
PRINCIPES DE COMBUSTION APPLIQUÉS AU CHAUFFAGE AU BOIS

Daniel Gagné, santé environnementale
Direction de santé publique
Agence de la santé et de services sociaux de l'Abitibi-Témiscamingue

OCTOBRE 2007

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	3
1. THÉORIE DE LA COMBUSTION.....	4
1.1 D'OU VIENT LA CHALEUR DE COMBUSTION	4
1.2 FACTEURS QUI PEUVENT INFLUENCER L'EFFICACITÉ DE LA COMBUSTION	4
1.2.1 <i>Le bon ratio oxygène/combustible</i>	4
1.2.2 <i>Un bon mélange de l'air et du combustible</i>	5
1.2.3 <i>Une bonne température d'ignition</i>	5
2. LES PRODUITS DE LA COMBUSTION	6
2.1 LA PYROLYSE	7
2.2 LA COMBUSTION DU BOIS	10
3. LA CHALEUR	12
4. LES APPAREILS DE CHAUFFAGE À COMBUSTIBLE SOLIDE (BOIS)	12
4.1 LES ÂTRES ET FOYERS.....	13
4.2 LES POÊLES POUR BOIS EN BÛCHES	14
4.2.1 <i>Les poêles à combustion lente</i>	14
4.2.2 <i>Les poêles à combustion évoluée</i>	15
4.2.2.1 Les poêles à combustion évoluée non catalytiques	15
4.2.2.2 Les poêles à combustion évoluée catalytiques	16
4.3 LES POÊLES À GRANULES.....	18
4.4 LES FOURNAISES À BOIS À CHAUFFAGE CENTRAL	19
4.4.1 <i>Les fournaises de chauffage central extérieures (dehors)</i>	19
5. MYTHES LES PLUS RÉPANDUS SUR LE CHAUFFAGE AU BOIS	20
5.1 LE POÊLE À BOIS PEUT FACILEMENT SERVIR DE SOURCE DE CHAUFFAGE PRINCIPAL POUR UNE MAISON.....	20
5.2 ON NE DEVRAIT UTILISER QUE DES BOIS DURS POUR LE CHAUFFAGE.....	21
5.3 IL SUFFIT DE S'ÉQUIPER D'UN POÊLE CERTIFIÉ EPA POUR NE PAS POLLUER	21
5.4 LE CHAUFFAGE AU BOIS N'EST PAS ÉCOLOGIQUE ET DEVRAIT ÊTRE AUTORISÉ UNIQUEMENT LÀ OÙ AUCUNE AUTRE FORME DE COMBUSTIBLE N'EST DISPONIBLE.....	22
BIBLIOGRAPHIE	24

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : schéma du cycle de la combustion	6
Tableau 1 : analyse des principaux composés du bois	6
Tableau 2 : analyse élémentaire du bois.....	7
Figure 2 : la pyrolyse et les deux grandes classes de produits de combustion qu'elle génère.....	7
Tableau 3 : sous-produits de pyrolyse en fonction de la température de combustion.....	8
Tableau 3 : sous-produits de combustion classés en fonction de leur degré de volatilité	8
Figure 4 : le cycle de pyrolyse du bois	9
Figure 2 : combustion des produits volatils dans un feu de bois.....	10
Figure 3 : combustion des goudrons lourds.....	11
Figure 4 : combustion des goudrons et du charbon de bois	11
Figure 5 : poêle à combustion évoluée non catalytique	16
Figure 6 : exemples de catalyseurs pour poêles à bois.....	17
Figure 7 : illustration du fonctionnement d'un poêle catalytique	17
Figure 8 : illustration du fonctionnement d'un poêle à granules.....	18
Figure 9 : exemple d'une installation de chauffage central extérieur	20

Introduction

Il existe beaucoup d'ouvrages de vulgarisation (brochures) sur les bonnes pratiques du chauffage au bois, mais peu d'entre eux expliquent les connaissances théoriques sur lesquels s'appuient les recommandations.

Le bois est utilisé comme combustible depuis des millénaires et son utilisation pour le chauffage est considérée comme simple et naturelle, ne nécessitant qu'un apprentissage minimal. D'ailleurs, les appareils de chauffage sont en vente libre par des firmes non spécialisées et aucune législation ne contrôle leur installation et leur opération, contrairement à tous les autres appareils de chauffage à combustible. Il ne viendrait à l'idée de personne de choisir un appareil de chauffage au gaz naturel, de l'installer lui-même, d'en faire l'ajustement, l'entretien et la réparation. On se fie alors à des techniciens certifiés. Ce qui n'est pas le cas pour le chauffage au bois, alors que les bases théoriques pour son fonctionnement sont tout aussi complexes.

Ce n'est que depuis une centaine d'années que l'on connaît les principes physiques et chimiques qui régissent la combustion des hydrocarbures en général, dont celle du bois. Pendant la majeure partie du XXe siècle, ces principes ont été appliqués avec succès pour améliorer la performance, à la fois énergétique et environnementale, de la plupart des combustibles (gaz naturel, mazout, essence, acétylène, etc.) sauf le bois. Pendant ce temps, ce dernier a peu à peu perdu du terrain car il ne pouvait rivaliser avec les autres hydrocarbures comme combustible de chauffage, surtout avec les techniques de combustion traditionnelles dérivées empiriquement de son utilisation avant le XXe siècle. Le chauffage au bois a été en quelque sorte victime de sa simplicité : il est si facile de faire un feu de bois qu'on ne songe pas aux moyens d'en faire un vraiment efficace!

Avec la rareté des combustibles fossiles et le constat de leurs effets néfastes sur le climat de la Terre, on assiste depuis quelques années à un intérêt renouvelé pour la biomasse comme source de combustible et les ingénieurs ont raffiné la technologie de combustion du bois pour en améliorer à la fois l'efficacité et la propreté en termes de contamination émise. Pour se convaincre de remplacer les poêles polluants par des poêles plus efficaces, pour bien utiliser et bien entretenir ces derniers, il faut avoir assimilé certains principes théoriques de base sur la combustion en général et sur la combustion du bois en particulier.

Cette brochure se veut une aide pour ceux qui veulent prendre au sérieux le chauffage au bois, autant pour des raisons écologiques qu'économiques. Elle n'en demeure pas moins une simple initiation. Si elle leur permet de vouloir pousser plus loin leur expertise, elle aura atteint son principal objectif.

Pour ceux qui douteraient de la pertinence de s'intéresser encore au chauffage au bois au début du XXIe siècle mentionnons seulement qu'aux E-U., en 1997, il y avait 10 millions de poêles à bois, 27 millions de foyers (âtres), 300 000 fournaies centrales au bois et 300 000 poêles à granules, pour un total de 38 millions d'appareils de chauffage au bois. Pour le Canada entier, toutes proportions gardées, cela donnerait 3,8 millions d'appareils. Mais il ne serait pas surprenant que ce nombre soit d'au moins le double au Canada, compte tenu de ses hivers plus rigoureux et de la plus grande disponibilité du bois de chauffage en milieu rural.

1. Théorie de la combustion

1.1 D'où vient la chaleur de combustion

La maîtrise du feu a marqué une étape décisive dans l'évolution de l'homme et l'a fait entrer dans une nouvelle ère où la technologie est devenue un instrument de libération par rapport aux contraintes de la vie terrestre qui sont le lot de la plupart des autres créatures vivantes. Il lui a fallu cependant plusieurs dizaines de millénaires pour comprendre l'origine physique et chimique de cette énergie.

La chaleur lors de la combustion est simplement produite par l'activité accélérée de l'oxygène (O) sur des matériaux combustibles comme le carbone, l'hydrogène (H) et le soufre (S). On parle donc d'oxydation. Toute oxydation de ces matériaux dégage de la chaleur, mais seule l'oxydation accélérée dégage suffisamment de chaleur pour produire des flammes et une quantité utilisable de chaleur pour le chauffage.

Pour accélérer l'oxydation, il faut dépasser le stade d'ignition du combustible. Pour arriver au stade d'ignition, il faut chauffer le combustible à une température suffisante pour que l'oxydation soit si rapide qu'elle se communique spontanément au reste du matériel. Autrement dit, une fois la température d'ignition atteinte, une réaction en chaîne d'oxydation se déclenche et gagne le reste du combustible, pourvu qu'on fournisse suffisamment d'oxygène dans la réaction.

Les deux éléments que l'on retrouve le plus fréquemment dans les combustibles sont le carbone (C) et l'hydrogène (H). Les réactions d'oxydation pour ces deux composés sont les suivantes :

- $C + OO \rightarrow CO_2$ (dioxyde de carbone) + chaleur
- $HH + OO + HH \rightarrow 2 H_2O$ (eau) + chaleur

Le dégagement de chaleur est maximal lorsque tous les éléments présents dans la chaîne de réaction sont à l'état gazeux. Ceci représente la situation idéale, pratiquement jamais atteinte lors de la combustion du bois. En pratique, la situation ressemble plutôt à ce qui est schématisé dans la figure 1, section 2 (page 6).

1.2 Facteurs qui peuvent influencer l'efficacité de la combustion

1.2.1 Le bon ratio oxygène/combustible

Une bonne combustion suppose une bonne synchronisation dans la chaîne d'événements contenus dans le cycle d'oxydation. Il faut s'assurer que chaque fois qu'un atome de carbone se fait oxyder, un autre atome de carbone – et seulement un – vienne le remplacer pour répéter le cycle. De même pour l'hydrogène. S'il y a trop de carbone pour l'oxygène disponible, on aura une sous-combustion. S'il y a trop d'oxygène pour le carbone ou l'hydrogène disponible, on aura un refroidissement de la flamme par dilution. Un bon dosage air/combustible est donc essentiel. De plus, en pratique on n'utilise pas de l'oxygène pur dans les appareils de chauffage au bois, mais de l'air. Ce dernier ne contient que 21 % d'oxygène, le reste étant surtout de l'azote, gaz qui n'intervient pas dans la combustion mais qui transporte la chaleur dans le tuyau à fumée, la rendant moins disponible pour chauffer une pièce.

Pour chaque combustible il existe une proportion spécifique d'air (ou d'oxygène) à ajouter pour assurer la combustion parfaite. Par exemple, pour l'acétylène ce sera 11,5 fois plus d'air en volume que d'acétylène. Pour le propane, ce sera 24 fois plus, etc. La combustion peut être grandement favorisée si on injecte de l'air au point d'ignition pour favoriser l'oxydation, y faire apparaître et entretenir la flamme en fournissant exactement la bonne proportion air/combustible. Techniquement cela est beaucoup plus facile avec des

carburants gazeux comme le méthane ou liquide comme l'essence. Pour le bois, les choses sont plus complexes à cause de la difficulté à faire évaporer les éléments oxydables (carbone et hydrogène) et de la co-existence simultanée de plusieurs modes de combustion, comme nous le verrons plus loin.

1.2.2 Un bon mélange de l'air et du combustible

Idéalement, le mélange a pour but de s'assurer que chaque particule de combustible aura la possibilité d'entrer en contact avec une molécule d'air. Quand il s'agit d'un combustible gazeux (comme le méthane, par exemple), il suffit de brasser vigoureusement l'air pour obtenir ce bon mélange. Quand il s'agit d'un combustible liquide (par exemple l'huile à chauffage), on doit au préalable l'évaporer avant de l'amener dans la chambre de combustion. Pour accélérer cette évaporation, on va atomiser le liquide en fines gouttelettes, ce qui va augmenter la surface d'évaporation du liquide.

Pour les combustibles solides, comme le bois, on ne peut pas assurer un mélange équivalent à celui qu'on peut obtenir avec un gaz ou un liquide volatil. Il faut que chaque atome de carbone ou hydrogène attende son tour dans la file avant de se faire oxyder. Dès que le premier s'envole, en produit volatilisé par la chaleur de combustion, le voisin devient disponible, s'envole, et ainsi de suite. Ce processus retarde beaucoup l'oxydation de masse et par conséquent diminue l'efficacité en production de chaleur. On peut y remédier partiellement en pulvérisant le bois en fines particules pour augmenter la surface de contact des atomes de carbone avec l'air. C'est l'effet recherché avec les mini boudins de combustible utilisés dans les poêles à granules, lesquels ont une combustion plus efficace que les fournaies conventionnelles.

Une fois la majeure partie du bois enflammé, la chaleur accumulée dans la bûche sera suffisante pour débiter la pyrolyse, c'est-à-dire la décomposition par la chaleur des constituants du bois, cellulose et lignine principalement, en sous-produits volatils (des goudrons notamment) qui eux peuvent s'oxyder massivement entraînant l'apparition de flammes visibles au-dessus des bûches. C'est à partir de ce stade qu'il faut assurer un bon mélange de l'air et des produits volatilisés au-dessus des bûches.

1.2.3 Une bonne température d'ignition

Pour démarrer le cycle de l'oxydation accélérée, il faut maintenir la température d'ignition, pendant un certain temps sur le combustible. Pour le bois cette température varie entre 300° C et 600° C, selon l'humidité, la densité du bois et surtout la masse de la pièce à brûler. Une trop grosse masse dispersera la chaleur d'ignition et on devra l'appliquer plus longtemps avant de dépasser la température d'ignition. Ainsi, avec une simple allumette on ne pourra pas enflammer une grosse bûche, mais avec la même allumette on enflammera facilement un papier journal qui lui brûlera assez longtemps pour enflammer une éclisse, qui elle brûlera assez longtemps pour enflammer une bûche. Une fois la température d'ignition atteinte dans la bûche, des flammes devraient s'en dégager. Le dégagement de flammes peut être considéré comme le déclenchement d'ignitions en série se propageant le long de la trajectoire des flammes autour de la bûche. Cela constitue la réaction d'oxydation accélérée permettant au feu de dégager de plus en plus de chaleur au point d'allumer le reste du combustible pour le faire entrer dans une série de cycles de combustion.

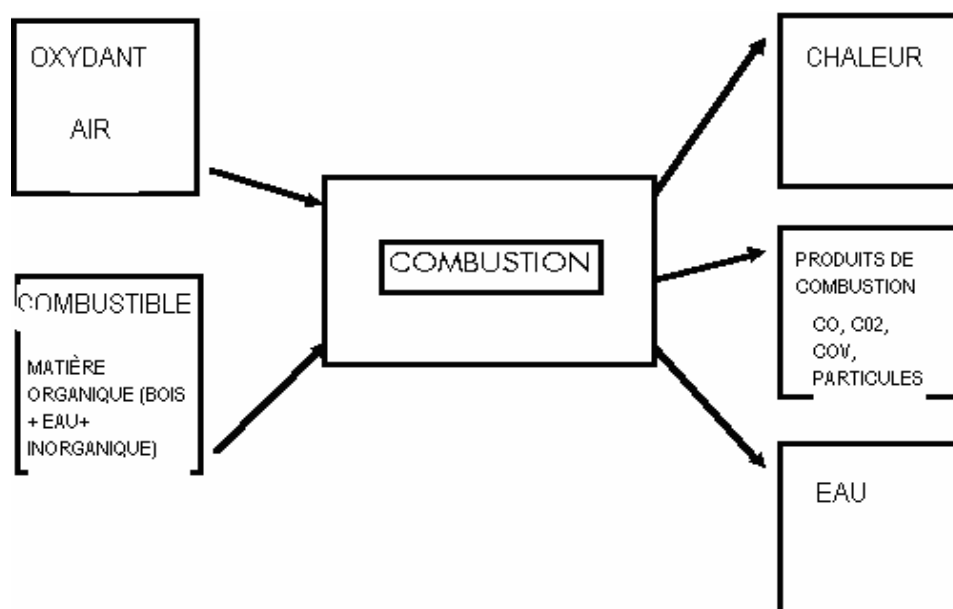
Cependant l'ajout d'un surplus d'air d'oxygénation froid dans une fournaise pourrait abaisser la température ambiante en deçà de celle d'ignition et une partie du combustible pourrait ne pas brûler pendant cet épisode.

2. Les produits de la combustion

L'homme recherche le feu, comme il recherche l'amour, non pour sa combustion, mais pour la chaleur qu'il dégage, laquelle est un sous-produit de la combustion. Mais, comme l'amour, la chaleur provient d'une réaction violente qui vient avec des risques et d'autres produits de combustion, plus ou moins désirables.

Dans la section précédente, on a vu que la combustion générait, en plus de la chaleur, du CO₂ et de la vapeur d'eau. Mais cela se produit uniquement dans des situations théoriques. En pratique, toute forme de combustion génère aussi des sous-produits de combustion, en plus du CO₂ et de la vapeur d'eau. C'est particulièrement vrai dans le cas du chauffage au bois. Ce phénomène est illustré dans le schéma suivant.

Figure 1 : schéma du cycle de la combustion¹



Le défi majeur dans le chauffage au bois c'est de réduire au minimum ces sous-produits de combustion, qui sont responsables de la pollution causée par le chauffage au bois, tout en récupérant le maximum de chaleur et le plus longtemps possible. Heureusement, on peut y arriver en augmentant l'efficacité de la combustion, car ces sous-produits sont aussi des combustibles, permettant d'allonger le cycle de production de chaleur. Pour comprendre comment ses sous-produits se forment et quelle est leur nature, voyons d'abord de quoi est constitué le bois..

Tableau 1 : analyse des principaux composés du bois²

type	Cendres (%)	Lipides et terpènes (%)	Lignine (%)	Hemicellulose (%)	Cellulose (%)
Bois mou	0,4	2,0	27,8	24,0	41,0
Bois dur	0,3	3,1	19,5	35,0	39,0

Si maintenant on examine la structure moléculaire du bois on retrouvera à peu près la répartition suivante des principaux éléments

¹ Ballard-Tremeer, Grant, (1997), Appendix D Wood combustion

² Shafizadeh (1981) p. 106, cité dans Ballard-G, B. (1997), Il s'agit évidemment d'une répartition qui peut varier selon les espèces, l'endroit où les arbres ont poussé, la saison de récolte, etc.

Tableau 2 : analyse élémentaire du bois³

Carbone (%)	Hydrogène (%)	Oxygène (%)	Azote (%)	Soufre (%)	Incombustibles (%)
50,5	6,0	42,4	0,2	0,05	1,0

Le tableau 1 omet de mentionner la présence d'humidité, un gros facteur d'inefficacité de la combustion. En effet le bois vert peut contenir 50 % d'humidité et le bois « sec » en contient très rarement moins de 20 %. L'humidité abaisse la température de combustion en utilisant une partie de la chaleur produite pour la seule évaporation de l'eau. En abaissant la température de combustion cela nuit à l'oxydation des sous-produits de combustion nocifs qui alors s'échappent directement par la cheminée.

Les cendres sont composées surtout de matières inorganiques comme le calcium, le potassium, le magnésium et des sulfates. Par définition ces matières sont incombustibles. Les matières insolubles des cendres peuvent abaisser la température de combustion par dilution mais leurs matières solubles (par exemple les sulfates) peuvent avoir un effet catalyseur bénéfique lors de la pyrolyse.

Le carbone du bois provient majoritairement de trois des composés qu'il contient, soit : la cellulose, l'hémicellulose (deux polymères à longue chaîne) et la lignine (un composé à 10 carbones). La cellulose, qui est un sucre, en est le principal réservoir. La lignine est un liant entre les molécules de cellulose. Elle est présente en quantité plus importante dans les bois mous.

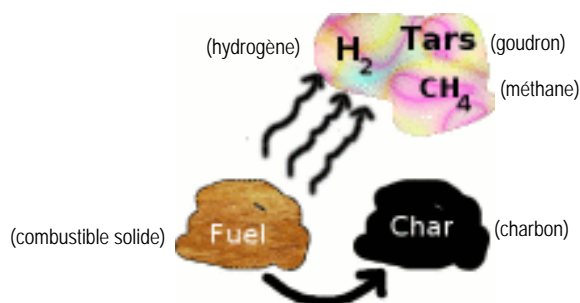
2.1 La pyrolyse

Les combustibles solides, contrairement aux gazeux, ne brûlent jamais directement. Il faut d'abord leur appliquer une source de chaleur qui en fera évaporer des produits gazeux et inflammables, qui eux se prêteront à l'oxydation accélérée. Cette opération s'appelle la pyrolyse.

La pyrolyse du bois se fait par fractionnement des chaînes de carbones du bois (cellulose, hémicellulose et lignine). Ce fractionnement donne naissance à des sous-produits légers (volatils) dans le cas de la cellulose et de l'hémicellulose et à d'autres plus lourds (goudrons et charbons), dans le cas de la lignine. Si elle se produit à basse température, en atmosphère déficiente en oxygène, la pyrolyse se fait sans flamme (sous la température d'ignition des sous-produits volatils) et laisse un résidu solide, oxydé en surface seulement, très concentré en carbone, qu'on appelle le charbon de bois. Ce charbon de bois pourra lui-même devenir une autre source de combustible qui brûle à plus basse température plus lentement et sans flamme (il se caractérise par un rougeoiement émettant dans l'infra-rouge).

Le schéma suivant illustre les deux principales classes de sous-produits dérivés de la pyrolyse :

Figure 2 : la pyrolyse et les deux grandes classes de produits de combustion qu'elle génère⁴



³ Cheremisinoff (1992) p. 8 cité dans Ballard-G, B. (1997)

⁴ Tiré de Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrolysis>

C'est l'oxydation accélérée des sous produits légers et lourds qui produit la flamme. Comme ces produits sont évaporés au-dessus du bois, la flamme a tendance à se maintenir à cette hauteur. L'évaporation des produits légers étant plus importante que pour les produits lourds, la combustion sera d'autant plus efficace que la pyrolyse pourra en dégager au détriment des produits lourds. Cependant la répartition entre produits légers et lourds est complexe car elle dépend de plusieurs facteurs externes (température d'ignition, durée du chauffage, grosseur des particules émises et effet catalyseur des produits inorganiques). Le tableau suivant résume les principaux sous-produits qui se forment en fonction de la température de combustion.

Tableau 3 : sous-produits de pyrolyse en fonction de la température de combustion⁵

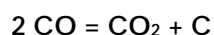
Température	Réaction	Sous-produits
Moins de 300°C	Début de la formation de radicaux libres, élimination de l'eau	CO et CO ₂ , groupements carbonyle et carboxyle, et surtout, <u>formation de charbon de bois.</u>
300-450°C	Fractionnement des chaînes de cellulose, formation de polysaccharides par substitution	Mélange de levoglucosanes, formation de goudrons
Plus de 450°C	Réarrangement et scission des sucres	Groupements carbonyle volatils tels acétaldehyde, glyoxal et acroléine
Plus de 500°C	Un mélange de toutes les réactions précédentes	Un mélange de tous les produits précédents
Condensation (abaissement subit de la température)	Les produits insaturés se collent aux particules de charbon de bois	Le charbon devient plus réactif à cause des résidus goudronnés qu'il a adsorbés

Le tableau 3 présente une synthèse des principales substances émises lors de la pyrolyse, classées en fonction de leur degré de volatilité.

Tableau 3 : sous-produits de combustion classés en fonction de leur degré de volatilité

Degré de volatilité	Substances (sous-produits) formées
Très volatils : gaz	Hydrogène, CO, CO ₂ , méthane et hydrocarbures (HC) légers (propane, butane, etc.)
Volatils : vapeurs condensables	Eau, Composés organiques volatils (COV) : (aldéhydes, acides organiques, cétones, alcools)
Peu volatils : vapeurs lourdes, facilement condensables	Sucres de hauts poids moléculaires, dérivés de furanes et de phénols
Non volatils : produits solides	Particules fines et charbon de bois

Les produits volatils brûlent en produisant des flammes et en libérant des radicaux libres, par scission des sucres. Une pyrolyse plus poussée des produits volatils peut produire des particules de carbone pur dans les gaz de combustion. Ceci se produit selon la réaction suivante à une température d'environ 700° C:

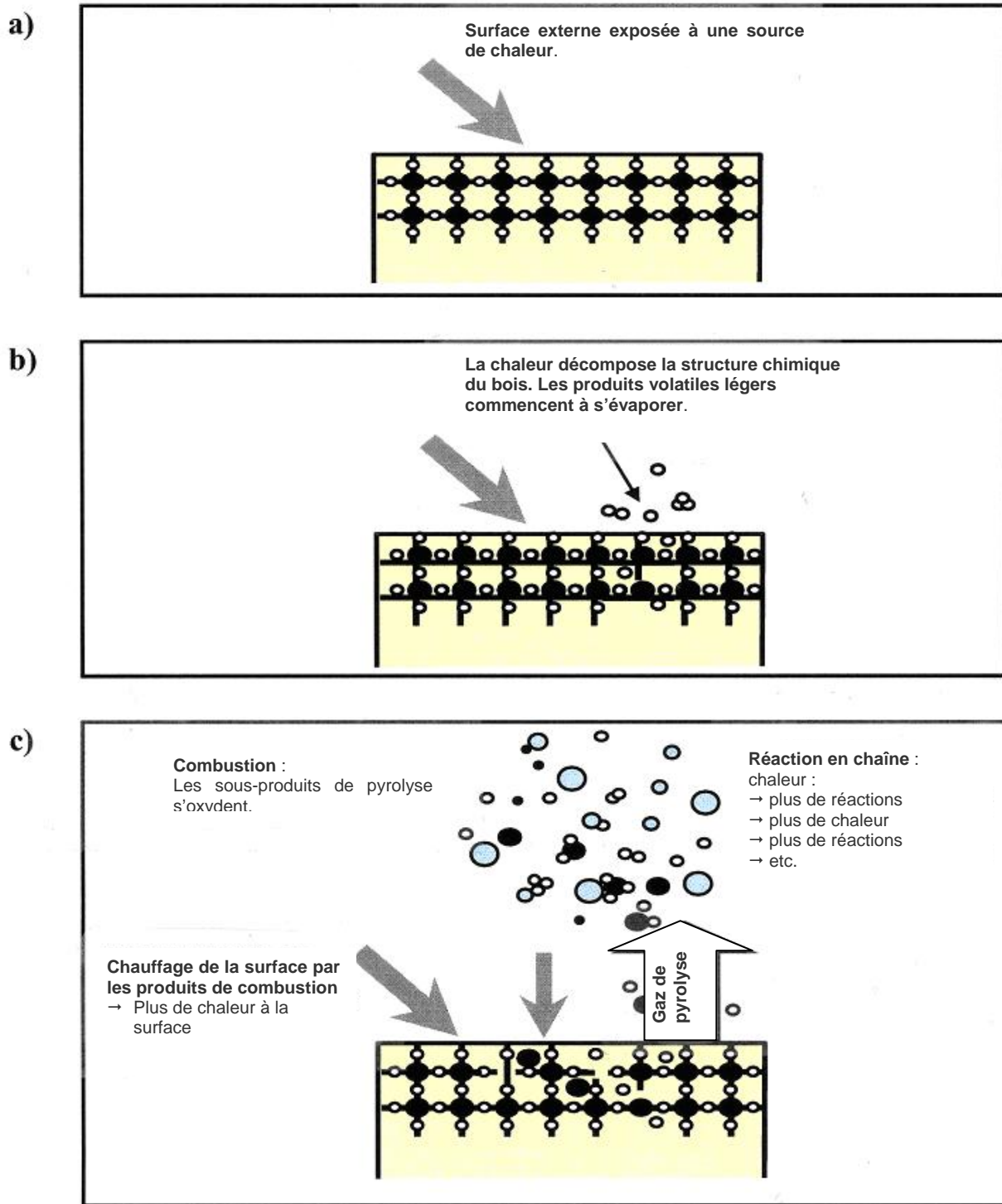


Ce sont les particules de suie. La suie peut aussi être produite, et en quantités plus abondantes encore, pendant la pyrolyse à basse température (<300° C) en milieu faiblement oxygéné où on retrouve beaucoup de CO disponible pour la libération de particules de carbone non oxydées.

⁵ Tiré de : Ballard-G, B. (1997)

La figure 4 illustre le processus de pyrolyse ainsi que l'évolution de la structure du bois au fur et à mesure qu'il se décompose.

Figure 4 : le cycle de pyrolyse du bois⁶



⁶ Tiré de : <http://virtua.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/database/burning/burning.html>

2.2 La combustion du bois

Dans un vrai feu la température varie d'un moment à l'autre et d'un endroit à l'autre, de sorte que l'ensemble de toutes les réactions précédentes peuvent se produire simultanément. La chaleur dégagée est maximale lorsque les produits volatils s'enflamment à cause de leur rapidité à s'oxyder. Ce sont les gaz et produits hautement volatils qui produisent des flammes bleues. Viennent ensuite les goudrons, avec des flammes jaunâtres puis le charbon de bois, qui ne fait pas de flammes, mais rougeoit (en émettant dans l'infra-rouge). Il est à peu près impossible de contrôler le mélange air/combustible de façon suffisamment précise avec les technologies courantes au point où on favorisera uniquement la pyrolyse de la cellulose en produits volatils au détriment des goudrons. Tout ce qu'on peut espérer, c'est de maintenir des températures suffisantes pour provoquer une émission importante et continue de produits gazeux ou très volatils, ce qui favorisera la combustion secondaire des goudrons après leur formation, lesquels ont un excellent pouvoir thermique, si on maintient la température au-dessus de leur point d'ignition. Viendra toujours un moment cependant où la température s'abaissera par épuisement des produits gazeux et très volatils et la combustion passera alors en mode intermédiaire avec condensation des goudrons sur les particules solides ou sur les surfaces froides de la fournaise et de la cheminées, puis finalement, en mode charbon de bois, sans flamme, rougeoyante et fortement émettrice de CO et de particules fines.

Les trois illustrations suivantes dépeignent bien les différents modes de combustion qui se produisent, le plus souvent simultanément, dans un feu, lesquels correspondent aux couleurs des flammes. La première montre la phase de combustion de produits gazeux et volatils (flammes bleues ou vertes) simultanément à celle de la combustion des goudrons légers (flammes jaunes).

Figure 2 : combustion des produits volatils dans un feu de bois



Cette phase survient habituellement dans un feu jeune. La flamme bleue correspond au dégagement maximal de chaleur. Au fur et à mesure que le bois s'épuise en produits volatils, on passe alors à la phase de combustion à plus basse température, telle qu'illustrée aux figures suivantes.

Figure 3 : combustion des goudrons lourds



La figure 3 montre la combustion des goudrons lourds à température moyenne. On note la présence de flammes rouges et jaunes, mais aussi la génération d'une épaisse fumée noire qui représente la portion imbrûlée des goudrons. La flamme jaune correspond à une chaleur moindre que les flammes bleues.

Figure 4 : combustion des goudrons et du charbon de bois⁷



On peut bien voir sur la figure 4, les différentes phases de la combustion se produisant simultanément dans un feu bien oxygéné. On y distingue les flammes jaunes et vives provenant de la combustion des goudrons légers et lourds (au-dessus des bûches) et la combustion du charbon de bois (couleur rouge, sans flamme à la base du feu). Les deux modes de combustion se produisent simultanément à partir d'un certain stade de « vieillissement » du feu. Ultimement, la combustion entrera dans sa phase finale de pyrolyse à basse température. Le rougeoiement correspond aux niveaux de faibles températures. Notons cependant que l'infrarouge peut être absorbé facilement par le corps humain par radiation, même si la température environnante de l'air est froide.

C'est surtout au début (au moment de l'ignition du bois) et à la fin de la combustion que les températures sont les plus basses et donc que la pyrolyse produit des composés moins volatils ou toxiques (comme le CO et les particules fines). Toutefois, si pour une raison ou une autre la température est artificiellement abaissée après avoir atteint le mode de pyrolyse des produits les plus volatils (plus de 400° C), il y a alors de fortes chances que des sous-produits de combustion sortent dehors sans avoir été brûlés, causant la pollution par le chauffage au bois.

En pratique, les choses ne sont pas aussi simples car il faut fréquemment recharger le feu en combustible, ce qui à chaque fois provoque des perturbations dans les cycles de combustion, activant certains et atténuant les autres, augmentant en fait la coexistence de plusieurs modes de combustion simultanément dans le même feu. Toutes sortes de mécanismes ont été

⁷ Smokin', Fire, Smoke & Coals : <http://www.ibiblio.org/lineback/bbq/coals.htm>

incorporés aux appareils de chauffage pour pallier aux inconvénients de la superposition des cycles de pyrolyse, mais surtout pour récupérer davantage de la chaleur qui s'échappe par le tuyau à fumée avec les sous-produits de combustion. Ces mécanismes viennent s'ajouter à l'ensemble des facteurs qui peuvent entraver l'efficacité de la combustion.

3. La chaleur

La chaleur est une sensation provenant d'un échange entre la température de l'environnement et celle de notre corps. Cette sensation n'est pas nécessairement proportionnelle à la température de combustion. On a vu dans la section précédente que les flammes bleues étaient les plus chaudes. Cependant, si l'air ambiant est froid, elles ne sont pas très efficaces pour réchauffer le corps. Si par contre l'air est très chaud, on pourra éprouver une sensation de brûlure mais seule la surface de la peau sera affectée (on aura quand même froid dans les couches profondes de notre corps). L'infra-rouge par contre pénètre plus profondément à l'intérieur du corps et donne rapidement une sensation de bien-être, sans le sentiment de brûler. C'est la forme de chaleur la plus recherchée pour se chauffer. On trouve un maximum d'infra-rouge lorsque la combustion est en mode de pyrolyse du carbone pur, par exemple dans les braises en fin de brûlage du bois. Cela est aussi vrai pour la cuisson. Les viandes en pyrolyse sur un feu de braises ne s'oxydent (brûlent) qu'en surface et sans flamme pendant que la chaleur de cuisson s'accumule à l'intérieur. C'est ce qu'on appelle le rôtissage.

De même la présence de courant d'air dans une pièce peut favoriser la distribution uniforme dans toute la pièce de la chaleur accumulée près de la source de combustion. Les courants d'air peuvent donc être utilisés pour augmenter la pénétration de la chaleur dans le corps ou pour distribuer la chaleur loin de sa source par le phénomène de convection.

Les appareils de chauffage tentent chacun à leur manière de tirer le meilleur parti de tous ces phénomènes, par exemple en transformant l'énergie des flammes à hautes températures (bleues ou jaunes) en infra-rouges ou en privilégiant le mode de combustion par pyrolyse de charbon de bois au détriment des autres modes.

4. Les appareils de chauffage à combustible solide (bois)

Le mode de chauffage le plus ancien est celui du feu en plein air. Bien qu'il ne soit pas très efficace pour récupérer la chaleur de combustion en une source utile pour se chauffer, il a l'avantage de présenter peu d'obstacles à une bonne combustion du bois. L'oxygène nécessaire est disponible sans restriction et le brassage du mélange air/carburant est assuré par les courants d'air ambiants. Même s'il y a beaucoup de sous-produits imbrûlés qui s'en échappent (par exemple lors de grands vents), ils n'ont pas la possibilité de se condenser sur des tuyaux à fumée ou sur les particules de suie à cause de l'abondante dilution dans l'air ambiant extérieur. Cela évite de provoquer une pollution locale très visible.

Les hommes ont appris beaucoup sur les paramètres qui influencent la combustion ainsi que sur la récupération de chaleur simplement en observant le comportement des feux en plein air. C'est ce qu'on appelle la méthode empirique. Par exemple, ils ont rapidement constaté que l'ajout d'un surplus d'air au point d'ignition pouvait activer la combustion, ce qui se produit lorsqu'un courant d'air souffle sur le feu, mais que si on en ajoutait trop cela pouvait l'éteindre, par dilution de la chaleur d'ignition, notamment lors de l'allumage. Ils ont aussi appris que l'utilisation de bois humide (vert) et non fendu défavorisait la combustion, augmentait l'émission de particules et de fumées tout en favorisant la pyrolyse en mode carbonisation. Ils ont finalement appris que les bois fendus et peu denses brûlaient facilement et rapidement, en dégageant beaucoup de chaleur mais peu d'infra-rouges, alors que les bois non fendus et plus denses s'enflammaient plus difficilement mais dégageaient plus longtemps une chaleur moins vive, notamment dans les infra-rouges en mode carbonisation.

En ce qui concerne la récupération de chaleur, ils ont appris que les pierres autour d'un feu pouvaient emmagasiner une partie de la chaleur et la ré-émettre une fois le feu éteint ou qu'un rocher situé à proximité d'un feu pouvait réfléchir vers le feu et l'utilisateur une partie de la chaleur perdue dans l'environnement.

Toutes ces découvertes empiriques à partir de l'utilisation des feux de bois ont été mises à contribution, de diverses manières pour concevoir et améliorer les appareils de chauffage au bois que les hommes se sont ingéniés à construire depuis des siècles.

L'objectif visé par les appareils de chauffage est donc d'obtenir une efficacité de combustion au moins aussi bonne qu'un feu en plein air, tout en récupérant le maximum de la chaleur de combustion pour réchauffer les occupants d'une habitation. Malheureusement, comme on ne comprenait pas vraiment les principes sous-jacents à une bonne efficacité de combustion, dans beaucoup de ces appareils, conçus au XVIII^e ou XIX^e siècle, la captation de la chaleur et l'amélioration de l'efficacité de combustion se sont faites le plus souvent au détriment de l'émission de contaminants dans l'atmosphère, comme nous le verrons plus loin. À une époque où les préoccupations environnementales et le coût du bois de chauffage comptaient pour peu, on n'a pas insisté sur les performances environnementales des nouveaux modèles de poêles mis sur le marché. Il en est autrement depuis une décennie. En voulant diminuer l'émission de contaminants des poêles, les concepteurs ont raffiné leurs connaissances sur les principes de combustion du bois et se sont rendus compte que l'amélioration de l'efficacité de combustion allait souvent de pair avec une diminution des rejets polluants à l'environnement, au point de surpasser la performance des feux en plein air, à la fois pour l'efficacité de combustion et pour l'émission de sous-produits de combustion.

Cette section ne prétend pas brosser un portrait complet des différents types d'appareils de chauffage. Elle insiste plutôt sur la façon dont les principes de combustion furent utilisés pour améliorer la performance des feux de bois en plein air comme mode de chauffage.

4.1 Les âtres et foyers

Les foyers et âtres représentent une des premières tentatives de récupérer une partie de la chaleur du feu de bois extérieur pour chauffer une pièce d'une maison. Bien que les premiers foyers arrivaient à jeter un peu de chaleur radiante près du brasier, leur efficacité était voisine de zéro quand on soustrayait la quantité d'air froid extérieur qu'il fallait admettre dans la maison pour compenser les débits énormes d'air (chaud) évacués par la cheminée. En effet, un foyer, même modeste, peut extraire plus de 200 pieds cubes d'air ambiant à la minute (pcm) ou 5,5 m³/min. Dans le cas d'un gros foyer, ce volume peut augmenter à 17 m³/min.(600 pcm)⁸. On a fait quelques progrès en tentant d'absorber une partie de la chaleur ainsi évacuée dans des ouvrages de maçonnerie entourant le foyer. La chaleur accumulée dans la pierre pouvait ainsi être retransmise dans la pièce par radiation, même après que le feu soit éteint.

L'ajout devant l'âtre de portes en verre, traité pour laisser passer les rayons infra-rouges dans la pièce, a permis de réduire la quantité d'air (et de chaleur) évacuée dehors, sans pour cela affecter trop l'efficacité de combustion. Mais le gain d'efficacité sera majeur si on adapte un poêle à combustion évoluée et son tuyau à fumée dans l'orifice du foyer. Ces poêles ne requièrent que 0,4 à 0,8 m³/min. d'air de remplacement (15 à 30 pcm). Dans les maisons modernes très étanches aux infiltrations d'air, il est important d'avoir un appareil peu gourmand en air de remplacement, sinon la maison deviendra rapidement en pression négative ce qui réduira le tirage naturel de la cheminée, favorisera l'introduction des gaz et fumées de combustion dans la maison et nuira à l'oxygénation du feu. Ces poêles à bois, encastrés dans les foyers, perdent cependant une partie de leur efficacité théorique parce que les foyers sont généralement situés sur un mur extérieur. Une partie de la chaleur se perd à chauffer un mur

⁸ Wood heat organisation, Can a fireplace behave itself in a tight house?, www.woodheat.org/technology/openfire.htm, mai 2007

froid. De plus, un poêle encastré dans un mur diffuse moins bien sa chaleur que s'il était situé au centre d'une pièce.

Les poêles de maçonnerie (souvent appelés foyers massifs) représentent un genre d'hybride entre les foyers traditionnels et les poêles conventionnels en ce sens qu'ils augmentent la récupération de la chaleur radiante dans la brique ou la céramique qui entourent le foyer de combustion du poêle. Pour y arriver, ils convertissent l'énergie maximale du feu, produite en activant autant que possible l'oxygénation au début de la combustion avec un feu violent mais de brève durée. Ces feux à haute température, à flammes bleues, émettent peu de particules et de sous-produits de combustion imbrûlés. Cette phase est prolongée le plus possible, mais au détriment de la durée de combustion, qui sera nécessairement raccourcie. Cependant l'essentiel de la chaleur de combustion sera stockée dans une importante masse de pierre qui redistribue ensuite lentement cette énergie sous forme d'infra-rouges dans la pièce, longtemps après que le feu soit éteint dans le foyer.

De nos jours, les foyers et les âtres sont de plus en plus délaissés comme appareils de chauffage et sont plutôt utilisés pour créer une ambiance de confort campagnard, même à la ville. En fait, aux Etats-Unis, on estime qu'un âtre sur deux environ sert moins de deux fois par semaine, notamment les âtres conventionnels en maçonnerie⁹. Fort heureusement d'ailleurs, car leur performance environnementale n'est pas meilleure que leur efficacité à chauffer une maison.

4.2 Les poêles pour bois en bûches

Les poêles à bois dits conventionnels ont meublé presque toutes les maisons entre 1850 et 1950. Ils ont cependant été rapidement délogés par l'huile ou le gaz naturel, puis l'électricité comme mode de chauffage principal dans les maisons en Amérique du nord. Pendant les belles années des poêles à bois conventionnels, la version « cuisinière à bois » a aussi longtemps été utilisée pour la cuisson des aliments. Ces dernières étaient d'ailleurs utilisées aussi pour le chauffage de la maison pendant les saisons autres que l'hiver, ce qui démontre bien jusqu'à quel point une grande partie de la chaleur produite se perdait dans l'environnement au lieu d'être utilisée pour cuire les aliments. Cependant, par rapport aux foyers conventionnels, ils avaient une bien plus grande efficacité en termes de BTU produits par tonne de bois brûlé. Ils requéraient moins d'espace, pouvaient être installés au milieu d'une pièce (plutôt que le long d'un mur extérieur), avaient un tuyau à fumée moins volumineux que les cheminées de maçonnerie, requéraient moins d'air pour l'évacuation des sous-produits de combustion et pouvaient emmagasiner les infra-rouges pendant assez longtemps si on les fabriquait avec un acier dense, comme la fonte.

Entre 1950 et 1970, les poêles à bois conventionnels, omniprésents auparavant disparurent pratiquement des villes et ne furent plus utilisés qu'en milieu rural où le bois de chauffage était considéré comme un combustible gratuit. La montée du coût de l'énergie à la fin de la décennie 1970 incita plusieurs citoyens à se tourner vers le chauffage au bois. Cependant la nécessité d'avoir à recharger souvent le poêle en combustible, surtout la nuit, rebutait plusieurs. On leur proposa alors les poêles à combustion lente.

4.2.1 Les poêles à combustion lente

Ces poêles à bois furent en vogue dans les années 1970 et 1980. On appréciait alors l'allongement du temps de combustion qu'ils procuraient. En effet, une bûche y mettait presque deux fois plus de temps à se consumer que dans un poêle conventionnel.

Ils fonctionnent sur le principe inverse des foyers de masse. C'est-à-dire qu'au lieu d'emmagasiner la chaleur produite par une oxygénation accélérée, ils stoppent brusquement cette phase et tombent en mode de pyrolyse à basse température, allongeant ainsi le cycle de combustion finale du bois. Ils y arrivent en coupant l'apport d'air au moment où l'oxydation s'accélère. Cet effet est accentué par l'ajout d'un

⁹ EPA (1998)

défecteur à l'entrée du tuyau à fumée afin de ralentir la sortie des sous-produits de combustion, ce qui diminue la pression négative dans le poêle et par conséquent l'appel d'air extérieur. La température de combustion s'abaissera alors sous le point d'ignition des produits volatils. En réalité, ils transforment les poêles en fabrique à charbon de bois. Ils émettent alors une chaleur moins intense mais concentrée en infra-rouges. Pour compenser la faible intensité de chaleur produite, on les choisissait surdimensionnés par rapport au besoin, compte tenu du volume de la pièce à chauffer. Ils devenaient alors de bons réservoirs de rayons infra-rouges, mais il fallait absolument couper l'apport d'air rapidement au début du cycle de combustion accélérée pour éviter la surchauffe de la pièce.

Cependant, comme ils ne brûlent pas des briquettes de charbon de bois, mais plutôt des bûches entières contenant encore beaucoup de cellulose, de lignine et autres produits organiques, ils émettent beaucoup de sous-produits de combustion non oxydés, le goudron entre autres qui deviendra du créosote en se condensant sur les parois froides du tuyau à fumée. Quant au carbone, faute d'oxygène, il se transformera en CO et en particules de suie. Une fumée visible, plus ou moins noirâtre sortira alors de la cheminée, causée par le passage de la combustion en mode carbonisation (*charring*).

La combustion « lente » allonge donc le temps de dégagement de radiation infra-rouge, mais au prix d'une forte augmentation des polluants tels les particules fines, les COV non brûlés et les HAP, en plus de causer du tort aux tuyaux à fumée en y faisant condenser le créosote.

Pendant les années 1990, on a assisté à une diminution généralisée des émissions provenant des sources locales telles les industries. Les poêles à combustion lente sont alors apparus comme une source résiduelle importante de poussières et fumées dans l'environnement, particulièrement dans les quartiers résidentiels autour des centres-villes où on retrouvait une forte densité d'utilisateurs. Une nouvelle génération de poêles à bois est alors apparue sur le marché combinant efficacité et durée de combustion tout en émettant moins de polluants dans l'air. Ce sont les poêles à combustion évoluée, souvent appelés poêles certifiés EPA.

4.2.2 Les poêles à combustion évoluée

À la fin des années 1980, l'EPA, l'équivalent du ministère fédéral de l'Environnement aux E.-U, a imposé des normes d'émissions à respecter aux fabricants de poêles à bois. Tous les poêles à bois vendus aux E-U. après 1990 avaient à respecter certains critères de performance en termes d'émission de particules fines (mesurées en g/hre de fonctionnement). L'exigence avait été prévue en deux temps. La phase I s'appliquait pour les poêles fabriqués entre 1988 et 1990, et la phase II, plus sévère, s'appliquait pour les poêles fabriqués entre 1990 et 1992.

À la suite de ces exigences, les fabricants ont modifié leurs poêles en appliquant aux poêles à bois certains des principes de combustion découverts lors de l'amélioration des appareils de chauffage à combustibles gazeux ou liquides. Deux catégories de nouveaux poêles ont fait leur apparition : les poêles sans convertisseurs catalytiques et les poêles à convertisseurs catalytiques.

4.2.2.1 Les poêles à combustion évoluée non catalytiques

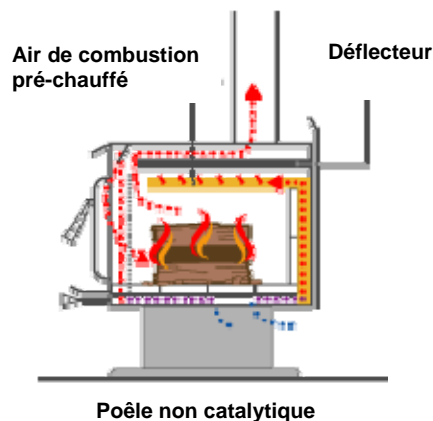
Ces poêles ont réussi à abaisser par un facteur de 3 à 10 le taux d'émission (en g/hre) des poêles à bois traditionnels en utilisant essentiellement deux principes : le pré-chauffage de l'air d'entrée pour l'oxygénation et l'ajout d'air de combustion au-dessus du brasier.

Le pré-chauffage de l'air est obtenu en faisant circuler l'air entre les parois (chaudes) du poêle avant qu'il n'atteigne le brasier et l'ajout d'air (pré-chauffé lui aussi) au-dessus des flammes se fait en ménageant une entrée d'air additionnelle dans les

parois du poêle spécialement dédiée à cette fin. Le pré-chauffage de l'air évite de refroidir la température de combustion et maintient donc la pyrolyse à haute température plus longtemps. L'ajout d'air secondaire au-dessus des flammes assure l'oxydation des gaz et sous-produits volatils provenant de la pyrolyse à moyenne ou haute température dans les bûches. C'est ce qu'on a appelé la combustion secondaire. Elle produit des flammes bleues typiques du fort dégagement thermique lors de l'oxydation des gaz et sous-produits les plus volatils. Les fortes températures atteintes aident à la pyrolyse d'un maximum de produits moins volatils dans les bûches (les goudrons), assurent leur combustion complète évitant ainsi la formation de créosote sur les parois plus froides du tuyau à fumée. La combustion secondaire des produits volatils permet donc de tirer plus de chaleur d'un même volume de bois tout en réduisant la pollution sortant de la cheminée. C'est pour cela qu'on prétend qu'ils réduisent la pollution en augmentant la performance des poêles conventionnels.

Comme les poêles à combustion lente, les appareils non catalytiques allongent le temps de combustion en restreignant l'entrée d'air d'apport et en diminuant le débit de sortie des sous-produits dans le tuyau à fumée. Cependant il faut leur assurer un minimum d'air d'apport car, contrairement à eux, ils ne fonctionnent bien qu'avec un feu vif atteignant si possible les 400 à 500° C, ce qui ne sera pas le cas si on coupe trop l'entrée d'air pour allonger le temps de combustion. Le schéma de la figure 5 illustre le fonctionnement de ces poêles

Figure 5 : poêle à combustion évoluée non catalytique



4.2.2.2 Les poêles à combustion évoluée catalytiques

Les poêles catalytiques exploitent le phénomène naturel de l'abaissement de la température d'ignition de certains sous-produits volatils lorsqu'on les met en présence de certaines substances inorganiques favorisant l'oxydation comme le palladium ou le platine. Ils ressemblent à ceux qu'on retrouve dans les automobiles. Pour accroître les surfaces de contact entre les gaz de combustion et le matériau servant de catalyseur on force les gaz non brûlés lors de la première étape de pyrolyse à passer à travers un « nid d'abeille » avant d'être évacué dans le tuyau à fumée. Ce passage à travers les nombreuses porosités du catalyseur se fait directement au-dessus des bûches, emmagasinant la chaleur de la combustion primaire. Le catalyseur est lui-même fait de céramique pour absorber davantage la température des bûches enflammées en dessous. Une seconde oxydation se produit alors pendant le passage dans le catalyseur, sans qu'il soit nécessaire d'ajouter de l'air supplémentaire, du simple fait que la température d'ignition des produits volatils a été abaissée de 475° C à 260° C environ, une température que les poêles à bois sont plus susceptibles de

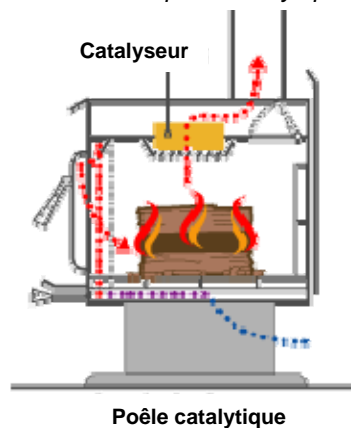
maintenir pendant longtemps que celles voisines de 500° C. La figure 6 illustre différents modèles de catalyseurs.

Figure 6 : exemples de catalyseurs pour poêles à bois



Comme ce principe ne peut être exploité sans qu'une forte chaleur n'ait été créée au préalable sous le catalyseur, on doit éviter de faire passer les sous-produits de combustion à travers le catalyseur au moment de l'ignition des bûches. C'est pourquoi une trappe de déviation a été ménagée dans le haut de la chambre à combustion afin d'évacuer les gaz directement dans le tuyau à fumée pendant l'allumage du feu ou la recharge du foyer en nouvelles bûches. Une fois la température de combustion parvenue à la pyrolyse des produits volatils, on ferme cette trappe et les gaz non brûlés passent alors par le catalyseur pour leur combustion secondaire, même si la température de pyrolyse s'abaisse graduellement. Comme pour les poêles à combustion évoluée non catalytiques, les manufacturiers ont prévu un préchauffage de l'air d'apport pour la combustion, ce qui aide à maintenir de hautes températures de pyrolyse dans la chambre à combustion. La figure 7 illustre schématiquement le fonctionnement du poêle à combustion évoluée catalytique.

Figure 7 : illustration du fonctionnement d'un poêle catalytique



Ces poêles atteignent des niveaux de performance similaires sinon plus élevés que les poêles à combustion évoluée non catalytiques lorsque le catalyseur est neuf. Peu à peu cependant leur performance se dégrade à cause de l'encrassement progressif des alvéoles du catalyseur, surtout si on brûle du combustible inadéquat, comme du bois humide, non fendu, des écorces de bouleau et autres matériaux dégageant beaucoup de suies ou de particules. Une mauvaise utilisation de la trappe de déviation en début de recharge de combustible peut également contribuer à l'encrassement du catalyseur. Heureusement ce catalyseur peut être nettoyé après

usage, mais il s'agit d'une opération techniquement plus complexe que le simple ramonage du tuyau à fumée, car il faut démonter la partie supérieure du poêle. Un écart important de température, feu très chaud suivi de feu froid, peut également faire fendre la céramique ou réduire son revêtement métallique, deux causes fréquentes d'une perte d'efficacité du catalyseur, qui ont normalement une durée de vie de plus de 12 000 heures (500 journées de 24 heures).

L'utilisation du poêle catalytique exige donc plus de connaissances techniques, de précautions lors des périodes d'allumage et de recharge en bûche de la part de l'utilisateur. Elle limite également le choix du combustible, qui se doit toujours être de la meilleure qualité possible (aucun bois trempé, glacé ou non fendu, ou non écorcé). Cela requiert un changement important dans les habitudes des utilisateurs de poêles à bois conventionnels, que peu d'entre eux sont prêts à faire. C'est ce qui fait que, avec les années, les poêles catalytiques se sont acquis une mauvaise réputation, davantage par la faute des utilisateurs qu'à cause de leur principe de fonctionnement. Ce sont en fait les rejets des poêles à combustion lente, car ils permettent de tirer avantage d'un faible apport d'air, qui allongera le temps de combustion, tout en palliant à son inconvénient, qui est de générer beaucoup de sous-produits mal oxydés dans le tuyau à fumée.

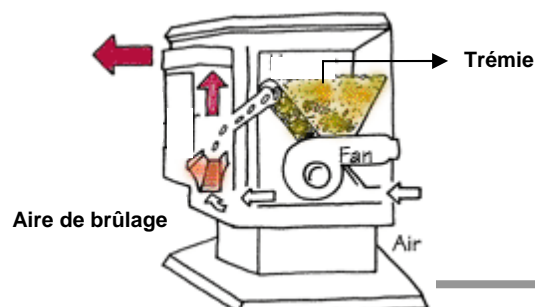
4.3 Les poêles à granules

Cette technologie, appliquée à des poêles domestiques, remonte au début des années 1990, comme les poêles à combustion évoluée. Les premiers appareils du genre présentaient des problèmes de durabilité à cause d'une usure prématurée des contrôles électroniques et des pièces mobiles. Ces problèmes ont été corrigés depuis. De plus, la piètre qualité de certains lots de granules entraînait la formation excessive de cendres. Les fabricants doivent maintenant se conformer à des normes sur la quantité de minéraux présente dans leurs produits, incluant les sels solubles de sodium qui corrodent le foyer à la longue.

Les poêles à granules représentent cas le plus complet de l'application des principes de combustion appliqués aux appareils de chauffage à combustible ligneux. Cela leur a permis d'atteindre des niveaux d'efficacité (en termes de BTU/hre) et une réduction des émissions de particules (en termes de grammes/mégajoule de chaleur) inégalés par les autres types d'appareil de chauffage au bois. À tel point que plusieurs modèles sont exemptés de la certification EPA.

La pulvérisation du combustible, l'alimentation continue et régulière en combustible, le contrôle de la qualité du combustible (humidité, proportion de carbone et hydrogène, de cendres, etc) et l'injection contrôlée d'air au point d'ignition ont permis de stabiliser le processus de pyrolyse dans cet appareil. De fait, il se rapproche beaucoup de la fournaise à l'huile, à cette exception près qu'il ne peut vaporiser aussi rapidement le combustible, laissant quand même un peu de carbone solide résiduel qui se transformera en suie. Le mode pyrolyse à basse température du carbone solide (formation de charbon de bois) n'existe pratiquement pas avec ce type de poêle. Il produit donc peu d'infra-rouge comparativement à un poêle à combustion lente ou à un poêle catalytique. L'illustration de la figure 7 montre une vue schématique de son fonctionnement.

Figure 8 : illustration du fonctionnement d'un poêle à granules



L'inconvénient majeur des poêles à granules, c'est qu'on ne peut aller bûcher son combustible derrière la maison. Il faut nécessairement l'acheter dans les magasins spécialisés et s'en tenir à ceux de bonne qualité. On en fabrique à partir du bois, mais aussi d'autres fibres végétales, telles le maïs. Pour le consommateur qui a accès à une source gratuite de bois de chauffage, l'utilisation d'un tel appareil représente une perte sèche, car non seulement il ne peut brûler son bois pour se chauffer plutôt que de le laisser pourrir sur place (et dégager des gaz à effet de serre), mais en plus il doit acheter le combustible, lequel revient presque aussi cher que le gaz ou l'électricité.

4.4 Les fournaies à bois à chauffage central

Contrairement aux poêles à bois, conçus pour chauffer, par radiation, uniquement la pièce où on les a installés, les fournaies sont utilisables pour chauffer plusieurs pièces séparées dans les maisons, en y transportant la chaleur par tuyauterie. Conçues pour dégager une bonne quantité de chaleur, elles sont généralement plus volumineuse qu'un poêle, sans parler de l'espace occupé par la tuyauterie ou les conduits pour le transport de la chaleur.

La plupart sont conçues pour chauffer une bouilloire dont on fait circuler l'eau chaude à travers une série de tuyaux et de radiateurs dispersés aux quatre coins de la maison. Cette catégorie de fournaies à chauffage central comprend habituellement deux parties : une chambre de combustion et un réservoir d'eau flanqué de tuyaux à eau. Les gaz de combustion chauds s'échappant de la chambre de combustion sont acheminés dans les tuyaux entourant le réservoir d'eau, chauffent l'eau en réchauffant les parois du réservoir, puis sont évacués dehors par le tuyau à fumée. Certains modèles prévoient un deuxième passage des gaz de combustion autour de la chambre de combustion (où ils sont réchauffés à nouveau), suivi d'un deuxième passage autour du réservoir d'eau avant l'évacuation par le tuyau à fumée. Ces fournaies sont habituellement munies d'un thermostat qui commande un ventilateur soufflant de l'air dans la chambre de combustion. Quand l'eau de la bouilloire n'est plus assez chaude, le ventilateur démarre, attisant les flammes dans la chambre de combustion jusqu'à ce que la température de l'eau de la bouilloire atteigne le niveau requis. Une fois ce niveau atteint, le ventilateur s'arrête et l'entrée d'air se referme. Habituellement, on les charge de bonnes brassées de bois (18 à 30 kg) qui durent une dizaine d'heures chacune. Il existe aussi des versions à air forcé de ce type de fournaies. Ces dernières fonctionnent en réchauffant l'air dans une chambre chaude (au lieu d'un réservoir d'eau). Cet air est ensuite soufflé par un ventilateur dans des conduits le faisant circuler un peu partout dans la maison.

Ces fournaies peuvent être alimentées par des bûches de bois ou par des copeaux de bois et même par des granules. Celles alimentées par des copeaux ou des granules émettent moins de particules dans l'air, toutes proportions gardées. Les fournaies à chauffage central à l'eau chaude peuvent aussi être installées dehors. Il s'agit d'un cas particulier dont nous parlerons dans la prochaine sous-section.

4.4.1 Les fournaies de chauffage central extérieures (dehors)

Ces fournaies représentent une alternative pour les propriétaires qui n'ont pas l'espace requis pour installer une grosse fournaie centrale. Elles sont parfois utilisées pour chauffer plusieurs bâtiments en même temps, particulièrement à la campagne où elles peuvent servir simultanément au chauffage de la maison et des bâtiments de ferme. Elles fonctionnent sur le même principe que les fournaies à bois avec réservoir d'eau chaude, sauf que l'eau de la bouilloire effectue une partie de son trajet dehors (sous terre) avant de circuler dans les bâtiments.

Le problème qu'on rencontre souvent avec ce genre d'installations, c'est la quantité impressionnante de fumées qui s'en dégage. Ce problème vient du fait qu'il est difficile de maintenir des températures très élevées dans la chambre à combustion, une partie de cette chaleur étant prélevée pour chauffer l'eau, alors qu'elles sont dehors à des

températures ambiantes sous le point de congélation. Cela se produit particulièrement pendant le début du cycle de ré-ouverture de l'admission d'air quand la fournaise doit être ré-oxygénée après l'abaissement trop important de la température de l'eau dans la bouilloire. Des goudrons non brûlés se sont formés auparavant pendant le cycle de combustion à volet d'entrée d'air fermés et ce sont eux qui se mettent à flamber lorsque le ventilateur force beaucoup d'oxygène dans la chambre de combustion pour activer la combustion. Le problème se résorbe au fur et à mesure que le cycle d'oxydation accélérée progresse et que la température augmente au point de pouvoir décomposer complètement les goudrons. Le dégagement d'intenses fumées grises ou noires cette période de transition est d'autant plus important que le cycle de pyrolyse à basse température (feu couvant) a eu une longue durée. C'est ce qui se produit lorsqu'on s'équipe d'une fournaise surdimensionnée pour ses besoins en chauffage ou lorsqu'on les utilise par temps doux, en été par exemple où les besoins en chauffage sont plus restreints. Ce qui prolonge le cycle de combustion appauvrie en oxygène et favorise la formation de goudrons.

Ce problème est accentué si, comme c'est souvent le cas, on bourre ces fournaises de bois non fendu et humide, dans le but d'allonger la combustion (et de diminuer le nombre de recharges quotidiennes en combustible). Ajoutons à cela que la faible hauteur de la cheminée ne favorise pas la dilution de la fumée, du moins à proximité de la source.

Figure 9 : exemple d'une installation de chauffage central extérieur¹⁰



Bref, ce genre d'installation convient uniquement en milieu rural, avec des voisins très éloignés et ne devrait en principe pas être utilisé comme simple chauffe-eau en été.

5. Mythes les plus répandus sur le chauffage au bois

5.1 Le poêle à bois peut facilement servir de source de chauffage principal pour une maison

Les poêles à bois sont conçus pour chauffer, par radiation, la pièce dans laquelle on les installe. Tenter de chauffer toute sa maison avec un poêle à bois représente un défi non négligeable. Premièrement, on sera d'abord porté à s'équiper d'un poêle dégageant une quantité de chaleur trop importante pour les besoins de la pièce où on l'installe. Ce qui amènera un surchauffement de cette pièce avec tout l'inconfort que cela comporte. Deuxièmement, on ne peut transporter facilement la chaleur radiante d'une pièce à une autre. La chaleur radiante est celle emmagasinée par l'enveloppe (la carcasse) du poêle et ré-émise ensuite dans la pièce vers des corps noirs, ceux qui peuvent absorber les rayons infra-rouges (l'être humain fait partie des corps noirs). Troisièmement, pour éviter de se lever la nuit pour raviver le feu, on aura tendance à raccourcir le cycle de combustion accélérée, nécessaire à l'évaporation et à la combustion des goudrons, pour passer trop rapidement au cycle de charbon de bois, les

¹⁰ Tiré de Woodheat.org : <http://woodheat.org/technology/outboiler.htm>

fameuses « braises qui durent toute la nuit », particulièrement abondantes si on utilise un bois très dense. On aura alors dans le poêle une bonne réserve de polluants qui sortiront lentement par la cheminée. Dans ces conditions, oui, on pourra chauffer toute sa maison avec un poêle à bois, mais au double prix d'un inconfort et d'une pollution atmosphérique.

Si on a bien compris les principes évoqués dans cette brochure, on se servira plutôt du chauffage au bois comme chauffage d'appoint, réservé pour une des pièces principales de la maison. Si on veut absolument chauffer toute la maison avec le bois, on optera alors pour une fournaise centrale au bois.

5.2 On ne devrait utiliser que des bois durs pour le chauffage

La plupart des experts sur le chauffage au bois s'entendent sur le fait que le facteur primordial affectant l'efficacité de combustion (et l'émissions de sous-produits indésirables), c'est le taux d'humidité du bois, bien avant l'espèce qu'on sélectionne. Il est certain que les bois plus denses contiennent plus de matière combustible par bûche et peuvent donc produire une chaleur plus importante et surtout plus durable, mais ils sont aussi plus difficiles à enflammer (au-delà de la température d'ignition) et plus longs à faire sécher. Les bois mous résineux contiennent un plus grand potentiel de goudrons (notamment à cause de la quantité importante de lignine qu'on y retrouve). Mais ils sèchent plus rapidement et dégagent beaucoup de chaleur si on arrive à brûler les goudrons à haute température. On doit donc éviter les feux pauvres en oxygène et les basses températures de combustion lorsqu'on les utilise. Ils sont excellents pour débiter un feu et faciliter l'ignition des espèces plus denses et moins résineuses si on peut combiner l'utilisation à la fois de bois durs et de bois mous dans un même poêle.

L'importance d'utiliser du bois le plus sec possible est bien illustré par l'exemple suivant. Depuis quelques années, on retrouve sur le marché des « bûches artificielles ». Celles-ci se divisent en deux grands groupes : les bûches de sciures de bois mêlées de paraffine et les bûches de bois densifiées. Ces bûches ont l'avantage de contenir très peu d'humidité et donc il n'y a pas de perte d'énergie pour l'évaporation de l'eau comme dans le cas du bois de chauffage traditionnel. Leur efficacité énergétique est telle que l'on conseille de ne pas utiliser les bûches paraffinées dans des poêles fermés qui risquent de ne pas supporter les dizaines de milliers de BTU qu'elles génèrent. On doit les réserver pour des âtres ouverts et n'en brûler qu'une à la fois. Par contre les bûches de bois densifiées, composées de sciures de bois retenues ensemble par leur seul contenu en lignine, peuvent être utilisées dans des poêles fermés. Toutes autres choses étant égales, les deux types de bûches polluent moins que le bois naturel car elles brûlent à plus haute température, réduisant ainsi les sous-produits de combustion. Du point de vue écologique, elles permettent de ré-utiliser un produit qui autrement serait un déchet (les sciures de bois). Par contre leur production peut générer des gaz à effet de serre, ce qui n'a pas empêché Environnement Canada de décerner un ÉcoLogo au fabricant de l'Écolog.

5.3 Il suffit de s'équiper d'un poêle certifié EPA pour ne pas polluer

De nos jours, la plupart des fabricants de poêle doivent avoir la certification EPA. Mais ça ne règle pas entièrement le problème des émissions polluantes. En effet, la certification EPA se fait dans des conditions bien précises, souvent peu représentatives des conditions réelles chez la plupart des utilisateurs. C'est un peu comme les tests de consommation de carburant pour les voitures. Tous les concessionnaires automobiles vous diront que votre consommation réelle dépendra de votre style de conduite. Il y a toujours moyen de consommer pas mal d'essence, même avec une auto peu gourmande. De même, avec les poêles certifiés EPA, il y a toujours moyen de polluer quand même beaucoup.

Mentionnons simplement que les essais de brûlage pour la certification EPA sont faits avec des madriers de 2" x 4" de pin Douglas avec un espace d'air de 1,5 " autour de chaque morceau de bois, dans des conditions de tirage bien définies (par exemple, une cheminée de 15 pieds de hauteur). En général, les manufacturiers s'organisent pour que leurs produits procurent la

meilleure performance possible dans les conditions d'utilisation fixées par l'EPA. Ces conditions ne sont pas représentatives de celles de la plupart des utilisateurs.

Aussi, même avec un poêle certifié, il faut utiliser du bois de qualité, c'est-à-dire, fendu, séché pendant au moins un an à l'abri de la pluie et avec le moins d'écorce possible. Il faut aussi savoir respecter les conditions requises pour rendre gazeux les combustibles volatils, au détriment si nécessaire de la durée de combustion en mode charbon de bois. On ne doit pas prendre pour acquis que l'on vient au monde avec un talent pour chauffer une fournaise à bois. On doit se vérifier fréquemment avec de petits test simples qu'on peut faire chez soi, comme de regarder la couleur et la densité de sa fumée à différents stades de combustion et selon différents chargements de la fournaise. Une bonne combustion ne devrait pas produire beaucoup de fumée visible. Mais la première mesure à prendre sera toujours de bien isoler sa maison pour réduire sa consommation de bois de chauffage.

5.4 Le chauffage au bois n'est pas écologique et devrait être autorisé uniquement là où aucune autre forme de combustible n'est disponible

Du point de vue de la propreté de ses émissions, le chauffage au bois sera toujours une forme de combustion désavantagée par rapport à ses concurrents les plus rapprochés que sont le mazout et le gaz naturel¹¹. Comme on l'a vu dans l'exposé des principes de combustion, plus un combustible peut rapidement passer à l'état gazeux, moins il risque de générer des sous-produits de combustion incomplète. Or le bois est un combustible solide et ses constituants oxydables passent plus difficilement que le mazout ou le gaz naturel à l'état gazeux. De sorte que, à coût égal, la plupart des gens vont préférer le mazout ou le gaz naturel. La seule façon pour le bois de conserver un avantage, c'est d'être plus économique que ses concurrents.

Ceci peut être le cas si on a une terre à bois à proximité de chez soi et qu'on peut transporter, entreposer et sécher le bois à faible coût (à la condition de ne pas inclure le coût de main-d'œuvre dans le calcul). Cependant, pour diminuer la pollution causée par le chauffage au bois, il faut disposer d'un appareil de chauffage performant et d'un système d'évacuation des gaz sécuritaire. Ce qui représente souvent une dépense importante pour les utilisateurs du chauffage au bois, laquelle pourra leur faire perdre une partie des économies réalisées en chauffant au bois.

Or les fabricants d'appareils de chauffage au bois pourraient théoriquement améliorer de beaucoup la performance environnementale de leurs produits, bien au-delà des exigences EPA actuelles en fait. Mais le coût des appareils augmenterait beaucoup et leur installation, leur entretien et même leur utilisation deviendrait si complexe qu'elle devrait être supervisée par des professionnels qu'il faudrait rémunérer chaque année. Ce qui découragerait beaucoup de clients potentiels pour le chauffage au bois. Ce n'est donc pas demain la veille qu'on verra apparaître sur le marché des poêles à bois qui pourront rivaliser vraiment avec le chauffage au mazout ou au gaz naturel en termes d'émissions.

C'est pourquoi, nous croyons que le chauffage au bois devrait être restreint dans les zones urbaines. Ce qui ne devrait pas représenter un gros inconvénient car le chauffage au bois n'est pas très rentable en milieu urbain. Dans ce type d'environnement, il pourrait être réservé à des usages esthétiques, pour créer une ambiance campagnarde et chaleureuse à quelques reprises au cours de l'hiver. L'utilisation de bûches artificielles (en bois densifié par exemple) pourrait réduire l'émission de polluants durant ces périodes. Car si on a plusieurs utilisateurs du chauffage au bois comme chauffage d'appoint ou même principal concentrés dans un pâté de maisons d'un quartier résidentiel, on risque fort de causer des torts à la santé de ses voisins, notamment les asthmatiques. Minimale, on causera une nuisance à cause de la fumée dense qui peut parfois pénétrer dans la maison du voisin, même les fenêtres fermées. L'odorat

¹¹ L'hydroélectricité n'est même pas mentionnée ici car elle n'émet aucun sous-produit de combustion. Elle devance donc toutes les autres formes d'énergie en termes de polluants émis.

semble particulièrement sensible à la fumée de bois, qu'il peut détecter à très faible concentration. Cette odeur est très désagréable lorsqu'on doit la subir à cause d'un voisin peu soucieux de son entourage.

Ceci dit, le chauffage au bois ne doit pas être mis au rancart comme un vestige d'une autre époque. Ainsi, en milieu rural ou carrément forestier, la faible densité de population ne justifie probablement pas de restrictions au chauffage au bois, même dans des conditions d'utilisation non optimales. De plus, le contexte actuel de la lutte aux changements climatiques pourrait fort bien changer la donne en milieu urbain. D'une part, le coût des combustibles fossiles risque de grimper en flèche d'ici quelques années, surtout si on lui ajoute une taxe proportionnelle à son action négative sur l'environnement. D'autre part, parmi les divers moyens de lutte aux changements climatiques, l'utilisation de la biomasse comme combustible de remplacement pourrait éventuellement occuper une place importante. En effet, l'utilisation de la biomasse produit un bilan d'émissions de gaz à effet de serre théoriquement plus favorable que les combustibles fossiles.

Si ces hypothèses se vérifient, le bois ou ses dérivés pourrait alors redevenir une alternative de choix, notamment dans les régions boisées comme la nôtre. Nul doute alors que des technologies exploitant davantage les principes de base de la combustion pourront être considérées suffisamment rentables pour inciter le consommateur à investir dans un appareil très performant et à payer un prix plus élevé pour obtenir un combustible solide plus facile à oxyder.

Bref, le chauffage au bois est là pour rester. À nous de prouver qu'on peut continuer à utiliser cette richesse produite par notre environnement pour améliorer nos conditions de vie plutôt que pour les détériorer.

Bibliographie

North American Manufacturing comp., North American Combustion Handbook, North Amer. Manufact. co. éditeur, Cleveland, 1986

BALLARD-TREMEER, Grant, *Emissions of Rural Wood-Burning Cooking Devices*, thesis submitted to the Faculty of Engineering, [University of the Witwatersrand](http://www.witwatersrand.ac.za), Johannesburg, 1997

CHEREMISNOFF PN, 1992, *Waste Incineration Handbook*, Butterworth-Heinemann, Oxford.

SHAFIZADEH F, 1981, *Basic Principles of Direct Combustion, in Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels*, Sofer S.S, Zaborsky O.R, (Eds), Plenum Publishing Corporation, New York : 103-124.

WOOD HEAT ORGANIZATION INC. [En ligne], 2007. [<http://www.woodheat.org>]

Environmental Protection Agency (EPA), Residential Wood Combustion Technology Review, vol 1, Technical Report, Omni Environmental Services inc., EPA-600/R-98-174a, 1998

WOOSTOCK SOAPSTONE COMPANY. *Catalytic combustor tips*, [En ligne]. [<http://www.woodstove.com/pages/combustortips.html>]