

Chauffage au bois et pollution aux particules en Île-de-France

Rapport de diagnostic

Rapport commandé par la
Direction Interministérielle à la Transformation publique



www.innovation-comportementale.fr 

01.80.52.13.61 

info@innovation-comportementale.fr 

L'Agence d'Innovation Comportementale est un groupement d'intérêt économique rassemblant l'École Normale Supérieure, Sciences-Po Paris, l'École d'économie de Paris et le CEPREMAP.

Cette étude a été conduite sous la direction de Coralie Chevallier et Élise Huillery, avec la participation de Rita Abdel Sater, Jeanne Bollée, Juliette Bénon et Mathieu Perona.

Rapport rédigé par Rita Abdel Sater et Mathieu Perona, sous la direction de Coralie Chevallier et Élise Huillery.

Agence d'Innovation Comportementale et Direction Interministérielle à la Transformation publique, tous droits réservés.

Juin 2019

Résumé exécutif

En bref Le chauffage au bois est responsable d'approximativement un tiers des émissions de particules fines en Île-de-France. La DRIEE a retenu la réduction de ces émissions comme l'objectif de cette expérimentation. À l'appui de ce choix, nous démontrons que le chauffage au bois, en particulier dans des équipements anciens, a un effet significatif sur les concentrations de particules fines dans l'air intérieur, entraînant des effets délétères sur la santé des utilisateurs. En Île-de-France, l'agrément représente 36 % des utilisations du chauffage au bois, et le chauffage d'appoint une moitié supplémentaire – ces utilisations recourant souvent à des équipements anciens et ouverts. Cet usage s'accompagne d'une perception faussée du chauffage au bois, considéré comme peu polluant.

Faire évoluer les comportements en matière de consommation d'énergie constitue un des champs d'action de référence pour les approches comportementales. Un nombre respectable d'expérimentations ont été conduites, articulées essentiellement autour de la mise à disposition d'informations sur la consommation individuelle, et sa mise en perspective par rapport à un groupe avec lequel la personne pouvait s'identifier (voisins, ménages comparables). Si à notre connaissance aucune intervention de ce type n'a été conduite dans le domaine de l'utilisation du bois de chauffage, plusieurs interventions ont mobilisé, avec succès, les effets sur la santé de la consommation d'énergie afin d'inciter à des comportements plus économes. En termes de politiques publiques, les actions actuellement déployées visent essentiellement au renouvellement des équipements dans des contextes où le chauffage au bois constitue le mode de chauffage principal. Toutefois, des campagnes d'informations ont été réalisées sur les conséquences du chauffage au bois en termes de pollution et de santé. Notre schéma d'intervention reprend ainsi des éléments déjà éprouvés dans des champs proches, mais ici dans une combinaison nouvelle.

Si nous mettons de côté les contraintes financières, qui ne font pas l'objet du présent travail, les principaux obstacles comportementaux aux changements d'usages sont l'image positive du chauffage au bois et la sensation de savoir comment bien faire un feu. Nous pensons pouvoir agir sur le premier obstacle en réduisant l'image positive du feu de bois au travers d'un cadrage sur ses effets sur la santé, accompagné d'une présentation en termes de gains plutôt que de risques, et renforcé par des messages s'appuyant sur les normes sociales. L'objectif principal sera de réduire la fréquence d'utilisation du chauffage au bois, mais sans écarter des améliorations des pratiques d'utilisations ou l'incitation au changement des équipements de chauffe vers des dispositifs moins polluants.

Opérationnellement, mesurer objectivement l'évolution des comportements d'utilisation

(a minima la fréquence) requiert d'équiper une sélection de ménages utilisateurs du chauffage au bois de capteurs de pollution, qui pourraient également être utilisés pour personnaliser l'information restituée. La nécessité de simplifier au maximum l'installation et d'éviter de perturber les comportements par une information en direct nous fait sélectionner un capteur initialement conçu pour les mesures en mobilité, discret et autonome en termes de communication.

Sommaire

Résumé exécutif	3
Sommaire	5
Contexte : un mode de chauffage capable du meilleur... comme du pire	6
Une qualité de l'air préoccupante	6
La position complexe du chauffage au bois	9
Chauffage au bois et pollution intérieure	11
État des lieux du chauffage au bois en Île-de-France	14
Politiques publiques du chauffage au bois	16
Approche comportementale	25
Interventions comportementales comparables	25
Une perception faussée du chauffage au bois	32
Comportements sur lesquels agir	33
Leviers comportementaux	34
Levier 1 : Diminuer l'image positive du chauffage au bois	34
Levier 2 : Utiliser un cadrage axé sur la santé	35
Levier 3 : Utiliser les normes sociales	35
Conclusions opérationnelles	37
Chauffage au bois et pollution de l'air	37
Usage du chauffage au bois en Île-de-France	37
Utilisation de capteurs de pollution	38
Bibliographie	41

Contexte : un mode de chauffage capable du meilleur... comme du pire

En bref : l'Île-de-France doit faire rapidement des efforts pour réduire ses émissions de particules fines, le niveau moyen de particules restant pour 85% des habitants au-dessus du niveau conseillé par l'Organisation Mondiale pour la Santé. Le chauffage au bois constitue la deuxième source d'émissions en air extérieur, et contribue par ailleurs significativement à la pollution de l'air intérieur. Parmi les quelques 800 000 ménages utilisant le chauffage au bois en Île-de-France, un gros tiers le font par pur agrément, et une moitié comme chauffage d'appoint. Ils disposent souvent d'équipements ouverts ou anciens, par conséquent peu efficaces et fortement polluants. Il semble donc possible d'alerter ces populations sur leur contribution à la pollution de l'air dans leur logement afin d'induire des changements de comportement sans que cela implique pour eux d'arbitrages budgétaires difficiles.

La Direction régionale et interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie (DRIEE) Île-de-France a identifié le chauffage au bois comme un secteur propice à la mobilisation des agences comportementales pour réduire la pollution liée à un usage impropre du bois de chauffage. Elle a sollicité pour ce faire l'appui de la Direction Interministérielle à la Transformation Publique (DITP). Cette dernière a fait appel à l'Agence d'Innovation Comportementale pour soumettre une proposition d'accompagnement comportemental.

Une qualité de l'air préoccupante

La forte médiatisation des pics de pollution en Île-de-France ces dernières années a donné un relief particulier à la question de la qualité de l'air, et contribué à la remise en cause de la place du diesel dans le parc automobile. Si plusieurs évolutions, dont des solutions ponctuelles comme la circulation alternée, ont permis de réduire la fréquence des pics hivernaux de pollution aux particules fines, le niveau d'exposition quotidienne des Franciliens à la pollution atmosphérique reste préoccupant. Ainsi, la Commission Européenne a saisi la Cour de Justice européenne (CJUE) pour examiner la possibilité de sanction à l'égard de la France pour son inaction face à la pollution au dioxyde d'azote (NO₂), et a déclaré son intention de faire de même si la France ne démontre pas une action suffisante pour réduire la pollution aux particules PM₁₀ (voir encadré).

Au-delà des dépassements ponctuels des seuils d'alerte pour le NO₂ ou les PM₁₀, la très grande majorité des Franciliens sont exposés à des niveaux de pollution néfastes pour leur santé. Dans son *Bilan de la qualité de l'air 2018*¹, Airparif constate que près de 85 % des Franciliens, soit environ 10 millions de personnes, sont exposés à des concentrations moyennes en particules fines (PM_{2.5}) supérieures aux normes de l'OMS. La situation s'est dégradée sur ce point depuis 2007.

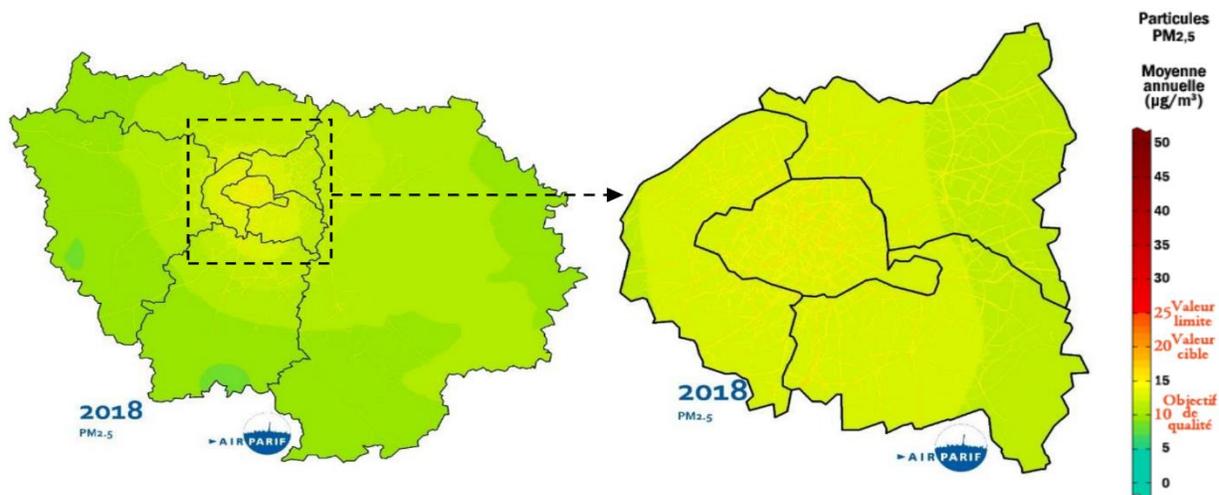


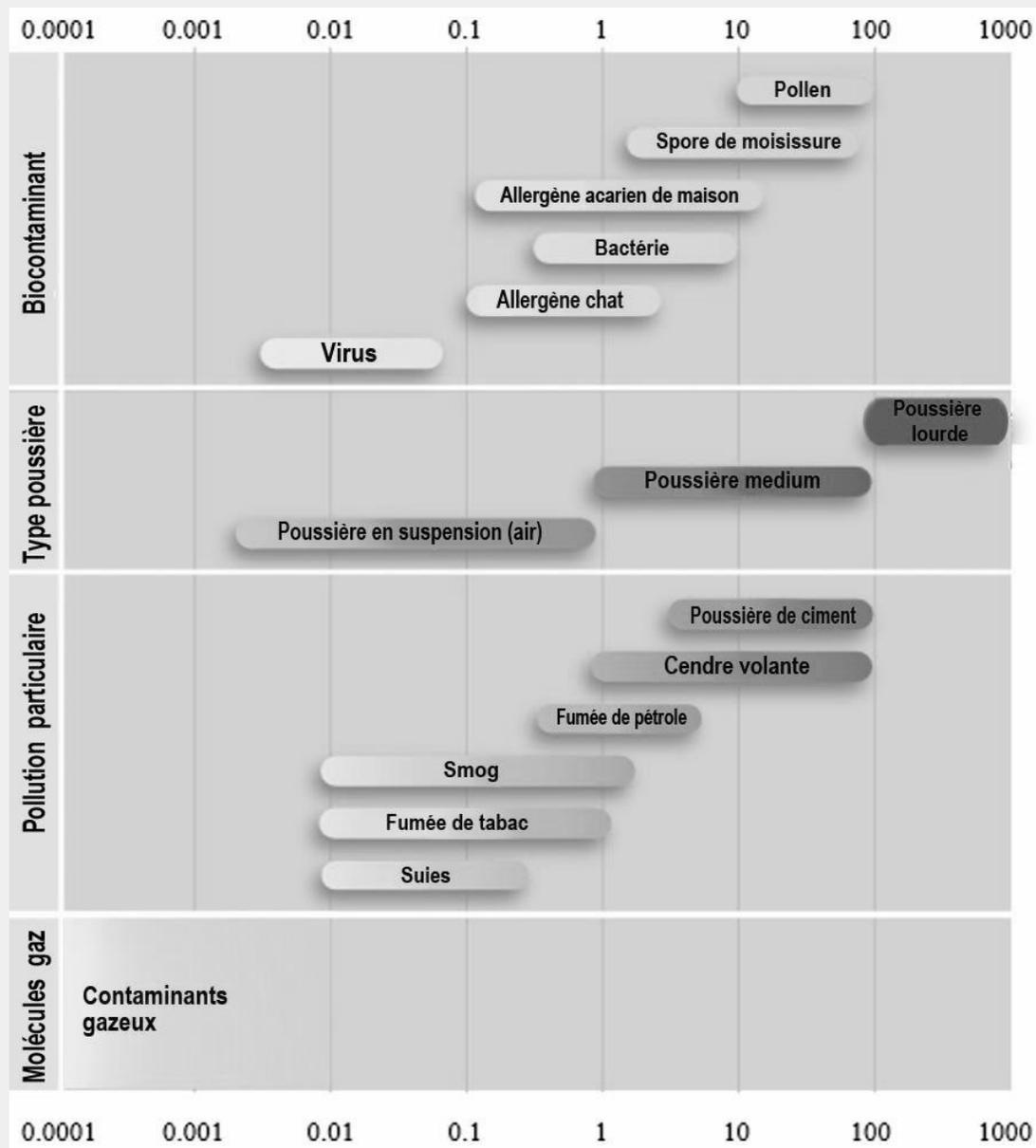
Figure 13 : concentrations moyennes annuelles de particules fines $PM_{2.5}$ en 2018 en Île-de-France et zoom sur Paris et la petite couronne parisienne

Concentrations moyennes annuelles de particules fines $PM_{2.5}$ en 2018 en Île-de-France et zoom sur Paris et la petite couronne parisienne - Source : Airparif, Bilan de la qualité de l'air 2018, p. 21

Les particules

Les particules sont des petits agrégats de matière suffisamment légers pour rester relativement longtemps en suspension dans l'air ambiant. Elles proviennent de l'activité naturelle (pollens) et humaine (combustion, pneus, plaquettes de freins, poussière de travaux, etc.). Elles ont une taille inférieure à 10 micromètres ($10\ \mu\text{m}$), d'où l'acronyme PM_{10} pour les désigner. Parmi ces particules, on distingue usuellement :

- Les particules fines d'une taille inférieure à $2,5\ \mu\text{m}$: les $PM_{2.5}$
- Les particules très fines, d'une taille inférieure à $1\ \mu\text{m}$: les PM_1
- Les particules ultrafines, d'une taille inférieure à $0,1\ \mu\text{m}$: mes $PM_{0.1}$, qu'on appelle aussi nanoparticules



Particules par type et par taille, adapté de Lamiot — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59147824>

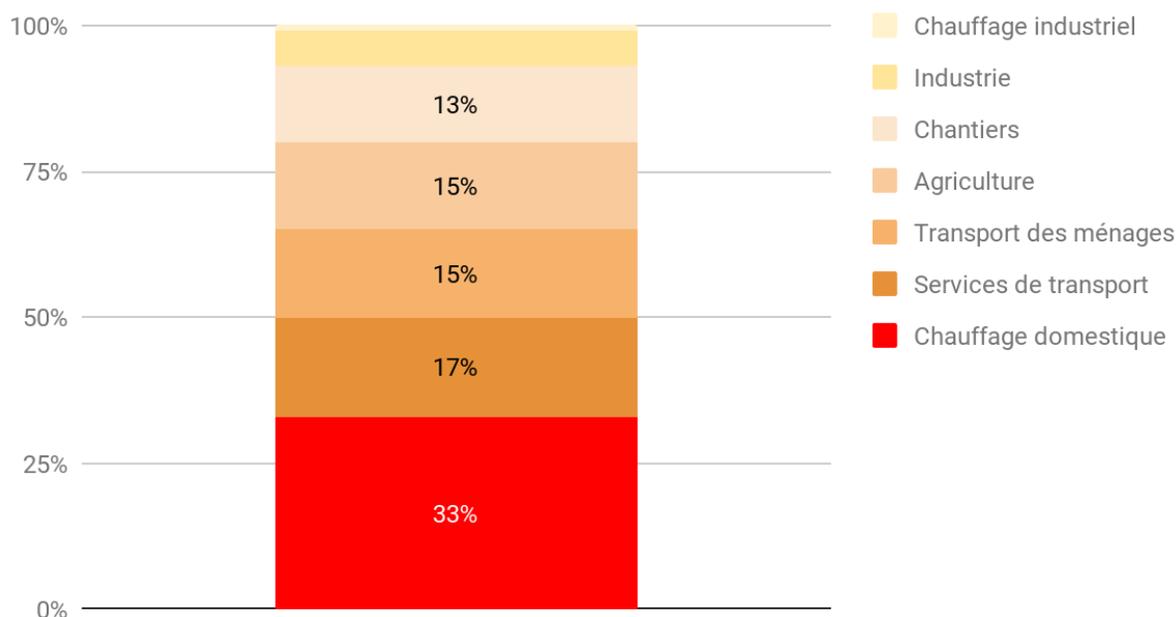
En termes d'impact sur la santé, les particules fines (PM_{2.5}) sont assez petites pour venir se loger dans les alvéoles pulmonaires, entraînant des risques accrus de cancer. En France, Santé Publique France ² a estimé que les particules fines étaient responsables d'environ 48 000 décès prématurés en France chaque année. De nombreuses agglomérations, dont l'agglomération parisienne, ne respectent pas la norme de l'OMS d'exposition (10 µg/cm³), alors que le respect de cette norme permettrait d'éviter environ 17 000 décès prématurés.

Les conséquences des particules très fines et ultrafines, qui parviennent à traverser les barrières entourant les cellules, sont plus mal connues, mais elles sont soupçonnées d'être toxiques pour le corps du seul fait de leur taille, à quoi viennent s'ajouter les effets de certains de leurs composants (métaux lourds, voire radioactifs pour les particules issues de la combustion de charbon de mine).

La position complexe du chauffage au bois

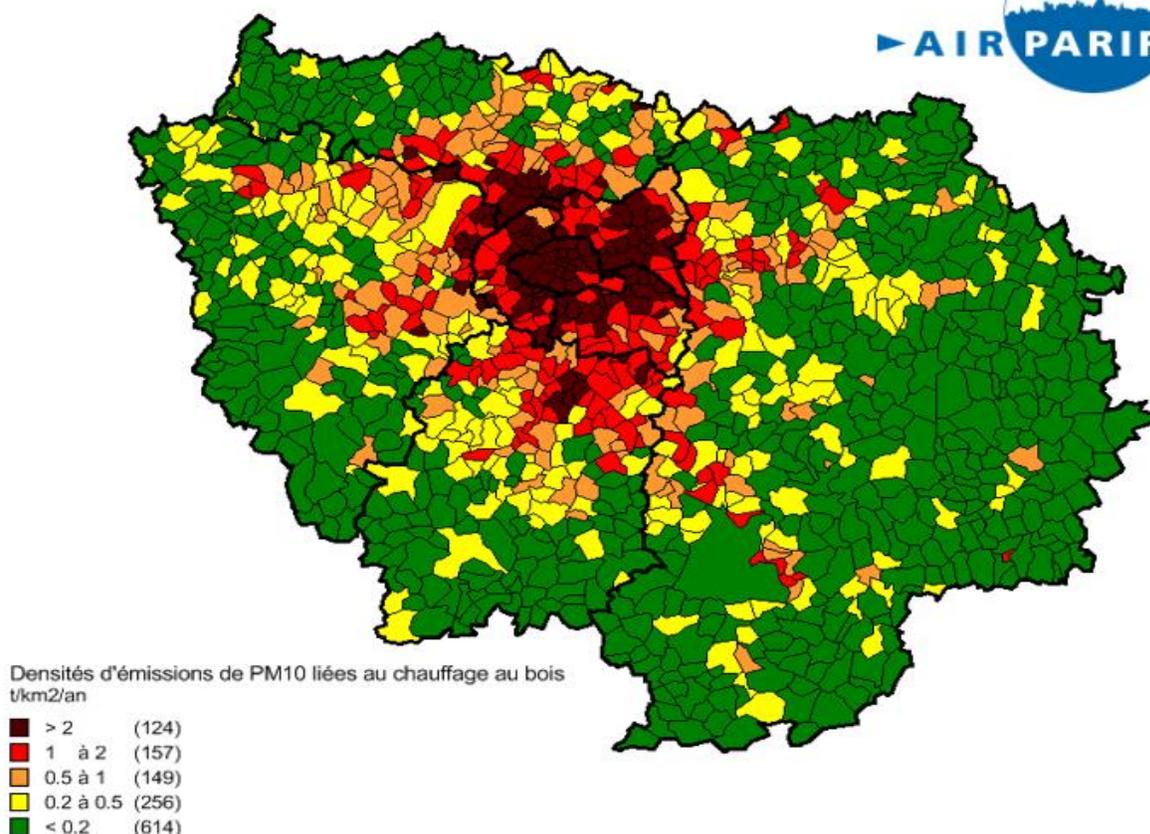
Le chauffage domestique constitue la première source d'émission de PM₁₀ en Île-de-France, avec 33% des émissions, dont la majeure partie (87%, soit 29% des émissions totales) proviennent du chauffage au bois. Ce dernier constitue donc une source de pollution aux particules comparable à la circulation automobile. À titre de comparaison, Airparif estime qu'une après-midi de chauffage dans une cheminée ouverte émet autant de particules qu'un véhicule diesel faisant un aller-retour entre Paris et Marseille.

Sources d'émissions de particules PM₁₀ en Île-de-France



L'impact de ces émissions est particulièrement important à Paris intra-muros et dans la zone sensible qui regroupe approximativement la première couronne. En effet, si le chauffage au bois est nettement moins fréquent à Paris que lorsqu'on s'éloigne du centre de l'agglomération, la densité y est beaucoup plus forte, et les équipements généralement plus anciens et plus fortement émetteurs. Les cheminées ouvertes, nettement plus fréquentes à Paris, représentent à elles seules la moitié³ des émissions de PM₁₀ dues au chauffage au bois.

Densités communales d'émissions primaires de PM₁₀ liées au chauffage au bois en Ile-de-France - 2014



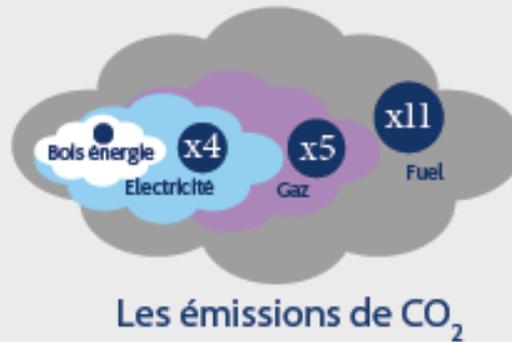
Densités communales d'émissions primaires de PM₁₀ liées au chauffage au bois en Île-de-France, 2014 - Source Air-Parif

Pour autant, l'usage du bois comme moyen de chauffage doit rester une des options dans la transition énergétique et la lutte contre le réchauffement climatique. La forte contribution du chauffage au bois dans les émissions de particules doit être mise en regard de deux éléments fondamentaux, résumés par l'infographie ci-dessous de la [Direction régionale et interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie Île-de-France](#) :

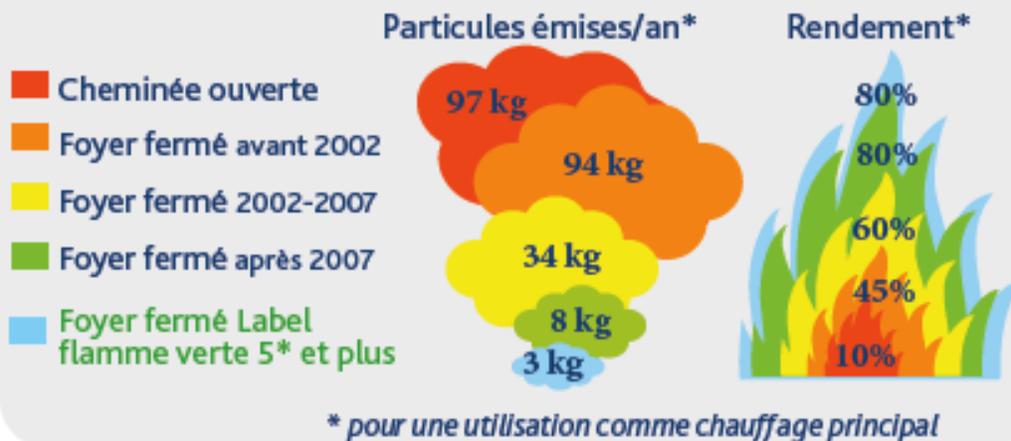
1. Le bois énergie constitue une source d'énergie particulièrement peu émettrice de CO₂ (gaz à effet de serre) en France, du fait d'une gestion responsable des forêts d'où proviennent l'essentiel de l'approvisionnement en bois ;
2. Le taux d'émission (et aussi le rendement) varie d'un facteur 1 à 30 selon le type d'appareil de chauffage utilisé, son degré d'entretien, la qualité du bois brûlé et les méthodes d'allumage et d'extinction.
3. Le bois de chauffage constitue également une des sources de chaleur les moins coûteuses pour l'utilisateur. Il permet également un suivi aisé de la consommation et un achat au moment où la personne a des moyens disponibles. Cette dimension économique est fondamentale dans une perspective de lutte contre la précarité énergétique.

L'impact du bois sur l'environnement

Les émissions de CO₂ du bois énergie sont inférieures aux autres sources d'énergie...



... mais tous les chauffages ne se valent pas



Dans une perspective de transition énergétique et de réduction de l'usage d'hydrocarbures fortement émetteurs de CO₂ et non-renouvelables, le bois doit constituer une alternative possible, en particulier pour les équipements les moins émetteurs (chaudières à granulés, grands équipements de chauffage urbain) en ce qui concerne le chauffage principal, et pour les équipements individuels les plus récents bien utilisés et approvisionnés en bois de qualité (choix des essences et séchage sont particulièrement déterminants).

Chauffage au bois et pollution intérieure

Si certaines pratiques de chauffage au bois ont un impact important sur la pollution de l'air extérieur, cet impact se fait également sentir à l'intérieur même du logement de ses utilisateurs.

Au début des années 1980, la contribution du chauffage au bois à la pollution de l'air intérieur était une question ouverte ainsi, un article académique ⁴, cité par le rapport joint du Ministère de l'écologie et de l'ADEME ⁵ de 2008, posait explicitement cette question. Depuis, la multiplication études et expériences, ainsi que la baisse du coût des capteurs ont permis de mettre en évidence une contribution significative des appareils de chauffage au bois sur une vaste gamme de polluants de l'air intérieur. Le rapport de l'ADEME précédemment cité ainsi que le rapport sur le même thème établi cinq ans plus tard par l'*Environmental Protection Agency* aux États-Unis ⁶ soulignent la concordance des études sur ce point.

Du domaine de la recherche académique et des agences de protection de l'environnement, ces résultats passent aux institutions locales de santé, qui émettent des mises en garde, à l'image de celle publiée par l'Observatoire régional de la santé en Île-de-France ⁷. Ces synthèses destinées à un public plus large ont trouvé un écho significatif, d'abord dans la presse spécialisée, comme *Le Journal de l'environnement* ⁸, puis dans la presse généraliste, à l'image du récent article à ce sujet dans *Le Figaro* ⁹.

Que dit la recherche ?

Depuis la synthèse effectuée pour le Ministère de l'écologie et l'ADEME ⁵, les travaux de recherche sur les émissions de polluants de l'air intérieur s'est beaucoup concentrée sur les pays en développement, où le caractère rudimentaire des foyers et l'usage du charbon rend le problème plus aigu. Des travaux ont toutefois été menés dans les pays de l'OCDE, même s'ils restent trop rares, comme le soulignent les deux récents articles de recherche ^{10,11}. Ces travaux viennent toutefois confirmer la contribution significative du chauffage au bois aux polluants de l'air intérieur, et donnent des éléments complémentaires sur le degré d'émission des différents dispositifs de chauffage.

Comme le faisait déjà l'étude réalisée en France par des chercheurs de l'[Institut National de l'environnement industriel et des risques](#) (INERIS) et du [Centre scientifique et technique du bâtiment](#) (CSTB) ¹², des mesures récentes ¹⁰ mettent en évidence des écarts importants dans les taux de polluants mesurés dans l'air intérieur en fonction du type d'équipement, les foyers ouverts étant très nettement plus émetteurs que les autres types d'équipement.

Sur un pas de temps plus fin, il est possible de mettre en relation des pics d'émissions intérieures très visibles au moment de l'allumage de poêles fermés, et aussi des pics détectables lors du rechargement de l'appareil ¹³. De manière complémentaire, une étude sur les équipements réputés les plus propres que sont les chaudières à granulés ¹¹ démontre que même ces équipements génèrent des émissions de particules significatives et durables lors des opérations de nettoyage, lorsque celles-ci ne sont pas effectuées par des équipements professionnels.

La principale limitation de la littérature académique existante est que les études portent sur un faible nombre de ménages observés (typiquement moins d'une dizaine, une vingtaine dans les études les plus larges). Cette limitation découle du fait que l'essentiel de cette littérature s'intéresse à la comparaison entre les concentrations mesurées dans les expériences et les normes d'exposition définies par les autorités sanitaires nationales et internationales. Pour ce faire, les études doivent donc recourir à des équipements de mesure onéreux et encombrants, car calibrés avec une extrême précision pour détecter et comptabiliser un grand nombre de polluants. Par ailleurs, les micro-capteurs de pollution sont des équipements récents et moins précis, ce qui explique le peu d'expériences publiées qui y ont recours.

Dans le domaine de la recherche en santé publique, les risques posés par l'exposition aux particules fines du fait du chauffage au bois sont bien identifiés. Un article publié par une revue médicale spécialisée ¹⁴ propose ainsi une méta-analyse de 36 articles portant sur le sujet dans les pays développés (cette méta-analyse exclut 67 articles portant sur les pays émergents). Cette revue met en évidence une association entre les pathologies respiratoires chez les enfants et le recours au chauffage au bois, avec la limitation que dans la plupart des cas, la mesure de l'utilisation du bois repose sur l'auto-déclaration.

À notre connaissance, une seule étude publiée ¹⁵ mobilise des micro-capteurs. Les chercheurs participant à cette étude combinent mesure par des capteurs et auto-déclaration de l'utilisation de chauffage au bois. L'échantillon reste faible (26 ménages) et sur une durée limitée (sept jours), mais l'étude met en évidence un niveau de fond des PM_{2.5} deux fois plus élevés dans les ménages utilisant des poêles anciens par rapport aux utilisateurs de poêles récents.

Notre appréciation de cette littérature peut sembler différer de celle de publiée dans les actes du colloque PRIMEQUAL d'août 2018 par Nicolas et Le Dreff ¹⁶. Dans la présentation de leur projet, ces auteurs estiment en effet que l'utilisation du chauffage au bois n'a pas d'effet statistiquement significatif sur les concentrations de particules fines dans l'air intérieur, mais, dans le même temps, que les émissions des foyers ouverts sont plus importantes (de manière significative) que celles des foyers fermés. Ces deux perspectives peuvent être réconciliées si l'on comprend que les auteurs affirment qu'il n'existe pas de différence significative entre ménages utilisateurs et non-utilisateurs de chauffage au bois (les sources de particules fines dans l'air intérieur étant multiples) mais qu'il existe des différences significatives parmi les ménages utilisateurs de chauffage au bois entre foyers ouverts et foyers fermés. C'est cette dernière différence, dite *within*, qui nous intéresse pour le présent projet.

État des lieux du chauffage au bois en Île-de-France

Les équipements de chauffage au bois ne faisant pas l'objet d'un enregistrement administratif, l'évaluation de leur nombre et de leur utilisation repose sur des sondages. Pour le présent travail, nous nous appuyons sur le rapport ¹⁷ établi par BVA pour le compte de l'ADEME. Sur la base d'un échantillon représentatif de 1 406 personnes, l'institut de sondage BVA a procédé à une enquête complémentaire (sur-échantillonnage) pour identifier 675 ménages utilisateurs du chauffage au bois et résidant en Île-de-France. Les éléments qui suivent se fondent sur cet échantillon.

Volumétrie et type d'équipement

Sur la base de l'échantillon représentatif de départ, BVA estime à 16% la part de ménages franciliens qui utilisent le chauffage au bois (environ 798 000 ménages), dont quasi-totalité (14% de l'ensemble) brûlent des bûches. Sur cet ensemble, 9% (449 000 ménages) utilisent des foyer ouverts, 3,7% (185 000 ménages) des foyers fermés datant d'avant 2002, installés dans des maisons individuelles.

	Principal	Appoint	Agrément
Proportion des utilisateurs par type d'utilisation			
En part des utilisateurs	17%	23% (régulier) 24% (exceptionnel)	36%
Type d'utilisation par catégorie d'équipement			
Insert ou cheminée à foyer fermé	56%	55%	36%
Cheminée ouverte	15%	32%	53%
Poêle à bois	28%	19%	10%

Source : enquête ADEME-BVA ¹⁷. Nous surlignons en orange les groupes d'utilisateurs qui pourraient a priori modifier le plus facilement leur comportement d'utilisation afin de limiter les émissions.

Les utilisateurs de foyers ouverts ou fermés anciens présentent une proportion plus forte de personnes de plus de 50 ans. Il s'agit plus souvent de personnes issues de classes sociales aisées et de retraités, propriétaires de leur maison individuelle, avec des revenus plus élevés que la moyenne.

Types et fréquence d'utilisation

Parmi l'ensemble des utilisateurs de bois de chauffage, la très grande majorité (83%) l'utilise comme mode de chauffage d'appoint ou d'agrément. Dans le détail, 36% des utilisateurs ont un usage uniquement d'agrément (soit environ 251 000 ménages), 24% l'utilisent comme chauffage

d'appoint occasionnel, 23% comme chauffage d'appoint régulier et 17% comme chauffage principal. Ce seraient au total environ 419 000 ménages en Île-de-France qui pourraient limiter ou arrêter leur utilisation du chauffage au bois sans modifier fortement leurs habitudes de chauffage.

Parmi les utilisateurs d'agrément, 55% ont une cheminée à foyer ouvert, et 36% une cheminée à foyer fermé ou un insert : les poêles à bois sont minoritaires (10%). Ces proportions sont de 32%, 55% et 28% respectivement chez les ménages où le bois est un chauffage d'appoint : un tiers d'entre eux utilisent ainsi des foyers ouverts. Nous avons vu plus haut que ces foyers sont à la fois peu efficaces énergétiquement et les plus gros émetteurs de particules.

Les foyers déclarant un usage d'agrément ont dit avoir utilisé leur feu en moyenne 48 jours sur la saison de chauffe précédente (2013 - 2014) à comparer avec 66 jours lorsqu'il s'agit d'un mode de chauffage occasionnel et 106 jours lorsqu'il s'agit du chauffage principal. Compte tenu de la plus mauvaise qualité des équipements utilisés en agrément et du fait que les pics d'émission sont au moment de l'allumage et de l'extinction, on peut penser que la contribution à la pollution d'ensemble de l'usage d'agrément ou occasionnel est significative.

Au niveau des pratiques d'utilisation, seuls 25% des utilisateurs d'Île-de-France déclarent un temps de séchage supérieur ou égal à 2 ans, ce qui conduit probablement à la combustion d'un bois encore trop humide, d'autant plus que les utilisateurs avouent ne pas vraiment savoir comment bien évaluer le degré de séchage du bois. De même, les bonnes pratiques en termes d'allumage, de rechargement et d'extinction semblent encore peu répandues.

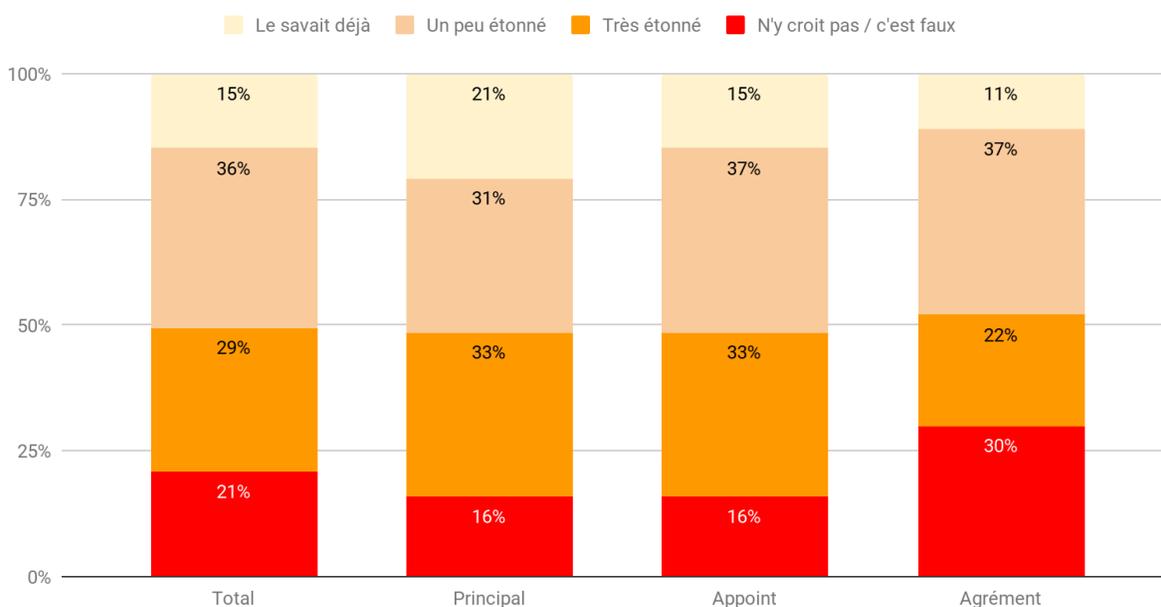
Perception de la pollution de l'air

Comme le rappelle le rapport, l'enquête a eu lieu dans un contexte (en 2014) où Ségolène Royal, alors Ministre de l'environnement, avait envisagé une interdiction du chauffage au bois en Île-de-France, mesure effectivement proposée par la préfecture de Paris. Face à la vivacité des réactions, la mesure avait été finalement annulée, mais le débat avait donné lieu à un certain nombre de mises au point, comme celle effectuée le 09 décembre 2014 dans *Le Monde*¹⁸, qui ont probablement contribué à sensibiliser les usagers du bois à leur contribution à la pollution de l'air extérieur. Pour autant, seuls 21% des utilisateurs d'agrément estiment que le chauffage au bois a un impact sur la qualité de l'air à l'intérieur de leur logement, proportion qui tombe à 16% lorsqu'il s'agit de la qualité de l'air extérieur.

L'apport d'une information sur la contribution du chauffage au bois heurte ces préconceptions, avec 30% des usagers d'agrément qui, exposés à l'idée que le chauffage au bois représente 25% des émissions de particules fines en Île-de-France, n'accordent aucun crédit à cette information. En cas d'interdiction, 48% des utilisateurs d'agrément se déclareraient par ailleurs disposés à ne pas la respecter.

Réaction à l'information sur la pollution

Le chauffage au bois est à l'origine de 25% des émissions de particules néfastes à l'environnement et à la santé, soit la même proportion que le secteur des transports



Source : enquête ADEME-BVA ¹⁷.

La santé personnelle et celle de leurs proches est toutefois le principal motif déclaré qui pourrait inciter les utilisateurs d'agrément à changer leurs équipements, ce motif venant en deuxième position derrière les économies potentielles pour les utilisateurs occasionnels et réguliers

Politiques publiques du chauffage au bois

Le chauffage au bois constitue un enjeu majeur de santé publique en raison de sa contribution importante à la pollution aux particules fines. Aux États-Unis, l'*Environmental Protection Agency* (EPA) coordonne un programme [Burn Wise](#) destiné à promouvoir les actions de réduction des émissions. L'EPA a également publié une synthèse ⁶ des actions entreprises au niveau des États et autorités locales. Pour les États-Unis dans leur ensemble, l'EPA estime que 65 % des foyers sont des équipements anciens et peu efficaces, et que leur remplacement par des équipements récents et efficaces générerait des gains de santé publique évalués entre 56 et 156 milliards de dollars par an sur la base des seules émissions de PM_{2.5}.

Sur un plan plus général, le sujet a également attiré l'attention de l'Organisation mondiale de la santé, qui a publié un rapport dédié aux pollutions engendrées par la combustion de charbon et de bois pour le chauffage domestique en Europe et en Amérique du Nord ¹⁹. Ces actions se déploient dans un contexte similaire à celui de l'Île-de-France : le chauffage au bois est présenté par des programmes publics comme une solution de chauffage renouvelable et écologique, l'alternative étant le charbon ainsi que l'électricité provenant plus souvent qu'en France de centrales à charbon.

Génériquement, les programmes publics sont orientés essentiellement sur l'adoption de bonnes pratiques (campagnes d'information essentiellement) et sur l'incitation au renouvellement des équipements. Ainsi, dans son dossier consacré aux impacts du chauffage au bois sur la qualité de l'air ²⁰, l'INERIS indique que le remplacement des équipements constitue l'action prioritaire. Le chauffage au bois y est envisagé essentiellement en tant que mode de chauffage principal. Selon l'enquête ADEME/BVA ¹⁷, l'utilisation du bois en chauffage principal concerne 51% des utilisateurs du chauffage au bois nationalement, contre seulement 17% en Île-de-France, ce qui contribue à expliquer le décalage entre la focalisation de l'INERIS et celle de ce projet.

Réglementation directe

Le périmètre de notre intervention repose sur l'approche comportementale, et exclut donc *a priori* les outils de nature réglementaire (interdictions, autorisations, etc.). Cependant, cette gamme de dispositifs est riche d'enseignements sur la manière dont peuvent être déployés des programmes d'informations (afin d'emporter l'adhésion aux réglementations introduites) ainsi que sur les éventuels obstacles comportementaux à l'évolution des pratiques. Nous les incluons donc dans ce rapport de diagnostic.

Le choix de recourir au bois comme mode de chauffage étant fait indépendamment par chaque ménage, le rapport relève que le succès de programmes réglementaires dépend de l'adhésion des citoyens, ce qui suppose :

- Des capacités de contrôle et de sanction ;
- Une source d'information fiable et reconnue sur les niveaux prédits (un rôle que pourrait jouer AirParif pour l'Île-de-France) ;
- Des campagnes d'information et d'éducation du public portant sur la contribution du chauffage au bois à la pollution.

Restrictions d'usage

Aux États-Unis, plusieurs collectivités ont mis en place des restrictions échelonnées en fonction du niveau de pollution ambiant et du type d'équipement. Typique de ce type de programmes, celui mis en place à [Sacramento](#) définit :

1. Un seuil d'information, à $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, où les utilisateurs peuvent réduire volontairement leur utilisation.
2. Un premier seuil d'alerte, lorsque la concentration prévue dépasse $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$, au-delà duquel le chauffage au bois est interdit sauf pour les foyers dont c'est le mode de chauffage principal et pour les équipements certifiés à faibles émissions.

3. Un second seuil d'alerte, lorsque la concentration prévue dépasse les $35\mu\text{g}/\text{m}^3$, au-delà duquel seuls les foyers dont c'est le mode de chauffage principal ou en difficulté financière sont autorisés à brûler.

Alternativement, certaines collectivités ([l'État de Washington](#), par exemple) ont introduit des valeurs limites d'opacité de la fumée ou d'émissions visibles durant certaines périodes de l'année. Les foyers à faibles émissions ne génèrent en effet pas de panaches de fumée importants ou opaques. Dans le même état, l'autorité locale de Puget Sound a distribué aux ménages des détecteurs d'humidité du bois, interdisant en parallèle la combustion de bois dépassant 25% d'humidité, et plusieurs zones interdisent la vente de bois dont le taux d'humidité est supérieur à 20%.

En France, l'arrêté inter-préfectoral du 25 mars 2013 relatif à la mise en œuvre du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) révisé pour l'Île de France prévoyait l'entrée en vigueur, au 1er janvier 2015, de dispositions renforçant l'encadrement de la combustion individuelle du bois à Paris et dans la zone sensible pour la qualité de l'air en Île-de-France. Cette mesure interdisant les foyers ouverts quel que soit l'usage a suscité de nombreuses oppositions. L'approche réglementaire est ainsi apparue comme inadaptée au regard de la culture collective sur le chauffage individuel au bois et le contexte économique d'un mode de chauffage particulièrement peu onéreux par rapport à d'autres sources de chauffage. La Ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie a alors donné instruction de supprimer les dispositions réglementaires applicables au 1er janvier 2015, au profit d'une approche incitative, fondée en particulier sur les aides déjà en place pour la conversion des appareils individuels de combustion du bois anciens (Crédit d'Impôt Transition Énergétique, Certificats d'Économie d'Énergie) et des aides annoncées lors de la conférence environnementale de novembre 2014.

Une interdiction partielle a été instaurée par l'arrêté inter-préfectoral du 31 janvier 2018 approuvant le Plan de protection de l'atmosphère ²¹ introduit des restrictions d'utilisation, résumées dans la figure ci-dessous. L'interdiction porte en particulier sur les équipements peu performants utilisés en chauffage principal, écartant de l'interdiction l'usage d'appoint ou d'agrément.



Réglementation applicable à la combustion individuelle du bois en Ile-de-France

		Paris	zone sensible (hors Paris) (1)	hors zone sensible
FOYERS OUVERTS	→ chauffage principal →	interdit	interdit	interdit
	→ chauffage d'appoint ou agrément →	autorisé	autorisé	autorisé
EQUIPEMENTS EXISTANTS A FOYER FERME	→ chauffage principal →	poussières ≤ 16 mg/m ³ (2)	autorisé	autorisé
	→ chauffage d'appoint ou agrément →	rendement ≥ 65%	autorisé	autorisé
FOYERS FERMES NEUFS	→ chauffage principal →	poussières ≤ 16 mg/m ³ (2)	Flamme Verte 5* (3)	autorisé
	→ chauffage d'appoint ou agrément →	Flamme Verte 5* (3)	Flamme Verte 5* (3)	autorisé

(1) la liste des communes de la zone sensible est annexée à l'arrêté inter-préfectoral du 31/01/2018

(2) mesure à 13% d'oxygène

(3) ou rendement ≥ 70% et taux de CO ≤ 0,12% (à 13% d'oxygène)

Sur le plan de la fourniture de bois, les échanges avec Baptiste Lorenzi (DRIEE Île-de-France) ont établi que le secteur de l'approvisionnement en bois était très émietté en Île-de-France, avec une part très sensible de très petits acteurs et d'auto-approvisionnement. Nous avons donc écarté l'idée d'actions fondées sur la mesure de l'humidité du bois, qui nécessiteraient une mobilisation de cette filière pour être efficace. Pour les mêmes raisons, nous avons écarté l'idée de mobiliser les professionnels de l'entretien des équipements (ramoneurs), contrairement à ce qui a été possible dans d'autres régions où la profession est beaucoup plus fortement concentrée et structurée.

Restrictions sur les équipements

En termes d'équipements, plusieurs collectivités aux États-Unis imposent l'enlèvement ou la neutralisation des foyers non-certifiés à faible émission lors de la revente d'un logement, ou interdisent la vente et l'installation d'équipements dont les émissions sont supérieures à un niveau donné de certification. Certains requièrent un permis d'utilisation pour tout équipement de chauffage au bois, et utilisent le repérage des fumées pour identifier les ménages en contravention. Ces mesures s'accompagnent d'aides à l'acquisition d'équipement neufs, selon un modèle similaire au Fonds Air Bois, à la différence qu'ils reposent plus souvent sur la distribution de bons (*vouchers*), évitant ainsi de contraindre les ménages à avancer l'intégralité du coût de remplacement.

Programmes volontaires de remplacement des équipements

En dépit de mesures incitatives comparables au Fonds Air Bois, le taux de remplacement vers des équipements à faibles émissions reste limité aux États-Unis. L'EPA l'estime à 24 000 unités par an, pour 7,8 millions d'équipements à remplacer (0,3% du stock). Plusieurs programmes à cet effet sont décrits dans le rapport de l'EPA ⁶ complétés par des programmes fondés sur des crédits d'impôts.

Quelles évaluations d'impact ?

Une récente revue des interventions, publiée par l'organisme de référence en santé publique Cochrane ²⁴ relève sept évaluations d'interventions ciblant spécifiquement la pollution résidentielle (intérieure ou extérieure). Cependant, les résultats sont faibles en raison du petit nombre d'études, de dispositifs d'évaluation hétérogènes, et d'un lien probablement trop ténu entre l'effet possible des interventions et la variable de résultat choisie (les hospitalisations pour des affections respiratoires).

Par ailleurs, une étude ²⁵ met en évidence une diminution de 71% des PM_{2.5} mesurées en moyenne dans le logement (et 76% pour la concentration maximale) suite à un changement d'équipement. Une autre étude conduite auprès d'un échantillon beaucoup plus large de 1100 foyers a mesuré une réduction de 30% des PM_{2.5} dans l'air ambiant suite à un programme de changement des foyers, avec une grande hétérogénéité entre les ménages ²⁶. Les chercheurs obtiennent toutefois des effets significatifs sur la santé respiratoire des enfants, y compris les enfants non spécifiquement à risque (asthme) et les enfants vivant dans les habitations au voisinage des ménages ayant changé leurs foyers. La même équipe a ensuite ²⁷ confirmé la très grande variabilité des impacts entre foyers. Par ailleurs, une troisième intervention suivie par la même équipe ²⁸ et décrite dans comparait les résultats d'un programme de changement d'équipements à un programme d'installation de filtres à air sur les équipements existants.

La revue de l'OMS ajoute, sur la base de 12 programmes de changement d'équipement au Canada, que les programmes de changement volontaire ont des effets limités, en raison de l'évolution des technologies des foyers : un équipement en bas de la fourchette d'éligibilité d'un programme de remplacement représente un gain limité en émissions, alors qu'il va rester en service pendant plusieurs décennies ¹⁹. Ce rapport préconise de combiner les programmes de changement avec une forme de contrainte réglementaire sur les émissions.

Programmes d'information

L'EPA dispose d'un programme complet, [Burn Wise](#), qui couvre une gamme complète de supports : site web, livrets, brochures, dépliants, vidéos, comptes sur les médias sociaux, clips radio et de télévision, etc. Ci-dessous, la première page de leur recueil de messages destinés aux réseaux sociaux. On voit comment cette agence mobilise différents leviers comportementaux selon les messages : **risques pour la santé, aversion à la perte, conseils pratiques immédiats.**



SOCIAL MEDIA



Use social media to share these safety and health tips throughout the burn season. Simply cut and paste or modify to create your own. Or, link to the EPA Burn Wise **Facebook** and **Twitter** pages, where we post tips throughout the season.



Thinking about starting up your wood stove? EPA's Burn Wise program can help you "learn before you burn." Watch this award-winning video and look at the tips online for burning the right wood, the right way, in the right wood-burning appliance. <http://www.youtube.com/watch?v=Ev4XogvRbME>



Starting up your wood stove or fireplace? Learn from someone else's mistakes in this video: <http://www.youtube.com/watch?v=Ev4XogvRbME>



Watery eyes, stuffy nose or chest tightness? All of these are symptoms of an occasional winter cold, but they may actually be due to breathing wood smoke. Learn more to better protect your health. <https://www.epa.gov/burnwise/wood-smoke-and-your-health>



Watery eyes, stuffy nose, tight chest? Symptoms may be from breathing wood smoke: <https://www.epa.gov/burnwise/wood-smoke-and-your-health>



Do you know if your firewood is dry enough to burn efficiently? There's a simple way to find out. For around \$20 you can buy a moisture meter. Dry wood burns hotter, and hotter fires provide more heat and are smokeless-- ultimately saving you time, energy and money. This video shows how to use a moisture meter: <http://www.youtube.com/watch?v=jM2WGgRcnm0>



Is your wood dry enough to burn? Dry wood creates a hotter fire, saving wood, time & money. <http://www.youtube.com/watch?v=jM2WGgRcnm0>



True or False: You shouldn't burn ocean driftwood. The answer is True! Burning saltwater driftwood, treated lumber and garbage can damage your stove and cause serious health problems. <https://www.epa.gov/burnwise/burn-wise-best-burn-practices>



Avoid burning ocean driftwood, treated lumber & garbage. <https://www.epa.gov/burnwise/burn-wise-best-burn-practices>



What do two pieces of properly dried wood sound like when knocked against each other? They should sound hollow! EPA's Burn Wise program wants to remind you to burn only dry seasoned wood that burns hotter, cuts fuel consumption and reduces the amount of smoke your appliance produces. <https://www.epa.gov/burnwise/burn-wise-best-burn-practices>



Strike 2 pieces of firewood together. If dry enough to burn, they'll sound hollow. <https://www.epa.gov/burnwise/burn-wise-best-burn-practices>

En complément des programmes d'information directe, l'EPA agit avec les fournisseurs d'information sur la qualité de l'air (type AirParif) pour que les informations de qualité de l'air incluent des prévisions d'émissions de particules, et rappellent la contribution des feux de bois à ces émissions. Au niveau individuel, l'EPA a également proposé un calculateur d'émissions de pollutions et de gains attendus d'un changement d'équipement sur la consommation et la pollution.

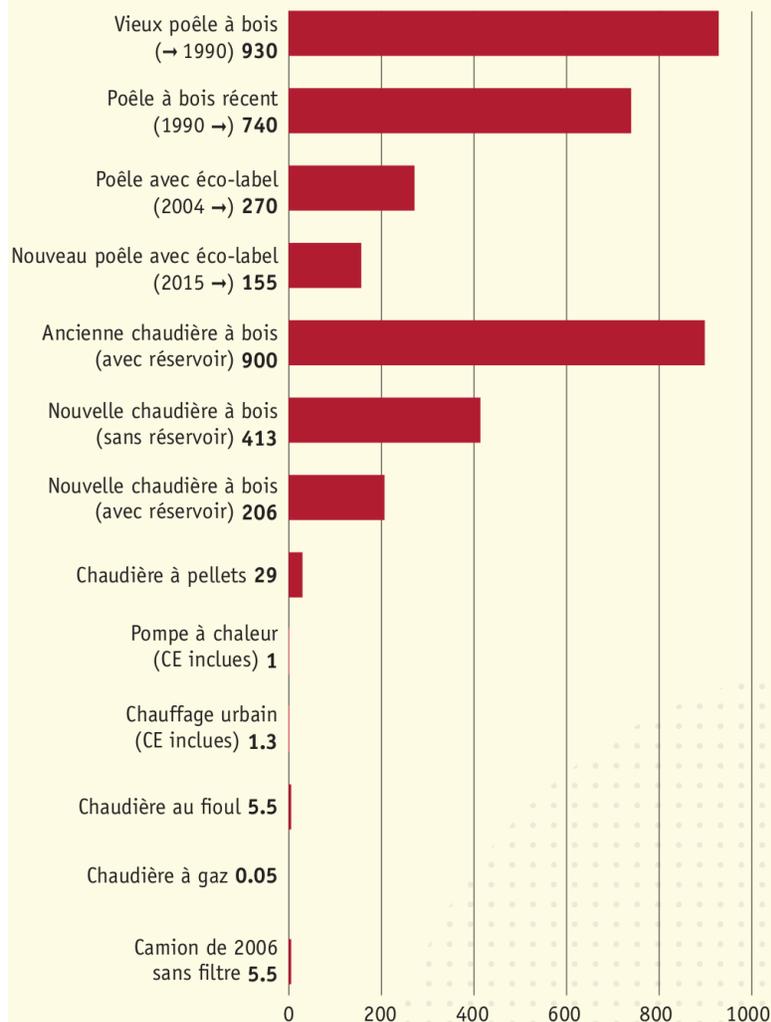
Le rapport de l'OMS ¹⁹ rappelle que l'impact des programmes d'information est incertain (peu d'évaluations) et probablement limité. En particulier, ils pointent le peu d'efficacité des programmes qui se contentent d'informer sur les risques sans traiter spécifiquement les affects positifs associés au feu de bois. Toutefois, ils relèvent également que les risques pour la santé personnelle (par opposition à la pollution générale) peuvent constituer de bons leviers pour initier des changements dans les comportements.

En Europe, les programmes d'information sont essentiellement menés par les gouvernements et collectivités publiques. Relevons cependant le projet [Clean Heat](#) des organisations *Deutsche Umwelthilfe* et *The Danish Ecological Council*, qui publient un éventail de brochures d'information, allant du [dépliant](#) en direction du grand public (extrait ci-dessous) à un rapport complet comportant des mesures effectuées dans des ménages danois, et des recommandations d'actions de politiques publiques ²².

Plusieurs actions ont également été conduites dans le cadre du programme [PRIMEQUAL](#), dont les premiers résultats ont été restitués le 25 septembre 2018 dans le cadre d'un colloque, dont les actes ont été publiés ²³. Le projet DECOMBIO a notamment mis en évidence la forte contribution du chauffage résidentiel, en particulier au bois, dans la pollution de l'air en vallée de l'Arve.

En l'Île-de-France, la DRIEE a mené des campagnes de communication soulignant à la fois les conséquences sur l'environnement et sur l'efficacité énergétique de l'usage d'équipements certifiés, de bois de chauffage de qualité et des bonnes pratiques d'utilisation. Ses guides pratiques couvrent largement les questions d'efficacité, d'installation et d'approvisionnement.

Émissions de particules ($PM_{2,5}$) provenant de sources de chaleur (Facteurs d'émission danois ; particules g pr. GJ énergie)



Les émissions de particules de différentes sources de chaleur. A titre de comparaison, l'émission d'un vieux camion est indiquée. Pour les chaudières les émissions sont indiquées dans le cas de chaudières avec ou sans réservoir. Les émissions de chauffage urbain et de pompes à chaleur incluent les émissions des centrales électriques (CE).

Un feu de bois peut sembler convivial mais son effet est nocif sur la santé.

Il n'est pas logique qu'une chaudière avec un éco-label soit autorisée à polluer 25 fois plus qu'un vieux camion de 10 ans.

Un axis expert externe : Larry Brockmann, EPA

Nous avons pris contact avec Larry Brockmann, *Residential Wood Smoke Team Lead* à l'EPA et point de contact pour le programme *Burn Wise*. Il travaille depuis quinze ans sur des actions de réduction de la pollution liée au bois de chauffage. À sa connaissance, il n'existe pas de fonds de connaissance établi sur les leviers comportementaux les plus efficaces pour modifier les pratiques de recours et d'utilisation du chauffage au bois. De son expérience, il tire que l'élément essentiel pour obtenir un changement de comportements en la matière est d'apporter une réponse claire à la question « qu'est-ce que j'y gagne ? ». Il relève trois domaines de réponse pour lesquels il a pu constater une efficacité (cités dans l'ordre ci-dessous) :

- La santé, avec des messages axés sur la réduction des risques (crises d'asthme en particulier) liés à la pollution émise ;
- La sécurité, en particulier les risques d'incendies liés au dépôt de suie (créosote de bois, aussi appelée « bistre » par les ramoneurs) dans les conduits ;
- Le gain financier lié à des équipements plus performants et des pratiques qui améliorent le rendement.

Pour lui, la communication fonctionne mieux si elle met en avant un bénéfice plutôt qu'un risque. Il nous indique également qu'un programme-pilote est en cours de définition à Fairbanks (Alaska), incluant des messages informés par les sciences comportementales. En l'état sont envisagés la distribution de magnets, un engagement volontaire (*pledge*), et une participation à une action à l'échelle de la communauté locale. Il sera évidemment intéressé de connaître le déroulement et les résultats de notre expérimentation.

Approche comportementale

Interventions comportementales comparables

En bref : Dans le domaine de l'économie d'énergie, de nombreuses interventions comportementales ont démontré l'efficacité de fournir du **feedback**, ou de l'information aux utilisateurs sur leur consommation et ses conséquences - un effet déjà mobilisé par des équipements grand public pour la pollution intérieure. La fréquence de cette information semble moins importante pour l'efficacité des interventions que la complémentarité entre les modes d'information et la mise en avant des comportements à adopter. Parmi ces actions, plusieurs ont adopté un **cadrage** sur les conséquences sur la santé, avec des effets sensibles et persistants.

Au cours de la dernière décennie, des études en économie et psychologie ont montré que les interventions comportementales constituent des leviers puissants pour modifier le comportement dans des domaines aussi divers que la santé, la sécurité routière et l'épargne retraite ²⁴. Ces interventions, qui n'impliquent pas de transfert d'argent, sont généralement peu coûteuses et préservent la liberté de choix des individus. Pour ces raisons, elles font l'objet d'un intérêt croissant de la part des décideurs politiques.

Feedback informationnel et économies d'énergie

Contrairement à de nombreux autres types de consommation, la consommation d'énergie n'est la plupart du temps pas visible pour les habitants des pays développés. Comme le niveau de consommation résulte en large part d'une multitude de micro-décisions quotidiennes (extinction d'appareils, réglage du chauffage, etc.), la puissance de la réglementation y est limitée aux décisions importantes et rares (normes de construction et de rénovation). Les approches comportementales ont ainsi été largement mobilisées pour agir sur les comportements individuels, au point que cette question fait l'objet d'un chapitre dédié dans le rapport de l'OCDE sur les interventions comportementales publiques ²⁵.

La plupart des interventions menées reposent sur la mise à disposition des usagers d'informations (*feedback* informationnel) sur leur consommation mises en forme de manière à induire un **changement de comportement** ou un **renforcement des comportements** visés. La multiplicité des choix et équipements limitent en effet la possibilité de déployer des interventions fondées sur un ordonnancement des options ou une modification du choix par défaut, en particulier dans notre cas. Cette section se concentre par conséquent sur les interventions mobilisant le **feedback informationnel** dans le domaine général de la consommation énergétique et de la préservation de l'environnement. Les interventions comportementales sur le sujet précis du chauffage au bois sont en effet trop rares pour constituer un corpus pertinent et suffisant. En outre, le *feedback* informationnel semble être une alternative (ou un complément) efficace aux interventions basées sur une hausse des tarifs de l'énergie²⁶.

Les interventions basées sur le feedback ont fait l'objet d'études expérimentales dans de nombreux pays développés, notamment aux États-Unis, au Canada, au Japon, en Australie et dans certains pays d'Europe occidentale (Pays-Bas, France, Danemark, Finlande et Royaume-Uni). La méta-analyse la plus complète sur l'effet du feedback informationnel sur la conservation de l'énergie porte sur 156 études conduites entre 1975 et 2012 ²⁷. Cette étude globale met en évidence une réduction moyenne de la consommation d'énergie de 7,4%. Une autre étude datant de 2015 révèle des résultats très similaires (diminution moyenne de 7,1%) en prenant en compte de 42 études expérimentales sélectionnées de manière plus stricte ²⁸.

Type de feedback

Nous pouvons distinguer deux types de feedback informationnel : le feedback direct et le feedback indirect ²⁹.

Le **feedback direct** est immédiatement accessible aux utilisateurs par le biais, par exemple, de compteurs intelligents dotés d'écrans d'affichage ou d'applications téléphoniques qui permettent aux ménages de suivre en continu leur consommation. Comme nous le montrons plus loin, cet outil est largement mobilisé par les capteurs individuels de pollution destinés aux particuliers, dont la plupart comporte des écrans ou des lumières colorées donnant une évaluation en temps quasi-réel du niveau de pollution. Des équipements similaires existent pour la consommation électrique, le signalement des heures pleines et creuses, ou les pics de charge du réseau électrique.

Le **feedback indirect** réfère à une information plus élaborée, comme une facture de services publics accompagnée de conseils personnalisés ou d'une comparaison sociale - par rapport aux voisins ou aux ménages comparables. Ces interventions, qui vont de messages quotidiens ou hebdomadaires à des messages mensuels ou bimensuels, sont moins fréquemment mises en oeuvre. Avec le déploiement du compteur Linky, Enedis propose une information de ce type *via* une interface web pour l'ensemble de ses clients, avec des possibilités de comparaisons plus fines pour les clients acceptant un relevé plus fréquent de leur consommation.

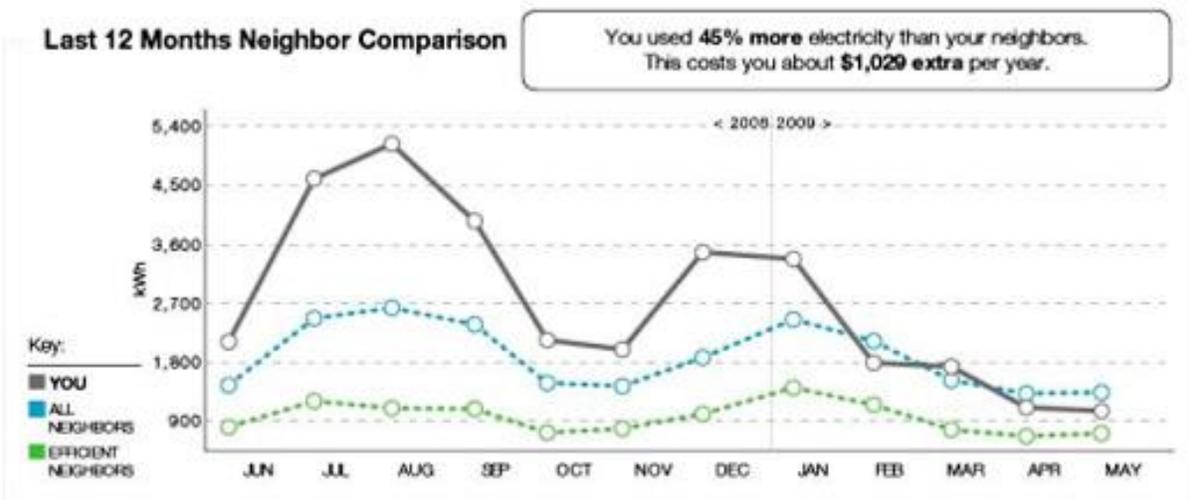
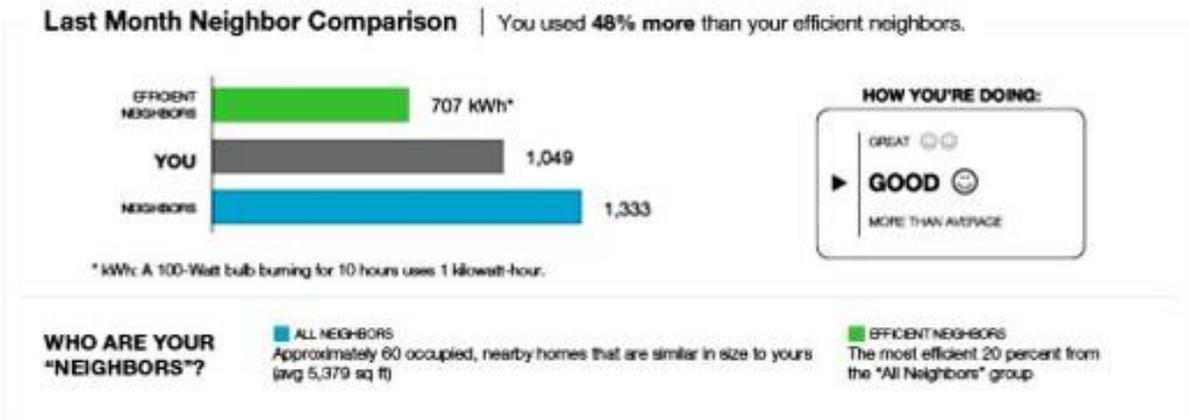
Fréquence du feedback

Le feedback direct étant fourni en temps réel, certains chercheurs ont soutenu l'idée qu'il était nécessairement plus efficace parce qu'il attire plus souvent l'attention des utilisateurs sur leurs écarts par rapport au comportement souhaité. L'information délivrée en continu encouragerait ainsi un plus grand engagement des usagers ^{29,30}. Toutefois, la méta-analyse publiée en 2015 suggère que la fréquence de l'intervention n'est pas corrélée à l'ampleur de l'effet ou à son importance. L'*Electric Power Research Institute* a ainsi établi qu'il y avait très peu de différence en termes d'économie d'énergie entre les interventions utilisant différents niveaux de fréquence de feedback: 9% d'économies pour le feedback mensuel, 8% pour le feedback quotidien ou hebdomadaire et 7% pour le feedback en temps réel ³¹. Ce résultat surprenant de prime abord est potentiellement dû à un effet d'accoutumance ou au fait que les messages en temps réel ne sont habituellement pas personnalisés. La présente intervention s'appuiera donc sur un feedback indirect personnalisé, de manière à induire au mieux le changement de comportement.

Exemples d'interventions

L'intervention la plus documentée dans le domaine des comportements d'économie d'énergie est un programme géré par l'entreprise de services publics *OPOWER* aux États-Unis. L'évaluation d'impact de ce programme implique plus de 80 000 ménages constitue l'un des plus grands essais randomisés de la littérature scientifique sur le sujet ³². Cette évaluation confirme que les interventions non tarifaires modifient de façon substantielle et rentable le comportement des consommateurs sur le long terme. Plus précisément, l'intervention consistait à envoyer aux consommateurs des factures mensuelles ou bimensuelles (appelées *Home Energy Reports*) contenant un retour d'information sur la consommation d'électricité des usagers, des conseils d'économie d'énergie et des éléments de comparaison sociale permettant aux usagers de comparer leur consommation mensuelle à celle de leurs voisins. Cette intervention non tarifaire a permis de réduire la consommation de 2,4%, ce qui équivaut à l'effet généré par une hausse des prix de l'électricité à court terme de 11% à 20%. Au delà de l'effet à court terme de l'intervention, les chercheurs ont par ailleurs montré que l'effet du feedback persistait après l'interruption de l'intervention.





Autre exemple, au Royaume-Uni cette fois, la Behavioral Insights Team (BIT) a travaillé avec l'organisme de réglementation de l'énergie *Ofgem* pour tester différentes techniques de communication visant à encourager les usagers à passer à de meilleurs contrats énergétiques. Dans le cadre d'un essai à grande échelle auprès de près de 150 000 clients, ils ont examiné différentes lettres personnalisées qui permettaient aux ménages de visualiser les économies qu'ils pouvaient espérer réaliser en changeant simplement de fournisseur d'énergie. Les lettres ont permis de tripler les taux de changement de fournisseur (par rapport à un taux de base de 1%)³³.

Il est important de noter qu'il est possible de combiner le feedback informationnel avec d'autres leviers, comme celui de la comparaison sociale, comme l'a fait avec succès le programme *Opower*. En France, une récente expérience de terrain menée sur 47 sites d'entreprises a permis de mesurer l'impact de trois nudges sur les économies d'énergie des salariés. Les chercheurs n'ont constaté aucun changement de comportement lorsque les sujets ne recevaient que des informations de comparaison sociale (la consommation d'énergie d'autres entreprises), non plus lorsqu'on leur donnait une « injonction morale » insistant sur l'utilisation responsable de l'énergie face aux enjeux environnementaux. De même, les auteurs n'ont trouvé aucun effet de l'intervention consistant à distribuer des autocollants rappelant les bonnes pratiques. Cependant, lorsque ces

trois approches étaient combinées, l'effet sur les comportements devenait visible. Ces études suggèrent donc qu'il est important de **combiner le feedback informationnel avec des informations sur la manière de changer concrètement le comportement des usagers**³⁴.

Enfin, comme nous l'avons déjà mentionné, peu d'études scientifiques ont examiné les interventions non tarifaires visant à réduire la pollution liée au chauffage au bois dans les pays développés, et aucune, à notre connaissance, n'utilise de mécanismes de feedback. L'une des rares études sur le sujet a été conduite en Australie, et comparait l'efficacité de l'information et de l'innovation technologique pour réduire la pollution de l'air générée par les appareils de chauffage au bois domestiques. Dans cette étude, 224 ménages ont été répartis au hasard en 3 groupes de traitement et 1 groupe témoin. Le premier groupe a reçu une trousse éducative contenant de l'information sur les conséquences néfastes pour la santé de la pollution par la fumée de bois ainsi qu'une liste de conseils pour une bonne gestion du bois de chauffage (la trousse comprenait des dépliants du *New South Wales Department of Health* décrivant les risques connus de la fumée de bois pour la santé, un DVD et un aimant pour réfrigérateur décrivant les meilleures pratiques en matière de gestion du bois de chauffage). Le deuxième groupe a reçu un *SmartBurn*, dispositif innovateur qui, une fois placé dans la cheminée, facilite une combustion efficace et mène ainsi à une réduction des émissions de particules. Le troisième groupe a bénéficié à la fois de l'intervention en matière d'éducation et d'appareils technologiques, tandis que le quatrième groupe n'a reçu aucune intervention. Les résultats ont révélé que l'intervention informationnelle non tarifaire était aussi efficace que l'utilisation du dispositif technologique³⁵.

Effet de cadrage et économie d'énergie

Il existe de nombreuses preuves que la façon dont les messages et les informations sont transmis a un impact sur le comportement des individus³⁶⁻³⁸. Par exemple, des études sur les effets de cadrage suggèrent que la préoccupation pour le changement climatique et le désir d'agir augmentent lorsqu'ils sont présentés comme un problème affectant la santé publique plutôt que comme une simple question environnementale³⁹⁻⁴¹. Le fait de considérer les questions environnementales comme des questions de santé semble en effet rendre « le problème plus pertinent, plus important et plus compréhensible pour les membres du public »⁴¹.

La comparaison de trois cadrages soulignant les différents types de risques associés aux changements climatiques (risques pour l'environnement, risques pour la santé ou risques pour la sécurité nationale) suggère en outre que le cadrage impliquant la santé est celui qui suscite le sentiment d'espoir le plus élevé et le sentiment de colère le plus faible face aux politiques de réduction de consommation d'énergie³⁹.

De la même manière, des chercheurs américains ont montré que les messages liés à la santé étaient particulièrement efficaces pour changer les comportements. Dans cet essai randomisé contrôlé, 118 ménages californiens ont été suivis pendant 9 mois au cours desquels ils recevaient des messages cadrés de deux manières différentes :

- Un cadrage axé sur la santé qui s'appuie sur des équivalents intuitifs de la pollution générée : « La semaine dernière, vous avez consommé XX% plus ou moins d'électricité que

- vos voisins les moins polluants. Vous ajoutez ou évitez XX kilos de polluants atmosphériques qui ont des effets connus sur la santé, comme l'asthme et le cancer infantile. »
- Un cadrage fondé sur les économies de coûts : « La semaine dernière, vous avez consommé XX% plus/moins d'électricité que vos voisins les plus économes. En un an, cela vous coûtera (vous économiserez) XX dollars. »

Les chercheurs ont constaté que le cadrage axé sur la santé induit des économies d'énergie de 8 à 10 %, qui persistent pendant 100 jours minimum, tandis qu'un cadrage plus traditionnel de réduction des coûts ne mène à aucune économie d'énergie significative après 7 semaines. Les mêmes chercheurs ont par ailleurs montré que ces interventions sont particulièrement efficaces auprès des familles avec enfants, qui ont réalisé jusqu'à 19 % d'économies d'énergie.

Auteurs Qui?	Pays	Type d'étude	Leviers	Intervention	Résultats
Allcott et al., 2010	États-Unis	Essai randomisé (80.000 ménages)	Influence Sociale, information, feedback	Factures bimensuelles contenant : un retour d'information sur la consommation d'électricité + des conseils d'économie d'énergie + comparaison de la consommation mensuelle à celle des voisins.	Réduction de consommation de 2,4%. Effet qui persiste après 2 ans.
BIT	UK	Essai randomisé (150.000 clients)	Cadrage, feedback, salliance	Lettres personnalisées qui permettent de visualiser les économies réalisées en changeant simplement de fournisseur d'énergie.	Taux de changement de fournisseur multipliés par trois (baseline : 1%)
Charlier et al., 2019	France	Essai randomisé (47 entreprises)	Influence sociale, rappel, injonction morale	Messages bimensuels contenant des informations de comparaison sociale (la consommation d'énergie d'autres entreprises), une injonction morale insistant sur l'utilisation responsable de l'énergie face aux enjeux environnementaux + des autocollants rappelant les bonnes pratiques	Lorsqu'elles sont mises en œuvre seules, ces trois mesures n'ont aucun effet significatif sur la consommation d'énergie. Mais lorsque l'injonction morale et la comparaison sociale sont combinées avec les autocollants, le message devient efficace.
Hine et al., 2011	Australie	Essai randomisé (316 ménages)	Information, rappel, cadrage santé	Trousse éducative contenant un dépliant du New South Wales Department of Health décrivant les risques connus de la fumée de bois pour la santé, un DVD + un aimant pour réfrigérateur décrivant les meilleures pratiques en matière de gestion du bois de chauffage	Les résultats ont révélé que l'intervention informationnelle non tarifaire était aussi efficace (27% de fumée en moins) que l'utilisation du dispositif technologique.
Asensio & Delmas, 2016	États-Unis	Essai randomisé (118 ménages sur 9 mois)	Cadrage santé, feedback, influence sociale	Messages cadrés avec un axe sur la santé qui s'appuie sur des équivalents intuitifs de la pollution générée, dans lequel les ménages tiennent compte des effets sur la santé de leur consommation marginale d'électricité	Le cadrage axé sur la santé induit 8 à 10 % d'économies d'énergie persistantes (19% pour les familles avec enfants). Un ca-

of Water
and Power
(LADWP)

drage plus tradi-
tionnel de réduction
des coûts ne
mène à aucune
économie d'énergie.

Delmas et al. , 2013	13 pays déve- loppés	Revue de la littéra- ture (156 études sur le terrain conduites entre 1975 et 2012)	Feedback suivi	Interventions contenant des suivis de comportement con- cernant la consommation énergétique.	Réduction moyenne de la consommation d'énergie de 7,4 %
Karlin et al., 2015	Diffé- rents pays déve- loppés	Revue de la littéra- ture, méta- analyse (42 études expéri- mentales)	Feedback suivi	Interventions contenant des suivis de comportement con- cernant la consommation énergétique.	Réduction moyenne de 7,1 % de la consom- mation d'énergie

Une perception faussée du chauffage au bois

En bref : La plupart des utilisateurs du bois de chauffage ont une perception faussée des conséquences environnementales de l'utilisation du bois et de leurs compétences dans l'utilisation de ce mode de chauffage. Les obstacles comportementaux étant plus importants sur le volet des compétences, nous proposons d'agir la perception afin de limiter la fréquence d'utilisation, en particulier pour l'usage d'agrément et d'appoint. Pour ce faire, nous proposons de mobiliser une restitution personnalisée d'information sur les effets du bois de chauffage, avec un cadrage particulier au sujet des effets sur la santé individuelle et de l'entourage, renforcée par la mobilisation des normes sociales au travers de comparaison avec d'autres utilisateurs.

De nombreuses personnes associent le chauffage au bois au confort, au bonheur et au bien-être. Comportementalement, l'attitude vis-à-vis du chauffage au bois relève de la conjonction d'un **biais de saillance** et de l'utilisation d'une **heuristique de disponibilité**. D'une part, la représentation culturellement ancrée du feu de bois comme un élément bénéfique de confort a été renforcée récemment par une présentation du chauffage au bois comme une source d'énergie renouvelable et peu émettrice en CO₂. La sensation de bien-être qui en découle est une sensation familière, et répétée à chaque flambée. Inversement, les effets délétères sur la santé du chauffage au bois sont à la fois moins connus de manière générale, et aussi difficiles à observer au quotidien que les particules qui en sont pour partie la cause. Les manifestations négatives sont



par ailleurs rares et décalées dans le temps (maladies respiratoires chroniques, cancers) de sorte qu'il est difficile de les associer intuitivement à la cause.

Ainsi, la décision d'utiliser ou non le chauffage au bois - lorsqu'une personne a la possibilité de choisir - peut être fondée sur un sentiment positif intuitif plutôt que sur un calcul logique de risque, et la fumée de bois est perçue comme une menace moindre pour la santé que de nombreux autres facteurs environnementaux. Les principaux obstacles identifiés sont le manque d'informations sur la question et ses possibilités d'atténuation, et l'effet positif lié au chauffage au bois. Les interventions peuvent donc échouer si

elles ne fournissent que des informations sur les risques sans tenter de déjouer l'image positive du chauffage au bois.

Comportements sur lesquels agir

Dans la perspective d'une intervention comportementale, la pollution par le bois peut être réduite de trois manières différentes : 1) en changeant le comportement des utilisateurs pour qu'ils aient recours moins souvent au bois pour le chauffage d'agrément, 2) en changeant leurs pratiques de chauffage au bois et, 3) en optant pour de meilleurs équipements.

Les réunions de préparation à ce rapport ont mis en évidence que les trois leviers sont pertinents pour le problème d'ensemble, mais que la réduction de l'usage, en particulier pour l'agrément et le chauffage d'appoint, consistait le meilleur angle d'attaque. En effet :

- Le changement des pratiques se heurte à des obstacles comportementaux importants (les utilisateurs estiment bien savoir comment allumer un feu, choisir leur bois ou entretenir leurs équipements), et les gains attendus sont plus importants sur des publics qui utilisent le bois comme mode de chauffage principal. Il semble à ce titre plus pertinent pour des action comme celle actuellement menée par la DREAL de Nouvelle-Aquitaine. Les conséquences d'un tel changement, pour importantes qu'elles soient potentiellement, sont plus difficiles à objectiver *via* une mesure directe, ce qui constitue un prérequis pour la présente intervention.
- Le changement des équipements s'inscrit dans un temps long, le taux de renouvellement étant faible. Notre proposition inclut une action dans ce sens, mais le cadre de la présente intervention requiert l'obtention de résultats mesurables à une échéance plus rapprochée.

Les supports d'information que nous communiquerons pourront néanmoins inclure des éléments relatifs aux bonnes pratiques et au changement des équipements. Nous ne serons toutefois probablement pas en mesure d'évaluer de manière fiable l'impact de notre campagne sur ces types de comportement.

Leviers comportementaux

Levier 1 : Diminuer l'image positive du chauffage au bois

Le manque de connaissances sur les émissions nocives résultant de la combustion du bois, ses effets sur la santé et les bonnes pratiques susceptibles de les réduire constitue un obstacle à la réduction de la pollution liée au bois dans les ménages. Bien que la pollution résultant du chauffage domestique représente 33% de la pollution de l'air totale en Île-de-France, le rapport préparé par BVA en 2015 montre que seuls 7% des ménages utilisant le chauffage au bois la mentionnent comme l'une des principales sources de pollution perçue ; seuls 21% des utilisateurs occasionnels croient que le chauffage au bois a un impact sur la qualité de l'air à l'intérieur de leur maison, et seuls 16% pensent qu'il a un impact sur la qualité de l'air extérieur. Il n'y a donc pas de facteur de motivation fort pour inciter les individus à changer leur comportement. Ces chiffres suggèrent que les usagers ne prennent pas ou peu en compte les coûts associés au chauffage au bois.

Le manque d'information sur les bonnes pratiques est également identifié comme un obstacle au changement de comportement souhaité. Le rapport BVA montre ainsi une connaissance plutôt faible des pratiques qui favorisent une bonne combustion du bois, en particulier celles liées au chauffage et à l'entretien ; seuls 17% des répondants estiment que le temps de séchage du bois est un facteur important pour déterminer une bonne combustion et réduire la pollution. De même, 10% mentionnent la qualité du bois, 5% l'entretien de l'équipement et seulement 2% le niveau d'humidité du bois utilisé. Étant donné le faible niveau de connaissances concernant les bonnes pratiques d'allumage et de choix du bois, on peut espérer que fournir des recommandations claires sur les pratiques qui réduisent le plus la pollution aura un impact positif sur les comportements. Comme l'a signalé la DREAL de Nouvelle-Aquitaine, la diffusion d'information sur le terrain se heurte souvent au sentiment qu'ont les utilisateurs de maîtriser ce domaine et de percevoir les conseils comme une remise en cause de savoir-faire transmis au sein d'un entourage de confiance.

Recommandation : nous préconisons d'attirer l'attention des usagers sur la pollution associée au bois afin d'aller à l'encontre de l'image positive associée à ce mode de chauffage.

Levier 2 : Utiliser un cadrage axé sur la santé

Bien que le réchauffement climatique soit présenté comme un enjeu environnemental majeur depuis de longues années, l'engagement citoyen se heurte au scepticisme plus ou moins fort d'une partie de la population ⁴¹. En pratique, l'adoption de comportements éco-responsables résulte d'un ensemble de compromis entre le confort personnel, les préoccupations économiques et une perception du bien-être social à différents niveaux (entourage, communauté locale, nation, planète). La manière dont les termes de ces compromis sont définis dans les espaces de discussion à chaque niveau influencent ainsi les choix des citoyens. Il nous semble donc important d'aider les citoyens à appréhender les questions complexes que sont le changement climatique ou la pollution par le biais de problèmes qui leur apparaissent comme plus immédiatement compréhensible, comme les problèmes de santé causés par la pollution (asthme, toux, etc.). De fait, l'état de l'art scientifique suggère que les informations cadrées en termes de risques pour la santé sont perçues comme plus pertinentes et touchent un public plus large que les informations cadrées en termes de dommages environnementaux ³⁹. Des recherches montrent par ailleurs que des messages qui s'adressent à des objectifs intrinsèques (santé de la personne, bien-être) sont plus efficaces parce qu'ils augmentent progressivement le niveau de motivation de la population cible ⁴².

L'enquête précédemment citée de BVA sur le chauffage au bois ¹⁷ a montré que seulement 10% des utilisateurs de chauffage au bois pensaient que celui-ci avait un impact négatif sur la qualité de l'air, et encore moins le citaient spontanément parmi les sources de pollution atmosphérique. Augmenter la perception des risques pour la santé associés au chauffage au bois peut donc être une motivation pour changer les comportements. De fait, la santé personnelle et celle de leurs proches est un élément déterminant pour les Franciliens qui l'invoquent comme l'une des deux raisons principales qui pourraient les inciter à changer leur équipement (même étude).

Recommandation : nous préconisons d'agir sur la motivation des individus à préserver leur propre santé. Pour cela, des messages permettant d'appréhender intuitivement les risques sanitaires associés au chauffage au bois doivent être conçus. La contrainte à ce niveau sera cependant de limiter le caractère anxiogène des messages, qui pourrait conduire à un rejet. Les messages seront donc formulés de manière à expliquer à la fois les risques et comment changer ses pratiques pour s'en prémunir efficacement.

Levier 3 : Utiliser les normes sociales

Un troisième levier prometteur pour le changement de comportement est l'utilisation des normes sociales dans la formulation des messages d'information. Les normes sociales sont définies comme « des règles et des normes qui sont comprises par les membres d'un groupe et qui guident ou limitent les comportements sociaux sans la force de la loi » ⁴³, et elles sont souvent associées à une pression implicite pour participer ou non à un comportement spécifique. Dans le domaine de l'action en faveur de l'environnement ou de la protection de la qualité de l'air, les citoyens sont dans une situation de dilemme social : il y a un bien public que nous avons un

intérêt collectif à protéger mais qui nécessite un coût que chacun hésite à payer. Dans ce type de situations, la réciprocité est un moteur important de changement. Comme nous l'avons vu dans les exemples cités plus haut, notamment avec l'intervention d'*Opower* aux États-Unis, l'utilisation du levier de **comparaison sociale** permet en effet de réduire la consommation d'énergie. Deux expériences sur le terrain en 2008 ont en outre montré que les messages incluant des normes descriptives (p. ex. « la majorité des clients réutilisent leurs serviettes ») étaient plus efficaces que des messages mentionnant la protection de l'environnement. Ils montrent également que les messages sont plus efficaces lorsque le comportement social décrit est attribué à un groupe qui a les mêmes caractéristiques que l'utilisateur ⁴⁹.

Recommandation : les normes sociales constituent un levier puissant pour inciter les personnes à changer de comportement. Ce levier est d'autant plus efficace que le groupe social choisi pour construire la norme sociale est proche de l'individu. Nous préconisons donc d'insérer dans les messages destinés aux usagers du chauffage au bois des éléments leur permettant de comparer leur consommation à celle de leurs voisins immédiats.

Conclusions opérationnelles

Chauffage au bois et pollution de l'air

Nous tirons de notre revue de littérature les conclusions opérationnelles suivantes :

1. La contribution du chauffage au bois à la pollution de l'air (en particulier les PM10 visées dans la motivation initiale) est solidement établie. Elle procède particulièrement de l'utilisation de foyers ouverts dans Paris et la zone sensible.
2. Les émissions de PM_{2.5} par le chauffage au bois et leur nocivité sont bien établis. Nous serons donc en mesure d'apporter aux participants de l'expérience une information fondée sur l'état de l'art quant aux niveaux d'exposition engendrés par leur utilisation du feu de bois.
3. Il semble possible de détecter par-dessus des événements correspondant à l'allumage et à l'alimentation de foyers fermés. Nous devrions donc être en mesure d'identifier les épisodes de recours au chauffage au bois pour une gamme de foyers. (NB: Une restriction possible, portée à notre connaissance par Anne Kauffmann, Directrice de la recherche et de la prospective à Airparif, est que la composition détaillée des PM_{2.5} émises par la combustion de bois est mal connue. S'il s'agit majoritairement de particules d'un diamètre inférieur à 0,3µm, les microcapteurs pourraient ne pas parvenir à en mesurer la concentration de manière fiable, leur seuil de détection étant aux alentours de 1µm. Nous conduisons par conséquent une expérience-pilote pour évaluer la capacité des micro-capteurs à effectivement détecter les émissions de différents foyers).

Usage du chauffage au bois en Île-de-France

Sur la base de l'enquête BVA, l'usage d'agrément apparaît comme notre cœur de cible : il s'agit en effet d'un usage peu déterminé par des considérations économiques, fortement contributeur aux émissions en air intérieur et extérieur, et pour lequel l'obstacle comportemental est essentiellement la (re)connaissance des risques.

L'usage d'appoint occasionnel constitue une cible secondaire possible, en ajoutant au motif de santé des éléments sur les bonnes pratiques qui permettent de réduire les émissions.

L'usage d'appoint régulier et l'usage comme mode de chauffage principal requiert probablement un information plus détaillée sur les gains financier à changer d'équipement de chauffage et à adopter les bonnes pratiques. Dans la mesure où un certain nombre de ces ménages peuvent être financièrement contraints, les actions comportementales devraient idéalement s'accompagner d'une évolution du mode d'aide afin de limiter le besoin d'avancer des sommes importantes.

Des ateliers ultérieurs préciseront le ciblage précis de l'expérience (type d'usage et messages) en fonction du public de volontaires.

Utilisation de capteurs de pollution

En bref : La principale difficulté de cette expérimentation est l'absence de mesure directe de l'utilisation du chauffage au bois, qui seule peut nous permettre d'évaluer l'efficacité des messages transmis. Cette difficulté peut être surmontée par l'installation chez des ménages volontaires de capteurs de pollution discrets, qui nous permettront de détecter *a minima* les phases d'allumage des foyers. Les contraintes de prix et de discrétion nous conduisent à sélectionner des capteurs conçus pour des mesures en mobilité sur des véhicules, afin de limiter la complexité de l'installation et de ne pas perturber l'expérience par une feedback direct aux ménages volontaires.

Pourquoi des capteurs individuels ?

Un défi majeur de ce projet est l'absence de mesure directe du changement de comportement. Nous devons par conséquent constituer un dispositif de mesure qui fournisse une information fiable sur :

- L'utilisation des foyers à bois, qui constitue notre mesure-objectif ;
- Les variations d'émissions de polluants dans l'air intérieur, qui fondent les informations personnalisées que nous allons restituer aux participants de l'expérience.

Ces mesures fourniront les informations nécessaires à la fois pour estimer l'impact de l'intervention et la fiabilité des données auto-déclarées en parallèle.

Critères de choix

Types de mesures

En ligne avec notre focalisation sur les $PM_{2.5}$, nous nous sommes particulièrement focalisés sur les capteurs permettant une mesure de ces particules. Ainsi que nous l'a rappelé Corinne Mandin (CSTB et Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur), les micro-capteurs procèdent par comptage optique des particules, et extrapolent sous un jeu d'hypothèse ce comptage en une valeur massique, là où les instruments de référence effectuent la capture d'un volume d'air donné, puis une pesée précise.

En complément des mesures directes de pollution, la mesure de la température peut fournir une indication complémentaire de l'allumage d'un appareil de chauffage au bois dès lors que le capteur est placé à proximité de celui-ci. La présence de ce contrôle permettrait d'identifier des variations dans le niveau de pollution de l'air qui résulteraient d'actions externes (présence d'un fumeur dans la pièce, aération).

Fréquence des mesures

D'après certains éléments qui nous ont été présentés, un pic d'émission de particules fines survient dans les 5 minutes après l'allumage du feu. Les capteurs doivent donc présenter un pas de temps suffisamment court entre deux mesures pour identifier approximativement ce pic.

Profil d'utilisation

Les capteurs utilisés pour l'expérience seront déployés dans un grand nombre de foyers, dont nous ne maîtrisons pas les caractéristiques, en particulier le degré d'équipement et de familiarité avec la technologie. De nombreux micro-capteurs, conçus pour une mesure en mobilité par des personnes sensibilisées et technophiles, reposent sur l'appariement avec un smartphone pour commander les mesures et les transmettre aux serveurs. Une telle configuration, si elle a l'avantage de décharger le capteur de circuits de communication avancés, nous paraît présenter un risque important d'attrition dans l'expérience. En effet :

- Pour un ménage donné, nous avons besoin d'une stabilité dans le contexte de mesure. Des capteurs conçus pour être nomades seraient facilement déplacés et manipulés, par exemple lors du ménage.
- Nous ne voulons pas qu'une action de la personne soit requise pour lancer la mesure, cela risquant à la fois de conduire à un fort taux de données manquantes (mesure non activée) et à une altération des comportements.
- Cela entraînerait un biais de sélection et d'attrition fort en défaveur des ménages moins technophiles, souvent plus âgés, qui font potentiellement partie de notre population-cible, tant pour l'expérience que dans un contexte de généralisation.
- L'application gouvernant le fonctionnement des capteurs est conçue pour restituer une information en temps quasi-réel à l'utilisateur. Dans la mesure où c'est ce *feedback* que nous voulons contrôler, il faudrait prévoir avec le fournisseur des développements logiciels spécifiques pour bloquer le feedback des groupes de personnes participant à l'expérience. Pour les mêmes raisons, il nous semble nécessaire d'éviter les appareils présentant un dispositif visuel indiquant le niveau de pollution (LED de couleur, écran, etc.), car de nature à influencer sur les comportements.

Nous privilégierons donc les capteurs localisés à un emplacement fixe, alimentés en énergie de manière constante, et sans appariement avec une application dédiée.

Prix

Dans la mesure où nous opérons dans une enveloppe budgétaire contrainte, le prix constitue un élément de choix majeur. Afin d'atteindre une puissance statistique suffisante, nous estimons qu'il nous faudra entre 300 et 500 capteurs au total.

Modèles disponibles et sélection

Au cours des deux dernières années, de nombreux micro-capteurs de pollution sont arrivés sur le marché. Ils couvrent une vaste gamme de fonctions, allant du pilotage industriel de l'air dans des bâtiments commerciaux et industriels à la mesure nomade d'exposition individuelle de la pollution. Afin de donner une visibilité au secteur, AirParif, via sa structure AirLab, a organisé en 2018 un challenge microcapteurs, comparant les performances des capteurs à celles de ses dispositifs de référence. La note qui en résulte ⁴⁴ a constitué le point de départ de notre recherche de capteurs. Une édition 2019 est en cours, mais elle n'est pas assez avancée à ce stade pour être utilisable dans les délais du projet.

Les conditions de notre expérience nous ont conduits à écarter l'ensemble des capteurs dont l'usage de référence pour AirLab était la sensibilisation à la qualité de l'air intérieur. En effet, conçus pour restituer une information directement à l'utilisateur, ces appareils présentent des dispositifs (led de couleur, écran) informant l'utilisateur sur l'état de la pollution. Par construction, cette restitution aurait un effet sur les comportements, y compris sur le groupe de contrôle. De plus, la plupart d'entre eux reposent sur l'appariement avec un smartphone ou une installation sur un réseau WiFi, compliquant la mise en place.

La gamme des capteurs d'air intérieur comporte de son côté des équipements correspondant plus à nos attentes techniques, mais reposant sur la communication avec un réseau local d'entreprise, ce qui complique considérablement l'installation. C'est ainsi la gamme des équipements destinés à la mesure de la qualité de l'air intérieur qui correspond le mieux à nos attentes. Or, ces appareils sont souvent onéreux, et, devant être installés en extérieur, souvent assez visibles.

En pratique, le capteur Atmotrack de l'entreprise 42 Factory, correspond le mieux dans ses fonctionnalités et son apparence à notre cahier des charges. Contactée par nos soins, l'entreprise a en outre formulé une proposition de location plutôt que d'achat des capteurs, ce qui permet de réduire considérablement la charge budgétaire unitaire et donc de déployer un nombre suffisant de capteurs.



Bibliographie

1. Airparif. *Bilan de la qualité de l'air en Île-de-France 2018*. 92 (Airparif, 2019).
2. Pascal, M. *et al.* *Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique*. 162 (Santé Publique France, 2016).
3. Airparif. *Bilan 2015 des émissions atmosphériques – Ile-de-France*. (Airparif, 2019).
4. Sexton, K., Spengler, J. D. & Treitman, R. D. Effects of residential wood combustion on indoor air quality: a case study in Waterbury, Vermont. *Atmospheric Environ.* 1967 **18**, 1371–1383 (1984).
5. Allemand, N. *et al.* *Évaluation de l'impact des appareils de chauffage domestique au bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur*. 156 (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire et ADEME, 2008).
6. U.S. Environmental Protection Agency. *Strategies for Reducing Residential Wood Smoke*. 45 (U.S. Environmental Protection Agency, 2013).
7. Host, S. *Chauffage au bois et santé en Île-de-France*. (Observatoire régional de santé Île-de-France, 2018).
8. Jobert, M. Chauffage à bois: l'arnaque aux émissions? - Journal de l'environnement. *Journal de l'environnement* (2018).
9. Roy, S. Le chauffage au bois, une source de pollution non négligeable de l'air de nos maisons. *Le Figaro* (2019).
10. Stabile, L., Buonanno, G., Avino, P., Frattolillo, A. & Guerriero, E. Indoor exposure to particles emitted by biomass-burning heating systems and evaluation of dose and lung cancer risk received by population. *Environ. Pollut. Barking Essex 1987* **235**, 65–73 (2018).
11. Frasca, D. *et al.* Influence of advanced wood-fired appliances for residential heating on indoor air quality. *Chemosphere* **211**, 62–71 (2018).
12. Mandin, C. *et al.* Impact of residential wood burning on indoor air quality. (2009).
13. Salthammer, T., Schripp, T., Wientzek, S. & Wensing, M. Impact of operating wood-burning fireplace ovens on indoor air quality. *Chemosphere* **103**, 205–211 (2014).
14. Rokoff, L. B. *et al.* Wood Stove Pollution in the Developed World: A Case to Raise Awareness Among Pediatricians. *Curr. Probl. Pediatr. Adolesc. Health Care* **47**, 123–141 (2017).
15. Wyss, A. B. *et al.* Particulate Matter 2.5 Exposure and Self-Reported Use of Wood Stoves and Other Indoor Combustion Sources in Urban Nonsmoking Homes in Norway. *PLoS One* **11**, e0166440 (2016).
16. Nicolas, M. & Le Dreff, C. Chauffage au bois et qualité de l'air intérieur. in *Le Chauffage individuel au bois : des atouts à valoriser, des pratiques et appareils à améliorer* 64 (PRIME-QUAL, 2018).
17. Olagne, R. & Lepesant, B. *Le Chauffage au bois en région Île-de-France*. 102 (BVA / ADEME, 2015).
18. Ollivier, E. Les feux de cheminées sont-ils si polluants ? *Le Monde* (2014).
19. Chafe, Z. *et al.* *Residential heating with wood and coal: health impacts and policy options in Europe and North America*. (Organisation Mondiale de la Santé, 2015).

20. Ineris. Pollution atmosphérique: les enjeux de la filière bois-énergie. Available at: <https://www.ineris.fr/fr/dossiers-thematiques/tous-dossiers-thematiques/chauffage-bois-qualite-air/pollution-atmospherique>. (Accessed: 6th June 2019)
21. Arrêté inter-préfectoral n° IDF-2018-01-31-007 relatif à l'approbation et à la mise en œuvre du Plan de Protection de l'Atmosphère pour l'Île-de-France. (2018).
22. Press-Kristensen, K. *Pollution from residential burning - Danish experience in an international perspective*. 36 (Clean Heat, 2016).
23. Gay, G. & Poisson, N. *Le Chauffage individuel au bois : des atouts à valoriser, des pratiques et appareils à améliorer*. (PRIMEQUAL, 2018).
24. Thaler, R. H. & Sunstein, C. R. *Nudge: Improving decisions about health, wealth, and happiness*. (Yale University Press, 2008).
25. Behavioural Insights and Public Policy - Lessons from Around the World - en - OECD. Available at: <https://www.oecd.org/gov/regulatory-policy/behavioural-insights-and-public-policy-9789264270480-en.htm>. (Accessed: 13th June 2019)
26. Andor, M. A. & Fels, K. M. Behavioral Economics and Energy Conservation – A Systematic Review of Non-price Interventions and Their Causal Effects. *Ecol. Econ.* **148**, 178–210 (2018).
27. Delmas, M. A., Fischlein, M. & Asensio, O. I. Information strategies and energy conservation behavior: A meta-analysis of experimental studies from 1975 to 2012. *Energy Policy* **61**, 729–739 (2013).
28. Karlin, B., Zinger, J. F. & Ford, R. The effects of feedback on energy conservation: A meta-analysis. *Psychol. Bull.* **141**, 1205–1227 (2015).
29. Darby, S. The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption. A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and Direct Displays. **22**, 1–21 (2006).
30. Fischer, C. Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy? *Energy Effic.* **1**, 79–104 (2008).
31. *Residential Electricity Use Feedback: A Research Synthesis and Economic Framework*. (Electric Power Research Institute, 2009).
32. Allcott, H. Social norms and energy conservation. *J. Public Econ.* **95**, 1082–1095 (2011).
33. Encouraging consumers to switch to better energy deals. Available at: <https://www.bi.team/case-studies/encouraging-consumers-to-switch-to-better-energy-deals/>. (Accessed: 13th June 2019)
34. Charlier, C., Guerassimoff, G., Kirakosian, A. & Selosse, S. Under pressure! Nudging electricity consumption within firms. Feedback from a field experiment. in *IEW - International Energy Workshop* (2018).
35. Hine, D. W., Bhullar, N., Marks, A. D. G., Kelly, P. & Scott, J. G. Comparing the effectiveness of education and technology in reducing wood smoke pollution: A field experiment. *J. Environ. Psychol.* **31**, 282–288 (2011).
36. Kahneman, D. & Tversky, A. Choices, values, and frames. *Am. Psychol.* **39**, 341–350 (1984).
37. Lai, M. & Kuo, C.-C. Preventing piracy use intention by rectifying self-positivity bias. *Soc. Behav. Personal.* **35**, 961–974–974 (2007).
38. Qin, W. & Brown, J. L. Public reactions to information about genetically engineered foods: effects of information formats and male/female differences. *Public Underst. Sci.* **16**, 471–488 (2007).
39. Myers, S. S. & Patz, J. A. Emerging Threats to Human Health from Global Environmental Change. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **34**, 223–252 (2009).

40. Cardwell, F. S. & Elliott, S. J. Making the links: do we connect climate change with health? A qualitative case study from Canada. *BMC Public Health* **13**, 208 (2013).
41. Maibach, E. W., Nisbet, M. C., Baldwin, P. K., Akerlof, K. L. & Diao, G. Reframing climate change as a public health issue: an exploratory study of public reactions. in *BMC public health* (2010). doi:10.1186/1471-2458-10-299
42. Asensio, O. I. & Delmas, M. A. The dynamics of behavior change: Evidence from energy conservation. *J. Econ. Behav. Organ.* **126**, 196–212 (2016).
43. Cialdini, R. B. & Trost, M. R. Social influence: Social norms, conformity and compliance. in *The handbook of social psychology, Vols. 1-2, 4th ed* 151–192 (McGraw-Hill, 1998).
44. AirLab. *Challenge Microcapteurs 2018 : annonce des résultats*. (AirLab, 2018).