et terrasses, pour 10% dans les chambres, pour 6 % dans les salons et pour 1% dans les salles de bain (Rapport Meslot, 2005). On ne peut éviter l'usage de produits inflammables pour se chauffer, ni se passer d'électricité. Quand on a pris toutes les précautions par l'entretien (le ramonage, l'entretien ou le remplacement des circuits électriques, des flexibles de raccordement du gaz, etc.) il reste encore le bon choix des matériaux que l'on utilise pour construire, pour meubler, pour décorer, pour la télévision ou pour l'ordinateur... Ce sont 36% des incendies domestiques qui ont pour origine une installation électrique défectueuse. Si les constructions neuves doivent être conformes à la norme NF C15-100, la norme ne s'applique pas aux installations anciennes. Depuis le 1^{er} janvier 2009, un état de l'installation électrique de l'appartement ou de la maison doit être communiqué par le vendeur à l'acheteur, lorsque celle-ci a plus de 15 ans, mais la mise aux normes n'est pas imposée. *« Le pourcentage habituel d'habitations nouvelles correspond, pour une construction en Europe, à un temps de vie moyen de 200 ans et la majorité du parc immobilier européen a plus de 30 ans. A moins que ces immeubles soient correctement adaptés, maintenus et rénovés, ce qui est loin d'être le cas, leurs installations techniques s'adaptent de moins en moins aux normes, qui deviennent plus pointues et ceci, dans le but d'une meilleure sécurité »* (Forum for European Electrical Domestic Safety, 2009). Au vieillissement des installations s'ajoute le nombre croissant de matériels électriques installés dans les habitations, dont les moyens d'alimentation deviennent sous-dimensionnés et dangereux. La mondialisation ajoute son lot de risques supplémentaires : en 2007, le rapport RAPEX qui regroupe pour l'Union Européenne les signalements de produits de

consommation (non alimentaires) dangereux, a concerné pour 12% les équipements électriques, pour 6% les produits d'éclairage, le risque incendie pour 13%, et le risque de choc électrique pour 15%. Les matériaux d'isolation des murs et cloisons utilisés pour réduire la facture de chauffage ne sont pas toujours sans danger : les isolants en paille ou en laine risquent de révéler de mauvaises surprises.

La résistance au feu des matériaux

Ce sont évidemment les constructeurs d'avions, de bateaux, de wagons de chemin de fer, ou d'automobiles qui ont montré l'exemple. Une automobile qui fait le plein d'essence fait aussi le plein de matière inflammable. Idem pour l'avion. Si on ne peut se passer de carburant, on peut au moins choisir des matériaux qui résistent à la chaleur et au feu. La construction du paquebot France a ainsi recherché une meilleure résistance au feu. La Compagnie Générale Transatlantique avait vu brûler plusieurs de ses prestigieux paquebots de ligne ; l'Atlantique en 1933, le Lafayette en 1938, le Paris en 1939, le Normandie en 1942. Pour le France, l'utilisation du bois a été presque totalement exclue y compris pour le mobilier et la décoration. Des panneaux de décoration en aluminium gravé et doré ont remplacé les éléments de décoration combustibles habituels.

La Règlementation Française a défini à l'aide de plusieurs tests normalisés un classement des matériaux allant de M0 à M4

Combustibilité Inflammabilité - Exemples (Mabille, 2008)

- M0** Incombustible Ininflammable : pierre, brique, ciment, tuiles, plomb, acier, ardoise, céramique, plâtre, béton, verre, laine de roche
- M1** Combustible Ininflammable : matériaux composites, PVC, dalles minérales de faux plafonds, polyester, coton
- M2** Combustible Difficilement inflammable : moquette murale, panneau de particules
- M3** Combustible Moyennement inflammable : bois, revêtement sol caoutchouc, moquette polyamide, laine
- M4** Combustible Facilement inflammable : papier, polypropylène, polystyrène, tapis fibres mélangées

Ces différentes classes ont leurs équivalents en réglementation européenne, A1, A2, B, C, D, E, et F et un classement supplémentaire concerne les fumées. A1 et A2 sont des classes peu inflammables. Les classes B, C, D, E indiquent une résistance décroissante. F est un matériau non classé ou moins résistant que E.

Les fibres céramiques réfractaires ont remplacé l'amiante, qui était malheureusement très utilisée pour l'ignifugation avant son interdiction. Mais elles sont classées cancérogènes de classe 2 par l'Union Européenne, et présentent le

même risque que le chrysotile (H.Pezerat, INSERM 1998) ; Pour les températures tempérées de l'habitation, la laine de verre ou de roche, classée M1, du fait de la présence de liants organiques, est cependant moins dangereuse pour la santé.

Alors que l'isolation thermique des habitations est à l'ordre du jour, le recours à des isolants plus ou moins résistants au feu n'est pas indifférent. Les matériaux classés MO peuvent être privilégiés. Mais on peut aussi concevoir des panneaux multicouches dans lesquels le plâtre joue un rôle protecteur. Le polystyrène expansé est un matériau inflammable constitué de 98% d'air : il est donc particulièrement inflammable et en général, en qualité standard, classé F. Il ne devrait donc jamais être utilisé en isolation sans parement protecteur, par exemple en plâtre de 10 à 13 mm d'épaisseur. Les producteurs ont développés de tels panneaux d'isolation de meilleure résistance au feu. Le polystyrène peut aussi être ignifugé par incorporation de retardateurs de flamme bromés tel que le HBCD ou hexabromocyclododécane. De nombreux tests de résistance au feu existent, et sont particulièrement utilisés dans la construction automobile, la construction d'avions, de wagons de chemin de fer, les immeubles de grande hauteur. Mais les habitations des particuliers utilisent des matériaux souvent peu résistants au feu. Combien de particuliers se soucient de la résistance au feu lorsqu'ils envisagent des travaux de décoration, d'isolation phonique ou thermique, ou le choix d'un meuble ? Décorer avec du polystyrène très inflammable est moins cher que d'utiliser des panneaux multicouches protégés. Et l'engouement pour des matériaux « naturels », isolation en fibres naturelles recyclées par exemple, sans protection de plâtre, n'améliore pas la résistance au feu, et peut se révéler dangereux.

L'engouement pour le bois

On constate que le bois, qui est très apprécié, retour à la nature oblige, est assez mal classé (M3.), voire même M4 suivant la nature du bois et son épaisseur. Mais le nombre de constructions en bois en France augmente de 15% chaque année. Certes, la France n'a pas la densité de constructions en bois de la Scandinavie. Mais la Scandinavie ne connaît pas les feux de forêt qui ravagent chaque année des centaines d'hectares en France et dans les pays où la sécheresse et le vent sévissent en été.

Le bois présente au moins deux inconvénients. Il peut être attaqué et détruit par des champignons et des insectes, en particulier les termites, qui envahissent de nouveaux quartiers dans les villes chaque année. Il est combustible, et il a une stabilité dimensionnelle faible par rapport aux matériaux inorganiques. La technologie a recherché des remèdes à ces défauts. Les traitements de préservation assurent aux parties en bois une longue durée, à condition de les renouveler tous les trois à cinq ans, les insecticides autorisés ayant une durée de vie limitée, (contrairement aux organochlorés, interdits, qui protégeaient le bois 30

ans et plus). Des traitements chimiques ignifuges peuvent améliorer la tenue au feu du bois et des matériaux dérivés du bois. Le bois massif - après séchage à température élevée et imprégnation avec des résines synthétiques - le contre-plaqué, les bois lamellés et les panneaux de particules ont une capacité d'absorption réduite et par conséquent une plus grande stabilité dimensionnelle (F.Kollmann, International Academy of Wood Science).

La résistance au feu du bois peut aussi s'améliorer par l'utilisation de plus grandes épaisseurs pour les poutres : pour une résistance au feu de 30 minutes, on ajoutera 21 millimètres, le bois brûlant à raison d'environ 0,7 millimètre par minute. La combustion du bois dégage des gaz toxiques, dont l'oxyde de carbone. Mais la meilleure protection viendra de l'utilisation de produits ignifugeants, et l'utilisation du PVC, classé M1, pour les volets roulants et les fenêtres, à la place du bois, pour améliorer la tenue au feu.

Les traitements du bois contre les termites

Les premiers traitements ont utilisé l'arsenic. Mais la toxicité de l'arsenic pour l'homme et les animaux l'ont fait remplacer au milieu du XXe siècle par des insecticides organochlorés : aldrine, dieldrine, heptachlor, mirex, chlordane. Leur persistance ainsi que la bioaccumulation de ces substances les ont fait interdire par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (Convention de Stockholm, 2001). Certains pays comme la Chine ont demandé et obtenu des dérogations pour le Mirex. Les produits ont été remplacés par le chlorpyrifos, un insecticide organophosphoré. Mais la substance est toxique pour le système nerveux. Les produits actuellement utilisés sont des pyrèthroïdes, perméthrine, bifenthrine, ou l'imidaclopride, un néonicotinoïde, ou le fipronil. Ces substances ont des vies courtes et le traitement perd son efficacité au bout de 3 à 5 ans. Ce qui explique la progression des termites en ville, car les traitements sont rarement renouvelés avec la périodicité nécessaire.

Plus de 50 départements en France sont infestés par les termites et la législation récente rend obligatoire la déclaration en mairie de foyers de termites. Une nouvelle réglementation est entrée en vigueur en décembre 2007 qui rend obligatoire la lutte préventive avant construction afin de prévenir les infestations. La lutte préventive se présente sous forme d'un film posé avant construction. Ce film contient une matière active insecticide. Mais la protection est limitée à 10 ans.

Les traitements ignifuges du bois

Le bois est une matière organique et donc combustible, et il n'est pas possible de le rendre incombustible. Son comportement au feu dépend de la nature de l'essence : les bois durs et denses, comme le chêne et le hêtre, s'enflamment plus difficilement que les bois tendres, comme les conifères et les

peupliers. Autres facteurs : les dimensions et l'humidité. Plusieurs méthodes se proposent d'améliorer la tenue au feu du bois.

Des applications de surface de peintures destinées à se transformer en couches intumescents ou charbonneuses isolantes en cas d'incendie peuvent ralentir la combustion du bois. Des protections isolantes ont le même effet : une paroi constituée de plâtre, ou de laine minérale aura une tenue au feu améliorée.

D'autres méthodes plus efficaces consistent à imprégner le bois à cœur en autoclave de solutions de sels solubles dans l'eau, tels que le phosphate d'ammonium. Le rôle de ces substances est de capter l'oxygène, ce qui ralentit la combustion. Mais le temps de tenue réglementaire au feu d'un quart d'heure pour les habitations individuelles est ridiculement insuffisant, et ne pousse pas les constructeurs à utiliser les méthodes d'ignifugation les plus efficaces, plus coûteuses. Problème aggravé par l'insuffisance de l'information du futur propriétaire et habitant.

Les architectes font aussi remarquer que le risque le plus important provient du contenu de l'habitation, plutôt que de son ossature. Cette remarque est pertinente et pose le problème de l'ignifugation des matières plastiques, tissus, matelas, sièges rembourrés, décoration, rideaux, etc. qui sont effectivement souvent les points de départ des flammes. L'ignifugation de ces éléments est donc un facteur de sécurité important, bien que peu pris en compte.

Les ignifugeants des matières plastiques et tissus.

Les retardateurs de flamme (RDF) peuvent avoir deux modes d'emploi : ils peuvent être inclus dans la formule chimique de la matière ou bien ils sont incorporés dans le matériau au moment de la fabrication des « compounds », en même temps que les stabilisants, colorants, etc. D'autres produits sont appliqués en surface, avec une efficacité plus limitée.

Il existe de nombreuses familles de RDF, souvent adaptées à des matériaux particuliers. Les principales sont les suivantes, avec leur part de marché en 2004 (CEFIC/EFRA, 2004) :

- Les retardateurs de flamme halogénés : Chlorés 16,5%, Bromés 11,8% ;
- Les phosphorés, principalement phosphates chlorés, esters alkylphosphoriques chlorés : 9,1% ;
- Les azotés, principalement la mélamine et ses sels : 2,1% ;
- Les minéraux, principalement les hydroxydes d'aluminium (40%) et de magnésium (4,7%) ;
- Les oxydes d'antimoine : 5,9% ;
- Les borates : 0,4% ;
- Les intumescents.

Comme les doses varient de 1,5% à 40%, les pourcentages ci-dessus ne reflètent pas vraiment l'importance de chaque catégorie. Les retardateurs de flamme protègent des objets dont la durée de vie est souvent longue, automobiles, mobilier, téléviseurs, etc. Ils doivent donc être stables et résister en outre à des conditions de mise en œuvre difficiles, comme l'extrusion à température élevée.

Les retardateurs de flamme chlorés et bromés

Ces retardateurs de flamme contenant des halogènes sont les plus efficaces. Ce qui explique que le PVC, qui contient 56% de chlore, soit classé M1. Ces produits protègent plus de 50% des équipements électriques et électroniques. L'augmentation de la vitesse des microprocesseurs et leur miniaturisation entraînent de plus grandes concentrations d'énergie, et donc de plus grands risques de surchauffe. Et les équipements électriques et électroniques envahissent les habitations. Des polymères facilement inflammables comme le polystyrène sont efficacement protégés par les retardateurs de flamme bromés. A titre d'exemple, le polystyrène expansé, très utilisé en isolation, est normalement classé F. L'ajout de 0,5% d'hexabromocyclododécane améliore très sensiblement la résistance au feu.

Les retardateurs de flamme doivent être relativement stables chimiquement car ils doivent résister aux conditions sévères de la mise en œuvre des plastiques qu'ils protègent.

Certains retardateurs de flamme halogénés sont parfois persistants, car peu biodégradables en milieu aérobie. Certains sont bioaccumulables, et comme on les dose à l'état de traces (nanogrammes, voire moins) on peut les retrouver dans les écosystèmes.

Le risque principal pris en compte est celui de la **biomagnification** : La biomagnification est une forme particulière et rare de bioaccumulation. Ce qui caractérise la biomagnification est le fait que la concentration d'une substance chimique, rapportée à la teneur en lipides, dans un organisme prédateur, est plus élevée que celle existant dans la nourriture que cet organisme consomme. La substance peut donc se concentrer à chaque étape de la chaîne trophique alimentaire. Par exemple, le mercure est biomagnifié dans les organismes vivants dans l'eau de mer où il est naturellement présent à la concentration de 0,2 à 2 nanogrammes par litre. C'est suffisant pour que les poissons prédateurs tels que les thons puissent contenir près de 1.000 microgrammes de mercure par kilo. La biomagnification amplifie donc la concentration cinq cent mille fois.

Six retardateurs de flamme bromés, principalement des polybromodiphényles et polybromodiphényléthers, ont été inscrits à l'Annexe A de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants en mai 2009 à Genève. Le décabromodiphényle, avec une structure analogue à celle des polychlorodiphényles, (PCB), a été interdit dans les textiles par la directive

83/264/EEC, et interdit pour toutes applications en 2002 en Europe. Quant aux chlorés, ils comprennent les paraffines chlorées et des esters alkylphosphoriques chlorés, en particulier le tri(2-chloroisopropyl)phosphate (TCPP).

Le Programme National Suisse Perturbateurs Endocrinien (Rapport final, 2008) indique que certains retardateurs de flamme bromés peuvent avoir des effets endocriniens. On a observé des effets anti-androgènes et oestrogènes, ainsi que des troubles du système hormonal thyroïdien avec le pentaBDE (interdit depuis 2004). Dans l'état actuel des connaissances, le tétrabromobisphénol A et l'hexabromocyclododécane sont considérés comme des produits chimiques à activité hormonale potentielle, bien que la forme copolymère du tétrabromobisphénol A (résines époxy dans les circuits imprimés) soit considérée comme inoffensive dans la phase d'application. L'Inserm estime que les effets nocifs, causés par les retardateurs de flamme bromés, restent peu démontrés en matière de reproduction (Perturbateurs endocriniens, Barbier, 2011)

Le groupe des retardateurs de flamme bromés comprend plus de 75 substances ayant des propriétés et des applications spécifiques. Leur point commun est la présence d'atomes de brome permettant une inhibition des réactions radicalaires en phase gazeuse au sein des flammes. Il est donc toujours possible de choisir des retardateurs de flamme bromée ou chlorés acceptables pour l'environnement.

La directive RoHS

L'Union Européenne a publié en 2002 une Directive dite RoHS, pour "Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment (2002/95/CE)" qui concerne six substances ou groupes de substances : plomb, mercure, chrome VI, cadmium, polybromodiphényles, polybromodiphényléthers. Cette Directive, qui est entrée en application en 2006, demande la suppression de ces six substances dans un groupe de dix objets grand public, et elle a subi une refonte en 2011 (Directive 2011/65/UE).

La restriction de l'usage du **plomb** complique les problèmes de soudure et de brasage, les agents de soudure de remplacement entraînant des températures plus élevées, auxquelles certains matériaux ne résistent pas. Par exemple, elles peuvent provoquer des décollements de cartes imprimées multicouches ou des déformations de ces cartes. Le point de fusion de l'alliage étain plomb était de 183°C.; le remplacement du plomb par l'argent fait passer cette température à 221°C. Le plomb est remplacé par le cuivre, l'argent, voire le zinc, le bismuth, ou l'indium. Mais les batteries au plomb ne sont pas interdites !

Le **mercure** est utilisé dans les écrans plats LCD pour la transformation en lumière visible des UV et les lampes fluorescentes pour le rétro-éclairage. Les nouvelles lampes fluorescentes « basse consommation » qui remplacent les lampes à incandescence, contiennent aussi du mercure: la directive RoHS précise

moins de 5 mg par lampe fluo-compacte, mais davantage dans les lampes et tubes fluorescents ! Exception au nom des économies d'énergie ! Quant aux **dérivés bromés** à usage restreint, ils ne sont qu'une dizaine sur plus de 75 substances bromées disponibles.

La Commission Européenne a prévu des dérogations et des délais dans l'application de la directive RoHS, pour permettre aux industriels d'adapter leurs fabrications sans prendre trop de risques. Réminiscence sans doute des déboires ayant accompagné la suppression des CFC ! Les demandes de dérogation sont à envoyer à la Commission Européenne (ENV G4) qui les fait examiner par un "Technical Adaptation Committee". L'Article 5b de la directive prévoit en effet que des exemptions peuvent être accordées *"si la substitution est techniquement ou scientifiquement impraticable, ou s'il est probable que les incidences négatives sur l'environnement, la santé et/ou la sécurité du consommateur, liées à la substitution, l'emportent sur les bénéfices attendus"*. La Directive révisée 2011/65 introduit en outre des aspects socio-économiques, en particulier pour les PME. Net progrès de développement durable !

ONG ou promoteurs d'incendies ?

Certaines ONG se soucient peu des propriétés, des mesures, de la réglementation, de la sécurité des consommateurs et de la cohérence. Pour elles, aucune trace de mercure, aucun retardateur de flamme bromé n'est acceptable. *"Mercury and bromine free!"* Or le matériel électrique doit satisfaire des tests sévères, par exemple le test au fil incandescent : pour être homologué, le matériau doit présenter une température d'ignition au contact du fil incandescent de 775 °C minimum. L'incorporation d'hexabromocyclododécane dans du polystyrène permet d'atteindre 900°C, ce qui permet de l'utiliser pour réaliser les prises de courant.

En 2006, des millions d'ordinateurs équipés de batteries défectueuses ont fait l'objet de rappel après que quelques dizaines aient brûlé. En cause, la mauvaise résistance à l'échauffement de la matière plastique isolante séparant les électrodes. En septembre 2009, un PC portable explose dans l'aéroport de Los Angeles. En 2009, le Japon rapporte que 3 I-Phones ont explosé, et un cas est signalé à Aix en Provence. Sans compter les milliers d'ordinateurs portables HP qui ont "grillé" leur carte graphique, par résistance insuffisante des circuits imprimés à la chaleur.

Les batteries lithium-ion sont souvent mises en cause : certaines batteries ont tendance à trop chauffer. C'est la rançon de la miniaturisation et de la concentration d'énergie. De nombreux accidents et incendies sont dus à des téléviseurs... Il y a 325 feux de téléviseurs par an et par million de téléviseurs en Europe, contre 5 aux USA, où sont imposées des normes plus sévères de tenue au feu des matériaux utilisés (Alliance for Consumer Fire Safety in Europe, ACFSE).

Une modification en avril 2009 de la norme CENELEC EN 60065 a aligné la réglementation européenne sur celle des Etats Unis, ce qui peut faire espérer une réduction sensible des feux de téléviseurs en Europe. Les résines époxy des circuits imprimés doivent aussi être ignifugées. Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) préconise le tétrabromobisphénol A en remplacement du pentabromodiphényléther, interdit en 2009. Le tétrabromobisphénol A est lié chimiquement à la résine du circuit imprimé: il n'y a donc pas d'exposition directe, et le risque pour le milieu aquatique est minime, écrit l'UNEP, qui recommande que les appareils en fin de vie soient récupérés. En général, l'UNEP se préoccupe de proposer des substituts aux substances qu'il interdit. Mais cela n'a pas toujours été le cas, en particulier pour les CFC.

Une ONG publie chaque année un "*Guide pour une high tech responsable*" destiné à guider le choix des acheteurs vers les constructeurs les plus vertueux, selon ses critères. Parmi des critères pertinents comme la gestion des appareils après usage, on trouve l'élimination du PVC et des retardateurs de flamme bromés (RFB). Le PVC est une vieille cible de cette ONG, pour des raisons très étonnantes : le chlore serait un "élément du diable" car il n'existe pas à l'état naturel ! Les océans contenant 30 grammes par litre de sel soit 18 g/l de chlore ne sont donc pas naturels ! Les océans contiennent le chiffre vertigineux de $41 * 10^{15}$ tonnes de sel ! Ils contiennent aussi 65 milligrammes par litre de bromure de sodium, toujours aussi naturel, et qui constitue la matière première du brome. La présence de ces deux halogènes dans la mer entraîne la formation d'une kyrielle de dérivés organiques du chlore et du brome ! Alors que seuls une dizaine de RFB ont été interdits pour des risques de bioaccumulation dans l'environnement, sur 75 environ, l'ONG rejette en bloc tous les retardateurs de flamme bromés. Quant au PVC, il a souvent remplacé, grâce à sa tenue au feu naturelle, des plastiques ABS qui nécessitaient 20 à 25% de retardateurs de flamme bromés !

La sixième édition du guide trimestriel de l'ONG recèle d'importants changements en tête de classement. Sony Ericsson a arraché la première place à Nokia tandis que Samsung et Sony se sont hissées respectivement aux 2eme et 3eme places. Voilà peut-être l'explication des batteries défectueuses de Sony, champion écologique ! Nintendo, Microsoft, Sharp et Philips obtiennent la plus mauvaise note : on aurait tendance à les recommander. Ces marques se soucient sans doute plus de la sécurité du consommateur que de leur classement ! Parmi les critères du «*Guide pour une high tech responsable*», figure aussi l'abandon de l'usage du mercure. Certaines nouvelles lampes électriques basse consommation en contiennent pourtant, et sont considérées comme « écologiques ». Les équipements « écologiques » ont apparemment leurs critères particuliers, comme les pesticides dits « naturels » ! Les lampes en question bénéficient d'une dérogation de la Directive RoHS. L'Union Européenne admet donc des dérogations pour les économies d'énergie, mais pas toujours pour la sécurité du consommateur ! Puisqu'il est admis que les lampes basse consommation

électrique contenant du mercure, très bioaccumulable, sont écologiques, grâce à leur récupération en fin de vie, on ne voit pas pourquoi les équipements électriques ou électroniques ne pourraient pas être collectés de la même façon, ce qui d'ailleurs est prévu par la réglementation communautaire.

Les autres retardateurs de flamme.

Les retardateurs de flamme phosphorés, sont largement utilisés dans les résines thermoplastiques et thermodurcissables, les mousses de polyuréthane, les peintures et les tissus. Le PVC peut également utiliser ces substances, (polyphosphates d'alkyle) pour leurs propriétés plastifiantes et retardatrices de flamme. De même que les ABS, polystyrène choc, et les polycarbonates, utilisés dans les équipements électriques et électroniques, où les phosphorés sont souvent chlorés, comme le TCPP.

Les retardateurs de flamme inorganiques et minéraux. Contrairement aux produits précédents qui confèrent aux matériaux une bonne résistance intrinsèque au feu, les inorganiques et minéraux agissent par libération d'eau sous l'effet de la chaleur, ce qui crée un refroidissement et une dilution des gaz émis. Les principaux sont les hydroxydes d'aluminium ou de magnésium. Mais pour être efficaces, il faut en ajouter beaucoup, jusqu'à 40% en poids, ce qui a nécessairement un impact sur les propriétés du matériau ainsi ignifugé. Des poudres de trioxyde d'aluminium sont ainsi ajoutées à des résines thermodurcissables pour protéger des coffrets électriques, des sièges, ou des pièces d'automobile.

Les intumescent

Les systèmes intumescent ont pour mission de former une couche carbonneuse en surface, qui joue le rôle de barrière au transfert de chaleur, et retarde donc la combustion du support. Ces systèmes ont été développés pour le bois, les peintures et les tissus, mais s'appliquent de plus en plus aux plastiques. Ces systèmes comprennent plusieurs substances dont le rôle est bien défini: la première apporte la structure, (polyphosphates ou borates d'ammonium), la seconde le carbone, la troisième l'agent gonflant (mélamine, urée...).

Un problème de santé publique

Le nombre de décès dus aux feux domestiques a augmenté de 11% entre 2000 et 2004 (Institut de Veille sanitaire). Le principe de prévention voudrait que l'on élimine autant que possible les causes d'incendie, en améliorant la tenue au feu des matériaux, en contrôlant les installations électriques. On a vu qu'il y a 325 feux de téléviseurs par an et par million de téléviseurs en Europe, contre 5 aux USA, qui imposent des normes plus sévères de tenue au feu, et que l'Europe s'est enfin inspirée de cet exemple récemment en modifiant ses normes. Alors que de

nombreuses causes d'accidents domestiques sont en régression, les accidents par le feu sont en augmentation, ce qui devrait logiquement inciter à plus de prévention. On aimerait que les critères de tenue au feu des habitations neuves retiennent autant d'attention que les normes d'isolation thermique, qui font aujourd'hui l'objet de beaucoup d'intérêt. Et que les matériaux trop inflammables ne soient pas autorisés à la vente pour l'isolation phonique et thermique des habitations. Malgré les classements officiels, les consommateurs se soucient trop peu des critères de tenue au feu. La mode du "naturel" sévit ici comme dans d'autres domaines, au détriment de la sécurité. La sécurité routière a été améliorée dans la dernière décennie par des mesures énergiques. La lutte contre le feu dans les habitations attend encore son plan d'action.

oooooooooooooooooooooooooooo

Références de la Chronique 13 : AU FEU !

Barbier G. (2011) Rapport sur les perturbateurs endocriniens. Le temps de la précaution. Rapport Sénat n°765

Chivas C. Laboratoire national d'Essais (2008) Etude sur les effets de l'ignifugation de certains meubles rembourrés dans le cadre du projet de réglementation relative à la sécurité incendie. Partie I Etat de l'Art Fiche n°233/2007

Convention de Stockholm sur les Polluants Organiques Persistants (2001) United Nations Environment Programme

European Flame Retardants Association (EFRA/CEFIC) Les retardateurs de flamme. Informations générales

European Flame Retardants Association (EFRA/CEFIC 2008) Retardateurs de flamme. Questions les plus courantes

Institut de Veille Sanitaire (2007) Mortalité par accident de la vie courante en France métropolitaine,

2000-2004, Bulletin Epidémiologique hebdomadaire n°37-38 2 Octobre 2007

Kemi (2004) Report n°4/04 Mercury. Investigation of a total ban. The Swedish Chemicals Inspectorate.

Meslot D. (2005) Rapport à l'Assemblée Nationale n°2554 du 11 octobre 2005

Programme National Suisse perturbateurs Endocriniens Rapport final 2008

Rapport RAPEX (2007) (système d'alerte européen pour les produits de consommation non alimentaires défectueux (Union Européenne, Protection du consommateur)

Rapport Five Winds International (2001) Matières toxiques et dangereuses provenant des équipements électriques. Rapport pour Environnement Canada.

UNEP (2008) (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) Orientations sur les ignifugeants utilisables en remplacement du pentabromodiphényléther. Document UNEP/POPS/POPRC4/INF/13

Liste des sigles utilisés dans ce document

ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'énergie

AESN Agence de l'eau Seine Normandie

AFSSA Agence française de sécurité sanitaire des aliments

AFSSAPS, Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé

AFSSET Agence française de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail,

AIRPARIF Organisme de surveillance de la qualité de l'air en Ile de France

ANSES Agence Nationale de sécurité sanitaire, alimentation, environnement, travail (ex AFSSA, AFSSET)

ARET Association pour la recherche en toxicologie

ATSDR Agency for Toxic Substances and Diseases Registry (Edite la base de données toxicologiques du Ministère Fédéral de la Santé des Etats Unis)

CEA Commissariat à l'énergie atomique

CEMAGREF Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement

CERN Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

CIRC Centre International de Recherches sur le cancer (OMS/ONU)

CITEPA Centre Interprofessionnel d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

CNAM Conservatoire National des Arts et Métiers

CNRS Centre National de la Recherche Scientifique

CRIIRAD Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité

CSTEE Comité Scientifique sur la Toxicité, l'Ecotoxicité, et l'environnement de L'Union Européenne

DL 50 Dose létale pour 50% des sujets exposés

EAWAG Institut suisse des sciences et des technologies de l'eau

ECB European Chemical Bureau de l'Union Européenne (Ispra, Italie)

ECHA European Chemicals Agency . Agence Européenne des Produits Chimiques. (Helsinki Finlande)

EDEN Endocrine Disruption research (Europe)

EFSA Autorité européenne de sécurité des aliments. (European Food Safety Authority)

ENPC Ecole Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées

FAO (Nations Unies) Food and Agriculture Organisation

FDA Food and Drug Administration (Etats Unis) Agence de l'alimentation et des produits de santé

GIEC Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat

HAP Hydrocarbures aromatiques polycycliques

IAEA International Atomic Energy Agency (Agence Internationale pour l'Énergie Atomique)

IARC International Agency for Research on cancer (CIRC)

IFPRI International Food Policy Research Institute

IFREMER Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

INED Institut National d'Études Démographiques

INERIS Institut National de l'environnement Industriel et des Risques

INRA Institut National de Recherches Agronomiques

INRS Institut National de la Recherche Scientifique

INSEE Institut National de la Statistique et des Études Économiques

INSERM Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

InVS Institut de Veille Sanitaire

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCS International Programme of Chemical Safety (UNEP/WHO)

IPIECA The International Petroleum Industry Environmental Conservation Association

IRD Institut de Recherche pour le développement

IRIS Integrated Risk information System (base de données toxicologiques de l'US EPA)

IRSN Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire

IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry

JECFA "Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives" désigne le comité international mixte FAO/OMS d'experts sur les additifs alimentaires.

JRC Joint Research Centre de l'Union Européenne (ECB, Ispra, Italie)

LOAEL lowest observed adverse effect level. Niveau le plus faible d'observation d'un effet adverse.

NIH National Institutes of Health des États-Unis.

NOAEL No Observed Adverse Effect Level. Niveau sans effet observé

NOEC Non Observed Effect Concentration. Concentration sans effet observé

NRC National Research Council (USA) Organisme de Recherches pour la National Academy of Sciences, la National Academy of Engineering et l'Institute of Medicine. Il existe aussi un NRC Canada

NTP National Toxicology Programme (Ministère de la Santé des États-Unis)

OCDE Organisation de coopération et de développement économique.

ODP Ozone depletion potential. Potentiel de destruction d'ozone.

OFEG Office Fédéral suisse des eaux et de la géologie.

OMS Organisation Mondiale de la Santé (ONU)

ONEMA Office National de l'Eau et des milieux aquatiques

PBL Netherlands Environmental Assessment Agency

PCB Polychlorobiphényles

PNEC Predicted No Effect Concentration. Concentration au dessous de laquelle aucun effet adverse n'est anticipé.

PNUE ou UNEP Programme des Nations Unies pour l'Environnement (United Nations Environmental Programme)

PRG Pouvoir de réchauffement global

RAIS Risk Assessment Information System, du Oak Ridge National Laboratory (USA)

RASFF The EU Rapid Alert System for Food and Feed

RAPEX EU rapid alert system for all dangerous consumer products, except food

RDA Recommended Dietary Allowance, (USA) publiées par le US National Research Council, (NRC) Food and Nutrition Board

RIVM National Institute for Public Health and the Environment (Pays-Bas)

TNO Organization for Applied Scientific Research (Pays-Bas)

UFIP Union Française des Industries Pétrolières

UNEP United Nations Environment Programme. Programme des Nations Unies pour l'Environnement

US-EPA Environmental Protection Agency des Etats-Unis

WCRF World Cancer Research Fund. Fond Mondial de recherches contre le cancer.

WHO World Health Organisation : Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

WMO World Meteorological Organisation (Organisation météorologique mondiale ONU)

oooooooooooooooooooooooooooo

Unités de masse utilisées

Unités de masse (moins de 1 gramme)			
1 milligramme	mg	10^{-3} mme gra	0,001 gramme
1 microgramme	μ g	10^{-6} mme gra	0,000001 gramme
1 nanogramme	ng	10^{-9} mme gra	0,000000001 gramme
1 picogramme	pg	10^{-12} mme gra	0,000000000001 gramme
1 femtogramme	fg	10^{-15} mme gra	0,000000000000001gramme

Unités de masse (plus de 1 kilogramme)			
1 tonne	t	10^3 kilogrammes	1000 kg
1 kilotonne	Kt	10^6 kilogrammes	1000000 kg
1 mégatonne	Mt	10^9 kilogrammes	1000000000 kg
1 gigatonne	Gt	10^{12} kilogrammes	1000000000000 kg
1 tératonne	Tt	10^{15} kilogrammes	1000000000000000 kg