

Émissions particulaires lors de la combustion du bois :

Influence du type de combustion sur les particules et leur toxicité

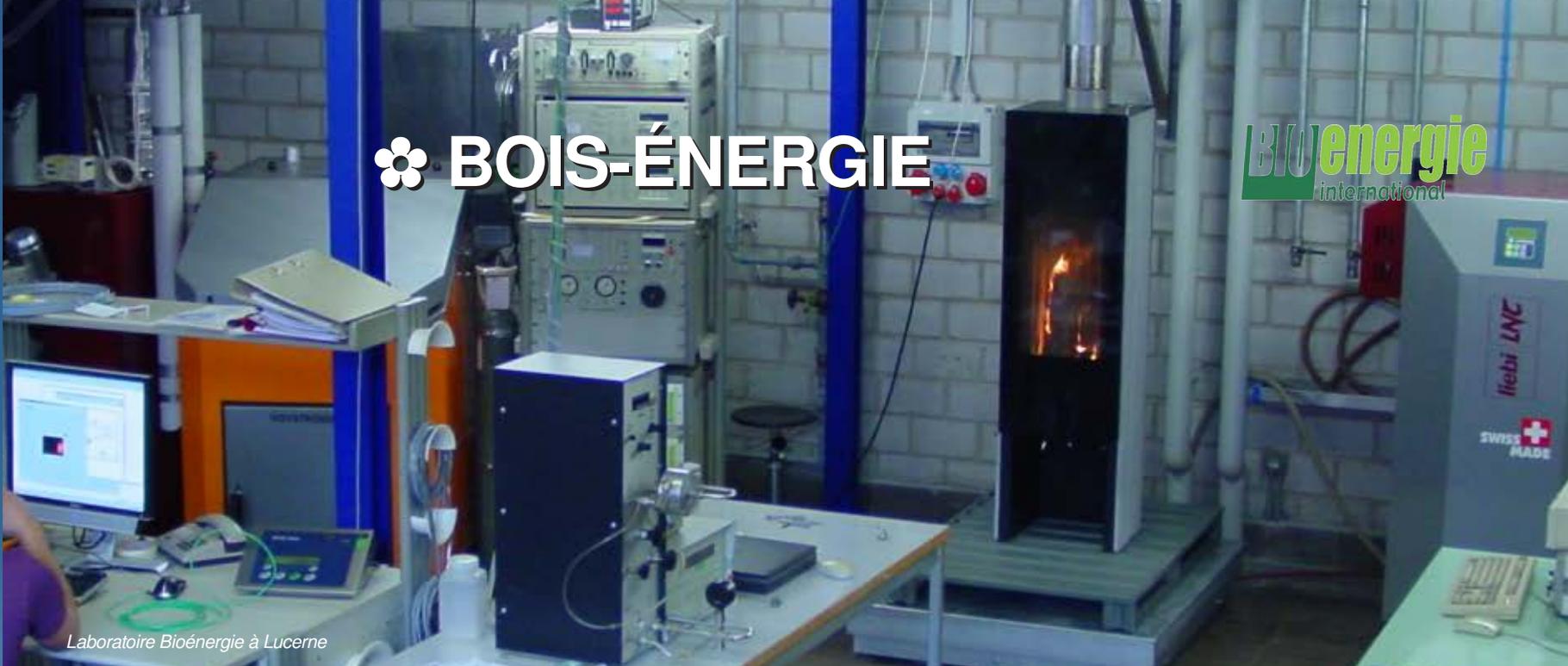
Prof. Dr. Thomas Nussbaumer

Verenum, Langmauerstrasse 109, CH – 8006 Zurich (Suisse) www.verenum.ch

Université de sciences appliquées de Lucerne, CH – 6048 Horw (Suisse), www.hslu.ch



Fumée hivernale d'une combustion complète, photo FD



Laboratoire Bioénergie à Lucerne

Les énergies renouvelables prennent une place de plus en plus importantes, car les énergies fossiles doivent être remplacées du fait de leurs effets négatifs sur le climat. Par ailleurs, l'énergie nucléaire pose la question de risques difficilement calculables.

L'énergie du bois, par contre, est une ressource renouvelable. De plus, le bois-énergie peut être produit dans sa région d'utilisation, évitant ainsi des transports et assurant du travail localement. Par contre, la combustion du bois cause différentes émissions dans l'atmosphère, des émissions qui représentent l'inconvénient le plus important de l'énergie du bois. Parmi les polluants, les particules et les composés organiques sont les plus gênants à cause de leurs effets négatifs pour la santé. Cet article traite donc des émissions particulières et de leur toxicité, il est le résumé d'une intervention faite lors du 2ème PROPELLET EVENT les 22 et 23 mai 2012 à Strasbourg.

Types de particules et influence de la combustion sur les particules

La combustion du bois est une source importante de particules de moins de 10 micromètres (PM10) dans l'air ambiant. En Suisse, l'énergie du bois assure 4% des besoins énergétiques totaux mais contribue à 16% des émissions de PM10. Pour identifier les mesures à prendre, réduire les particules et juger leur toxicité, il faut distinguer différents groupes de particules [1,2].

Une combustion incomplète du bois produit de la suie et des composés organiques volatils. La suie se retrouve dans l'atmosphère sous forme de particules de charbon noir. La matière organique est quant à elle constituée de composés organiques condensables, qui forment du goudron, et contribue au charbon brun dans l'atmosphère.

Les composés organiques volatils contribuent, une fois dans l'atmosphère, à l'apparition d'aérosols organiques secondaires qui sont produits par des réactions photo-chimiques.

Et même lorsque la combustion du bois est complète, les gaz de fumées entraînent des particules fines de minéraux, constitués de sels comme KCl, K₂SO₄, CaCO₃ et CaO, qui sont restitués ou formés par les cendres à haute température.

Les particules sont produites dans des réactions physiques et chimiques consécutives décrites par la Figure 1. Pour la combustion du bois, trois régimes

Combustion en flamme			Pyrolyse
T haute (> 800°C) O ₂ = 0	- Mix -	T haute (> 800°C) O ₂ idéal	T basse

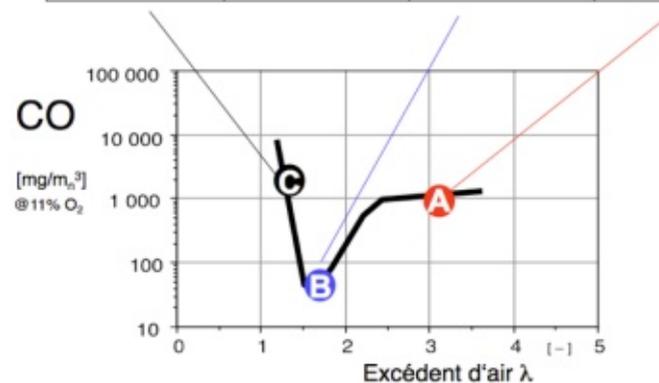


Fig. 2 : Types de particules de la combustion du bois à trois régimes de combustion différents et indiqués par leur excès d'air [3].

de combustion peuvent être distingués comme montré dans la Figure 2 [3]:

A) Des composés organiques condensables (COC) sont produits en quantités importantes lorsque la chambre de combustion est froide, du fait par exemple d'un excès d'air trop important ou du fait d'un combustible trop humide. Par conséquent, les phases d'allumage des chaudières froides ont une responsabilité notoire dans les émissions de COC [4] et les chaudières manuelles y jouent le rôle dominant [2]. Par contre, les émissions de COC des chaudières automatiques à plaquettes et à granulés sont très faibles, notamment si les chaudières sont bien conduites et qu'elles garantissent une température haute dans la chambre de combustion.

B) Une combustion presque complète à haute température et avec suffisamment d'oxygène dans la flamme produit surtout des poussières fines et salines (cendres). Par conséquent, les chaudières automatiques ont des émissions de

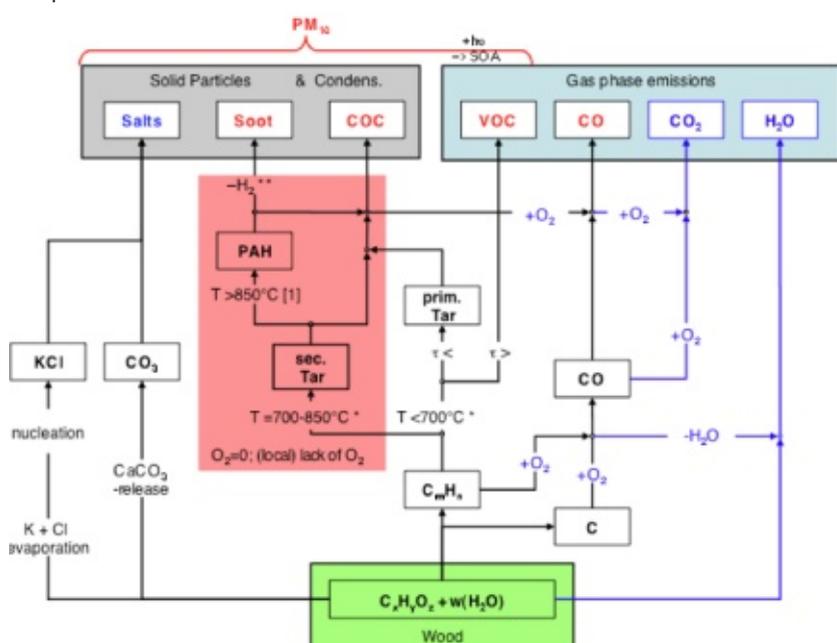
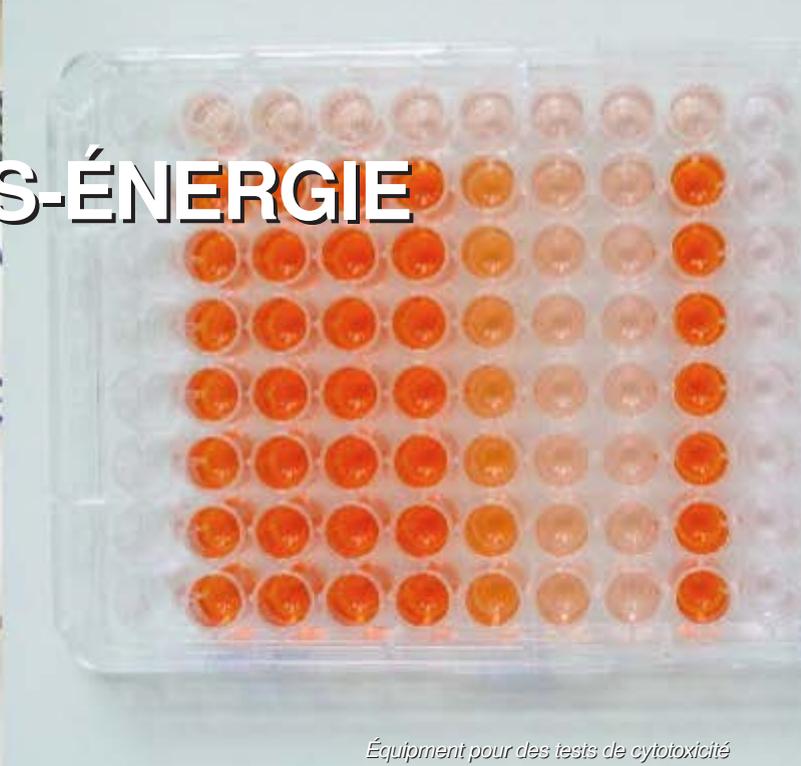


Fig. 1: Formation de particules pendant la combustion du bois [3].



Équipement pour des tests de cytotoxicité

particules salines relativement assez hautes. Pour réduire ces émissions, des séparateurs de poussières fines peuvent être utilisés. Pour les chaudières automatiques de plus de 200 kW, des systèmes éprouvés de séparateurs électrostatiques et de filtres à manches (pour des combustibles secs) sont disponibles [5]. Pour les chaudières manuelles ou pour des puissances inférieures, des séparateurs sont aussi proposés, mais leurs performances ne sont pas prouvées et il est prioritaire de garantir une combustion complète [6].

C) S'il existe des zones de manque d'oxygène dans la flamme à haute température, des composés organiques peuvent synthétiser la suie. Par conséquent, les gaz résiduels de tous les types de combustion peuvent contenir de la suie. Pour réduire leurs émissions, une combustion presque complète doit être assurée. Pour cela il faut :

- une température haute (> 800° – 850°C),
- un excédent en air optimal (dépendant du type de combustible mais typiquement à environ 1,5),
- un bon mélange de l'air avec le gaz combustible
- un temps de séjour suffisant dans la chambre de combustion secondaire (> 0.3 – 0.5 s) [1].

Pour les chauffages simples (inserts, poêles à bûches), une conduite optimale est nécessaire pour satisfaire ces conditions. Par exemple, les émissions en phase d'allumage peuvent être réduites par un allumage du bois par le haut, et non par le bas.

Pour les chaudières manuelles et automatiques, le principe d'une combustion à deux étapes, avec une gazéification et une oxydation en phase gaz avec de l'air secondaire, est indispensable pour assurer des conditions favorables [1].

En plus, les chambres de combustion peuvent être optimisées [7,8] et la combustion peut être réglée [9]. Enfin, pour garantir des chaudières bien conduites, en Suisse le dispositif de conception des installations QM Quality Management au bois® est recommandé [10].

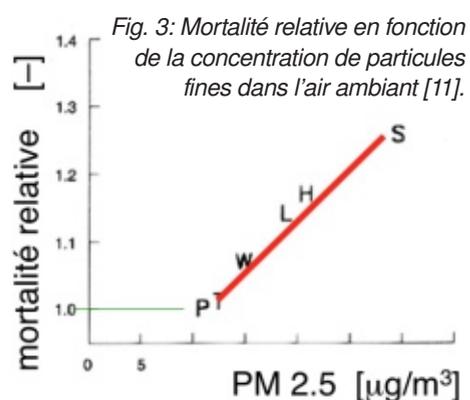


Fig. 3: Mortalité relative en fonction de la concentration de particules fines dans l'air ambiant [11].

Toxicité des particules Épidémiologie

Les poussières fines sont le meilleur indicateur de nuisance de la pollution dans l'air ambiant. On a trouvé plusieurs relations entre les effets sur la santé et la concentration de PM10 ou PM2.5 comme par exemple sur la mortalité (Dockery et al. 1993) [11] (Fig. 3). Les fumées de biomasse sont responsables dans le Monde de plus de morts que la malaria ou la tuberculose, et dans l'avenir même plus

que le sida comme cela à été présenté par l'Agence Internationale de l'Energie en 2010 [12] (Fig. 4).

Tests sur les cellules (in vitro)

Pour ces raisons, des recherches sur la toxicité des poussières fines de la combustion du bois ont été exécutées en Suisse par Nussbaumer et al. 2005 [13]. Ces investigations montrent que les différents types de particules présentent un effet de toxicité complètement différent (Fig. 5).

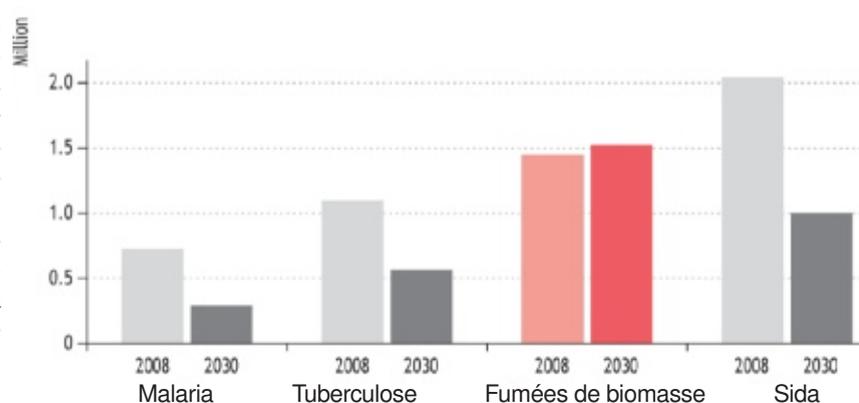


Fig. 4: Comparaison du nombre de décès annuels attribués aux fumées de la biomasse dans le Monde, avec ceux dus à la malaria, à la tuberculose, et au sida [12].

Les particules fines salines d'une combustion presque complète, provenant d'une chaudière à plaquettes de bois, montrent une toxicité pour les cellules pulmonaires des hamsters faible ou même nulle, car elle ne peut pas être distinguée de l'effet du filtre de prélèvement. La suie, dans ce cas provenant d'un moteur Diesel, montre par contre une toxicité importante. Les particules d'une mauvaise combustion contiennent du COC et des composés aromatiques polycycliques (HAP) qui montrent une toxicité plus que 10 fois supérieure à celle de la suie. Ces investigations montrent aussi que le potentiel cancérigène des COC est le plus haut des particules investiguées. Dans une autre investigation, le stress oxydatif des particules d'un poêle a été étudié par Milijevic et al. 2010 [14]. Les résultats montrent, que le stress oxydatif (pouvoir des particules à oxyder les protéines du corps) est diminué en fonction de la température de combustion (Fig. 6).

Plusieurs investigations ultérieures affirment le haut potentiel de toxicité des particules d'une combustion incomplète comme est décrit dans une recherche de Fong & Nussbaumer 2012 [15].

Par exemple, Kelz et al. 2010 [16] ont trouvé que les particules de deux vieilles chaudières manuelles montrent une toxicité 3 fois plus hautes que les particules d'une nouvelle chaudière manuelle et 5 fois plus élevée en comparaison avec une chaudière automatique à plaquette de bois et à une chaudière

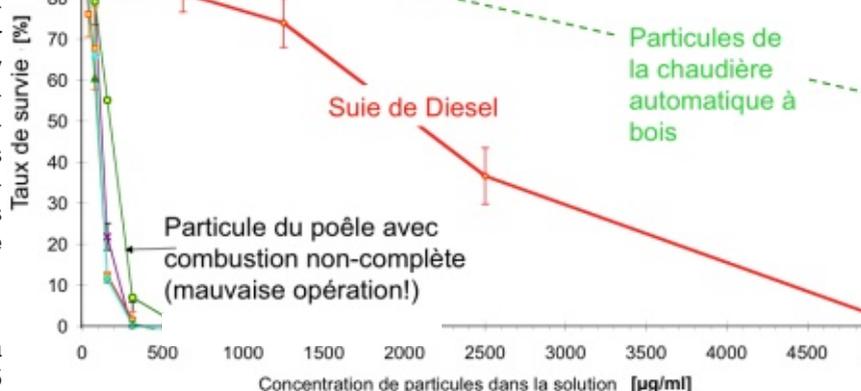
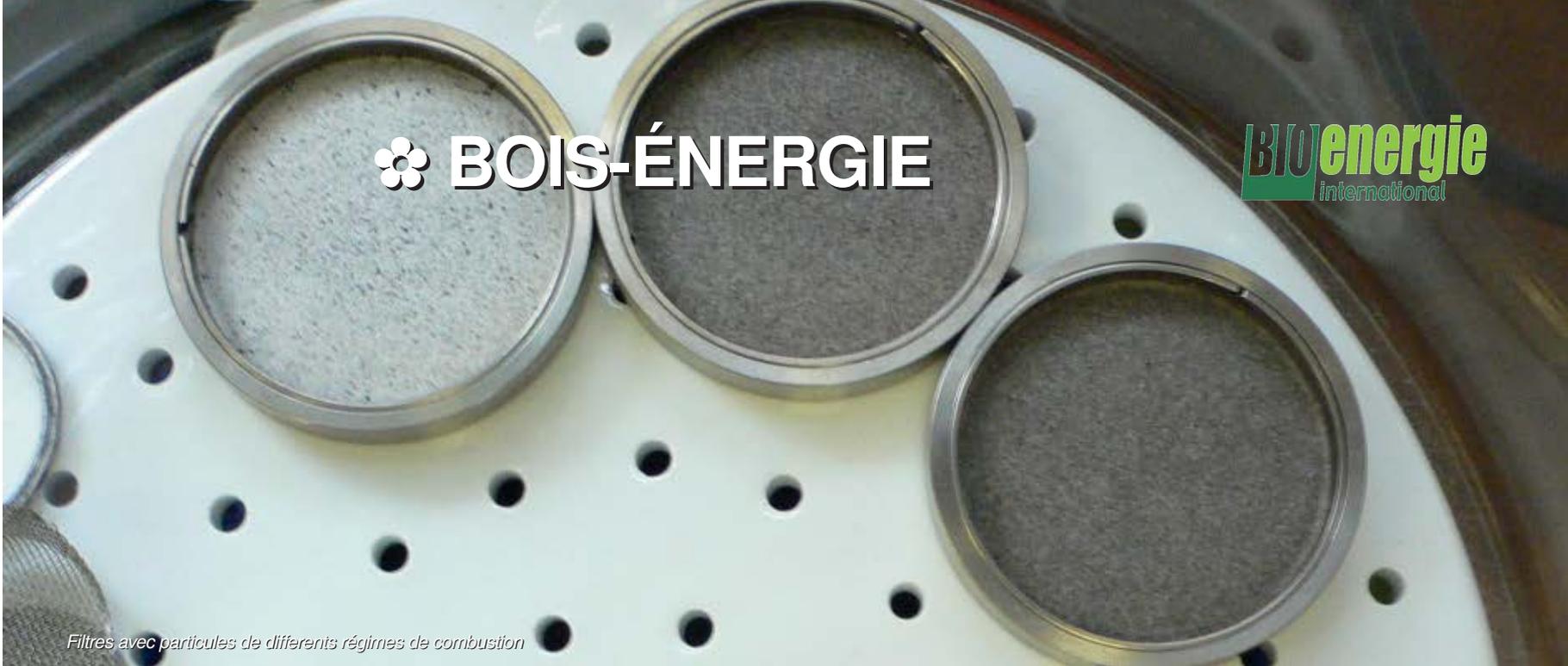


Fig. 5: Résultats des tests de cytotoxicité des particules fines de différents sources: Combustion du bois avec mauvaise conduite, suie de Diesel et particules d'une chaudière automatique [13].



Filtres avec particules de différents régimes de combustion

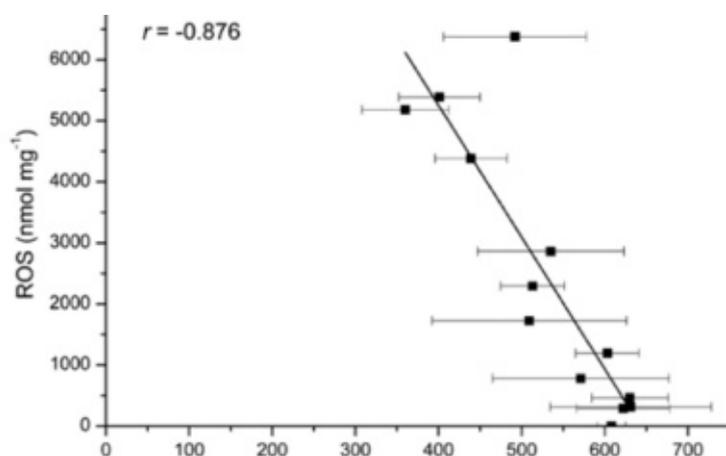
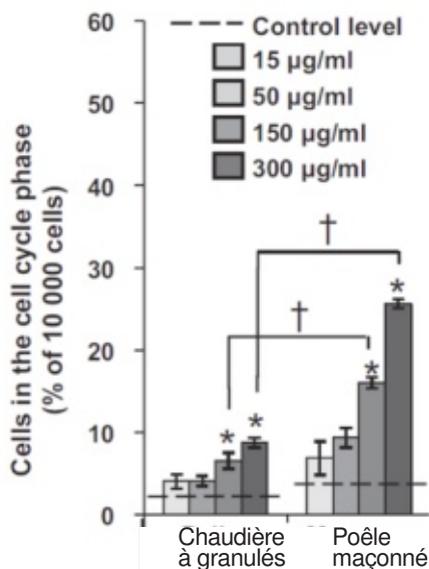


Fig. 6: Effet de la température des gaz d'un poêle sur la concentration des dérivés réactifs de l'oxygène (DRO ou ROS en anglais) [14].

à granulés. Les particules des vieilles chaudières montrent aussi une toxicité beaucoup plus haute que la suie d'un moteur Diesel. Concernant l'effet sur l'inflammation des gaz décrit par le facteur TNF- α (tumour necrosis factor α , un test standard sur l'inflammation), les investigations ne montrent pas une différence significative entre les technologies, mais il faut considérer que ces résultats ne sont peut-être pas fiables à 100%. En effet, les cellules ont fort probablement pu être tuées à cause de concentrations trop toxiques, ce qui rend dans ce cas l'exploitation des résultats impossible.

Tapanainen et al. 2011 [17] montrent que la mortalité des cellules et que la



toxicité sur les gènes des particules d'un poêle maçonné sont beaucoup plus hautes que celles d'une chaudière à granulés (Fig. 7).

Jalava et al. 2011 [18] montrent que la mortalité des cellules, l'inflammation et la toxicité sur les cellules sont beaucoup plus grandes pour des particules d'une combustion à feu couvant, produisant de grandes quantités de COC.

Tests sur le vivant (in vivo)

Les tests sur le vivant sont réalisés avec exposition des animaux et même avec des êtres humains à l'air qui contient certaines concentrations de particules de la combustion du bois. Kou & Lai

Fig. 7: Comparaison des effets des particules 1994 ont montrés un effet important d'un poêle et d'une chaudière à granulés sur tant des particules de la combustion du bois sur la respiration des rats [19]. Sällsten et al. 2006 présentent une chambre pour exposer des personnes à l'air contaminé avec des fumées d'un poêle [20] (Fig. 8). Après une exposition à 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de particules pendant 30 minutes, Sällsten et al n'ont pas trouvé de différences dans les réponses aux questions qu'ils ont posées aux per-

sonnes testées [20].

Par contre, Baaregard et al. 2006 ont trouvés une importante indication d'inflammation montrée par Serum Amyloid A (SAA) avant et après l'exposition à l'air et aux fumées du bois [21] (Fig. 9).

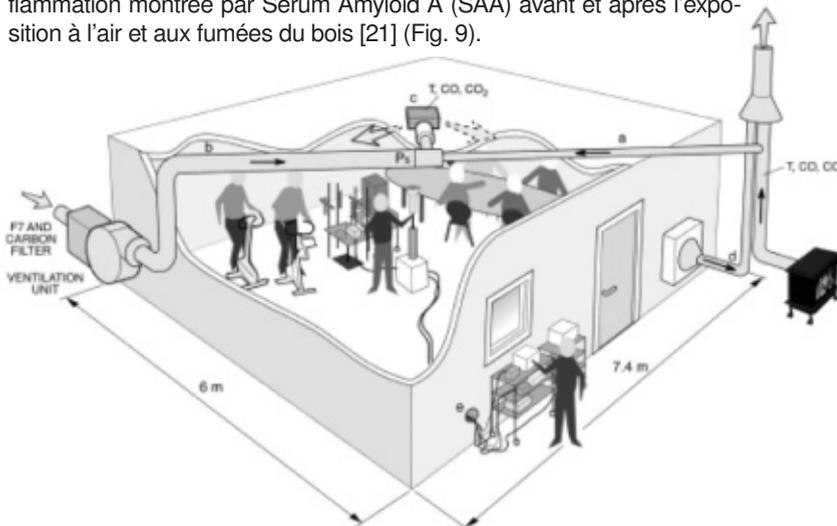


Fig. 8: Disposition de tests d'exposition aux êtres humains [20].

Conclusions

Types des particules

1. Le bois cause trois types de particules: sel, suie et goudron (COC, HAP) ce qui correspond à trois différents régimes de combustion :

- Les COC sont formés à basse température
- Les particules salines sont formées des cendres à haute température
- La suie est formée à haute température aux zones sans oxygène.

2. Sel, suie et goudron sont des aérosols primaires qui contribuent tous aux PM10 ou surtout à la PM1 mais qui ont des propriétés chimiques et physiques complètement différentes.

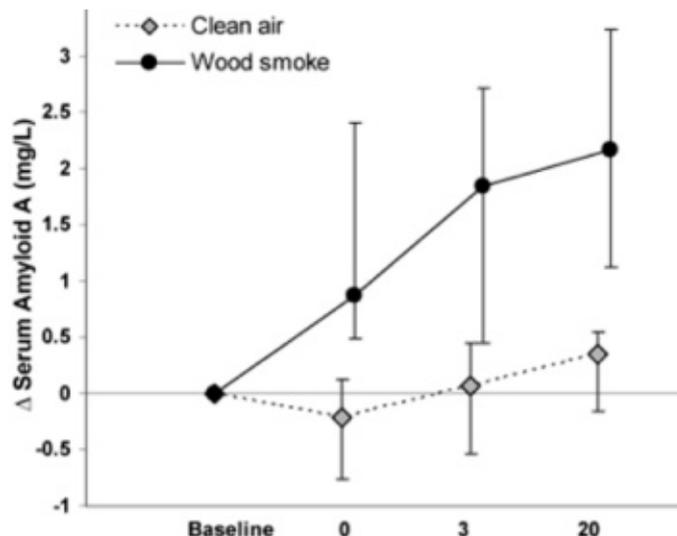


Fig. 9: Résultats sur l'inflammation après une exposition dans l'air et dans des fumées du bois [21].

3. L'importance pour la santé en termes de toxicité cellulaire et génétique est :

- Les COC montrent l'effet le plus important sur la santé,
- La suie montre un effet important,
- Les particules salines montrent un effet faible sur la toxicité, mais ils peuvent montrer un potentiel d'inflammation.

Donc, les particules minérales sont moins toxiques que la suie, qui est moins toxique que les composées organiques condensables.

4. De plus, les COV produisent des aérosols organiques secondaires qui sont aussi très nocifs pour la santé.

5. D'autres contaminants du combustible peuvent également causer des émissions à haute toxicité additionnelle :

- Métaux lourds (Pb, Zn, Cd, Cu...)



Chauffage à bois mal maîtrisé, photo FD

- Chlore : dioxines et furanes (PCDD/F) etc..

Conséquences

1. Une combustion incomplète du bois cause des émissions

- beaucoup plus hautes (2 à > 10) et
- beaucoup plus toxiques (2 à > 10)

qu'une combustion presque complète.

2. Éviter suie et COC n'est pas un conflit d'objectifs mais les mesures sont différentes :

- Suie : éviter des zones sans oxygène dans la chambre de combustion
- COC: éviter des températures basses dans la zone primaire (nécessité d'un bon allumage!).

3. Ni les valeurs limites mesurées en concentration de masse, ni les limites mesurées par taille des particules ne permettent de caractériser la chimie des particules (Goudrons très toxiques ou sels non-toxiques) et donc leur influence sur la santé.

4. Les chaudières manuelles sont fortement influencées par l'opérateur et montrent un potentiel

- aux émissions hautes et
- à haute toxicité (COC et suie).

5. Par contre, les chaudières automatiques aux plaquettes de bois sont moins influençables au type de conduite et montrent un potentiel aux

- émissions basses et surtout très basses avec des séparateurs pour des particules fines et
- beaucoup moins toxiques (sels).

6. Les chaudières à granulés montrent un potentiel aux

- émissions très basses, mais
- à moyenne toxicité car les particules contiennent du sel et normalement aussi des concentrations importantes de la suie.

En connaissance de ces effets des particules de la combustion du bois, on peut constater qu'une utilisation optimale de l'énergie du bois doit bien sûr être encouragée. Par contre, l'utilisation de technologies anciennes ou la mauvaise conduite d'appareils doivent impérativement être évités, à cause de leurs effets sur la santé, mais aussi pour l'image négative qu'elles donnent de l'énergie du bois qui en dehors de cela dispose de grandes qualités.

Remerciements

Office fédéral de l'énergie OFEN
Office fédéral de l'environnement OFEV
Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique FNS
Commission pour la technologie et l'innovation CTI

Informations

www.verenum.ch
www.hslu.ch
www.holzenergie-symposium.ch

Bibliographie

- [1] Nussbaumer T. (2003): Combustion and Co-combustion of Biomass. *Energy & Fuels*, 17(6), 1510–1521
- [2] Nussbaumer, T. (2010): Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen, 11. Holzenergie-Symposium, 17.9.10, ETH Zürich, 67–90
- [3] Nussbaumer, T.; Lauber, A. (2010): Formation mechanisms and physical properties of particles from wood combustion, 18th Eur. Biomass Conference and Exhibition, Lyon, 3–7 May 2010, OA11.3
- [4] Nussbaumer, T. et al. (2008): Influence of Ignition and Operation Type on Particle Emissions from Residential Wood Combustion, 16th European Biomass Conference and Exhibition, Valencia, 2–6 June 2008

Emissions par des appareils de chauffage vétustes

[5] Nussbaumer, T. (2007): Techno-economic assessment of particle removal in automatic wood combustion plants, 15th European Biomass Conference, Berlin 7–11 May 2007, OE2.5, 2362–2365

[6] BAFU (2011): Holzverbrennung und Feinstaub: www.bafu.admin.ch/luft/11577/index.html?lang=de

[7] Bruch, C.; Nussbaumer, T. (1998): CFD Modeling of Wood Furnaces. 10th European Biomass Conference and Exhibition, June 8 – 11, Würzburg, 1366 – 1369

[8] Baillifard, M.; Nussbaumer, T. (2008): Strömungsoptimierung von Feuerräumen, 10. Holzenergie-Symposium, 12.9.2008, ETH Zürich, 93–114

[9] Good, J.; Nussbaumer, T. (1998): Efficiency Improvement and Emission Reduction by Advanced Combustion Control Technique (ACCT). 10th European Biomass Conference and Exhibition, June 8 – 11 1998, Würzburg, 1362 – 1365

[10] Good, J. et al.: Manuel de Planification, QM Quality Management Chauffages au bois, Band 4, Holzenergie Schweiz, C.A.R.M.E.N. e.V. Straubing 2008, Traduction 2010

[11] Dockery et al. (1993), New England J. Med. Vol 329 1753-1759

[12] International Energy Agency (2010): Energy Poverty, OECD/IEA, Paris, www.iea.org/weo/universal.asp

[13] Nussbaumer, T.; Klippel, N.; Oser, M.: Health relevance of aerosols from biomass combustion, Series Thermal Biomass Utilization, Graz University of Technology, Vol. 6, 2005, 45–54

[14] Miljevic, B. et al. (2010). Oxidative Potential of Logwood and Pellet Burning Particles Assessed by a Novel Profluorescent Nitroxide Probe. EST, 44(17), 6601-6607

[15] Fong, K.; Nussbaumer, T.: Health Effects of Wood Combustion Aerosols, 16th ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, ETH Zürich, 24.-27. June 2012

[16] Kelz, J. et al. (2010). PM Emissions and Old and Modern Biomass Combustion Systems and their Health Effects. 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon, France.

[17] Tapanainen, M. et al. (2011): In vitro immunotoxic and genotoxic activities of particles emitted from two different small-scale wood combustion appliances, Atmospheric Environment 45(40) 2011, 7546–7554

[18] Jalava, P. et al. (2010). Effect of combustion condition on cytotoxic and inflammatory activity of residential wood combustion particles, Atmospheric Environment, 44(13), 1691-1698

[19] Kou, Y.; Lai, C. (1994). Reflex changes in breathing pattern evoked by inhalation of wood smoke in rats. Journal of Applied Physiology 76(6), 2333-2341

[20] Sällsten, G. et al. (2006): Experimental Wood Smoke Exposure in Humans. Inhalation Toxicol. 18(11), 855-864

[21] Barregard, L. et al. (2006): Experimental Exposure to Wood-Smoke Particles in Healthy Humans. Inhalation Toxicology 18(11), 845-853



Les fumées de bois causées par une mauvaise conduite doivent être évitées