

**ENSP**

ECOLE NATIONALE DE  
LA SANTE PUBLIQUE

**RENNES**

---

**Ingénieurs du génie sanitaire**

Date du Jury : **avril 2004**

---

**Évaluation et gestion des risques liés  
aux polluants atmosphériques  
résultant des feux de forêt**

---

**Erwan CARFANTAN**

**Marie GAULME**

**Anne THEVENET**

**Réfèrent : Michel CLEMENT**

---

# Sommaire

---

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>1 IDENTIFICATION DES DANGERS.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Présentation des contaminants .....</b>	<b>2</b>
1.1.1 Polluants issus combustion complète .....	2
1.1.2 Polluants primaires issus de combustion incomplète .....	3
1.1.3 Polluants secondaires .....	5
<b>1.2 Pathologies - effets observés.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Facteurs influençant l'impact sanitaire .....</b>	<b>9</b>
1.3.1 Facteurs environnementaux influençant le potentiel toxique .....	9
1.3.2 Populations sensibles.....	15
<b>2 EVALUATION DE L'EXPOSITION DES POPULATIONS .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Méthodologies d'évaluation des expositions .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Mesure de la contamination et détermination du budget espace temps.....	17
2.1.2 Les indicateurs biologiques.....	19
<b>2.2 Type d'exposition.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Expositions aiguës.....	19
2.2.2 Expositions chroniques.....	19
<b>3 EVALUATION DES EFFETS SANITAIRES .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Méthodologie d'évaluation des effets sanitaires .....</b>	<b>20</b>
3.1.1 Justification de l'utilisation de données épidémiologiques plutôt que d'une méthodologie d'évaluation des risques .....	20
3.1.2 Effets attendus .....	21
3.1.3 Types d'études utilisées.....	22
<b>3.2 Effets sanitaires par exposition aux feux de forêts d'après des études épidémiologiques     .....</b>	<b>24</b>
3.2.1 Méthodologie adoptée dans les études de cas retenues.....	24
3.2.2 Résultats obtenus dans chaque étude.....	27

<b>4</b>	<b>GESTION DU RISQUE.....</b>	<b>29</b>
4.1	Méthodologie de gestion des risques préconisée par l’OMS.....	29
4.2	Politique de prévention et de lutte en France.....	32
4.2.1	Les moyens de surveillance .....	32
4.2.2	Les politiques de prévention .....	33
4.2.3	Politique de lutte .....	34
<b>5</b>	<b>DISCUSSION .....</b>	<b>37</b>
5.1	Discussion sur la méthodologie employée dans les études retenues .....	37
5.2	Discussion sur les résultats obtenus dans les études sélectionnées.....	39
5.3	Discussion sur les moyens mis en œuvre pour gérer les risques.....	40
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>41</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>42</b>
	<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>44</b>

---

## Liste des sigles utilisés

---

COV : Composés Organiques Volatiles et semi-volatiles

EPA : Agence pour la Protection de l'Environnement (Etats-Unis)

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

MTA : Modélisation du Transport Atmosphérique

NASA : Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace

NOAA : Administration Nationale Océanique et Atmosphérique

NO<sub>x</sub> : oxydes d'azote

OMM : centres météorologiques

OMS : Organisation Mondiale pour la Santé

ONG : Organisation Non Gouvernementale

PM : Matières Particulaires

PNT : Prédiction Numérique du Temps

PSI : Pollutant Standards Index

SO<sub>x</sub> : oxydes de soufre

URTI : affections du tractus respiratoire supérieur

# INTRODUCTION

Les incendies ont eu de graves conséquences pour les personnes, les biens et les forêts dans le monde entier pendant la grande sécheresse de 1997. Ces incendies ont causé la mort de nombreuses personnes, entraîné de sérieux problèmes de santé dus à la pollution de l'air en Indonésie, en Malaisie, en Amérique centrale, au Mexique et aux Etats-Unis, perturbé la navigation aérienne et maritime, endommagé les forêts tropicales humides au Brésil et au Mexique, et nécessité l'évacuation de milliers de personnes. Même les pays possédant des techniques avancées de lutte contre les incendies n'ont pas été en mesure de faire face à la gravité de la situation tant que les conditions météorologiques ne se sont pas améliorées.

Ces feux de forêt affectent l'économie, la santé et la sécurité, avec des conséquences dont l'envergure et la gravité sont comparables à celles des catastrophes naturelles majeures. Ils provoquent des émissions de gaz et de particules qui ont une incidence sur la composition de l'atmosphère global. Ces récents incendies de grande ampleur ont attiré l'attention du public et des responsables politiques sur les approches concernant la remise en état autant que sur la prévention.

La pollution par les fumées résultant des feux de végétation soulève une importante question de santé publique et entraîne des risques majeurs pour la santé des populations et la salubrité de l'environnement. Plusieurs milliers de malades liés aux composés dégagés par les incendies ont été recensés dans les pays touchés par les fumées. La plupart des personnes affectées présentaient des problèmes respiratoires, des bronchites, de l'asthme, des conjonctivites et également de l'eczéma. Devant l'ampleur des effets sanitaires observés, il apparaît donc nécessaire de connaître :

- La composition des fumées émises,
- Les niveaux d'exposition des populations,
- Les effets sanitaires engendrés par ces émissions,

afin de mettre en place des systèmes de prévention et de gestion efficaces.

Les objectifs de cette étude sont donc de :

- synthétiser les informations disponibles concernant l'impact sanitaire suite à l'exposition des émissions atmosphériques des feux de forêt,
- proposer des solutions de gestion au niveau international et au niveau local.

# 1 IDENTIFICATION DES DANGERS

## 1.1 Présentation des contaminants

Les feux de forêt et d'autres types de végétation produisent des gaz et des émissions de particules qui affectent la composition de l'atmosphère. Ces gaz et ces particules, associés à ceux qui résultent de la combustion des combustibles fossiles ou d'autres processus technologiques, sont une importante source de pollution atmosphérique en milieu urbain. Ils polluent aussi l'atmosphère dans les zones rurales. La combustion de biocarburants est un processus incomplet qui s'accompagne d'émissions de polluants divers - particules, monoxyde de carbone, oxydes d'azote, dioxyde de soufre et composés organiques. Dans l'atmosphère, ces polluants subissent des transformations physico-chimiques. Ainsi, les incendies de forêt, de même que l'utilisation de la biomasse comme combustible, libèrent des quantités importantes de gaz et de particules toxiques dans l'atmosphère, et émettent des gaz réactifs et à effet de serre.

C'est pourquoi, la première partie de cette étude sera intégralement consacrée à une description des principaux polluants répertoriés lors d'incendies de forêts. Cette liste n'est en aucun cas exhaustive car la diversité des polluants émis apparaît beaucoup trop longue et il serait totalement inutile de discuter de polluant émis en quantité minime et dont l'impact sanitaire n'existe pas. La description des polluants tient compte de deux types de combustion : la combustion complète et la combustion incomplète.

### 1.1.1 Polluants issus combustion complète

Une combustion complète émet principalement du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau et dans de plus faibles quantités les composés suivants : des oxydes d'azote, du dioxyde soufre, des cendres, des éléments traces : métaux lourds notamment. A noter que les oxydes d'azotes proviennent de réaction parallèle, il est formé par l'oxydation de l'azote de l'air de combustion. Voici une description des certains de ces composés :

#### - NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> :

Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) est un gaz brun rougeâtre, fortement réactif qui est formé dans le ciel par l'oxydation de l'oxyde nitrique (NO). Le terme oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) recouvre l'ensemble des oxydes d'azote notamment NO, NO<sub>2</sub> et des autres oxydes de l'azote. Ils jouent un rôle important dans la formation de l'ozone. Les sources principales des émissions synthétiques de NO<sub>x</sub> sont des processus à hautes températures de combustion, comme ceux produit par les automobiles et les centrales. Les radiateurs et les fourneaux à gaz de maison produisent également des NO<sub>2</sub>.

- Dioxyde de soufre SO<sub>2</sub> :

Le SO<sub>2</sub> appartient à la famille des gaz d'oxyde de soufre (SO<sub>x</sub>). Ces gaz se dissolvent facilement dans l'eau. Le soufre est répandu dans toutes les matières premières, y compris le pétrole brut, le charbon, et le minerai qui contient les métaux communs comme l'aluminium, le cuivre, le zinc, et le fer. Les gaz SO<sub>x</sub> sont formés quand les combustibles contenant du soufre, comme le charbon et le pétrole, sont brûlés, quand l'essence est extraite à partir de l'huile, ou quand des métaux sont extraits à partir du minerai. Le SO<sub>2</sub> se dissout en vapeur d'eau pour former de l'acide, et agit en interaction avec d'autres gaz et d'autres particules dans le ciel pour former les sulfates et d'autres produits qui peuvent être nocifs pour la population et leur environnement.

### 1.1.2 Polluants primaires issus de combustion incomplète

Les produits supplémentaires émis lors d'une combustion incomplète sont le monoxyde de carbone, les particules, les composés organiques, voire d'autres composés toxiques tels que les aldéhydes, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.. Voici une description de certains de ces composés :

- Monoxyde de carbone (CO) :

Le monoxyde de carbone (CO) est l'un des polluants les plus communs et le plus largement répandus. C'est un gaz sans couleur, inodore et insipide. Le monoxyde de carbone a une densité légèrement plus faible que l'air. Dans le corps humain, il réagit aisément avec de l'hémoglobine pour former la carboxyhémoglobine.

L'exposition au monoxyde de carbone est toujours l'une des causes principales d'intoxications involontaires et il cause annuellement un grand nombre de décès dans le monde.

- Particulate Matter (PM) :

« Matières particulaires » (PM) est le terme général utilisé pour caractériser le mélange de particules et de gouttelettes liquides. Les matières particulaires aéroportées représentent un mélange complexe de substances organiques et inorganiques. Quelques particules sont assez grosses ou sombres pour être vu comme la suie ou la fumée. D'autres sont si petites qu'elles peuvent être détectées seulement avec un microscope électronique.

Ces particules constituées d'un large éventail de tailles (les particules "fines" font moins de 2.5 micromètres de diamètres et les particules grossières ont un diamètre supérieur à 2.5 micromètres) proviennent aussi bien de sources stationnaires et mobiles que des sources naturelles. Les particules fines (PM<sub>2,5</sub>) résultent de la combustion de carburant des véhicules, de la production d'électricité, d'équipements industriels, ainsi que de cheminées résidentielles et de fourneaux à bois.

Les particules grossières (PM<sub>10</sub>) sont généralement émises lors de manipulations de matériaux, d'opérations de meulage, incendies, etc...

- Composés organiques volatiles et semi volatiles (COV) :

Aux températures ambiantes, plusieurs de ces composés de la fumée, ont des pressions de vapeur significatives. Certains composés sont partagés entre la phase gazeuse, liquide ou solide, à température ambiante tel que le benzène, le naphthalène, le toluène. Les feux produisent une variété de ces composés mais peu de travail de caractérisation a été fait. Les composés phénoliques sont importants parce qu'ils sont très irritants et abondamment produits à partir de l'oxydation partielle des combustibles de cellulose. Les autres composés HAP de poids moléculaire faible appartiennent à la classe des composés semi volatiles. A cause de la volatilité, et dans certains cas de la réactivité de ces composés, des protocoles spéciaux d'échantillonnage sont requis, y compris l'adsorption sur charbon, l'adsorption sur polymère poreux et l'échantillonnage de l'air total. Ces composés sont difficiles à échantillonner et des méthodes de substitution sont requises pour mettre en corrélation les expositions aux composés plus volatiles avec les composés semi-volatiles. Les gaz de méthane et de monoxyde de carbone sont souvent produits proportionnellement aux autres composés de la combustion incomplète et peuvent servir d'indicateurs d'abondance.

- Aldéhydes :

Le formaldéhyde est l'un des composés les plus abondamment produits de cette classe et est libéré proportionnellement à d'autres composés de la combustion incomplète.

L'acroléine, un autre aldéhyde, est également émis pendant la combustion incomplète des combustibles forestiers. A titre de comparaison, l'acroléine est environ dix fois plus abondante que le formaldéhyde dans la fumée des cigarettes.

- Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) :

Les HAP sont une classe de composés compris dans la fraction organique des particules fines. Certains composés HAP associés à des particules sont cancérigènes. Une publication de l'OMS (1998a) traite des effets sanitaires d'une sélection de HAP non hétérocycliques.

Les HAP incluent : l'acénaphène, l'acénaphylène, l'anthracène, le benzo[a]pyrène, le benzo[a]anthracène, le dibenzo[a,h]anthracène, le fluoranthène, le naphthalène, le phénanthrène et le pyrène. Le plus étudié des HAP est le benzo[a]pyrène B[a]P qui est une substance physiologique active qui peut contribuer au développement du cancer dans les cellules humaines.

Les composés HAP sont synthétisés à partir des fragments de carbone en de grandes structures moléculaires dans les environnements pauvres en oxygène tel que dans l'enveloppe de la flamme de la zone riche en combustible de la structure de la flamme. Si la température n'est pas adéquate pour les décomposer au sortir de la zone de la flamme, ils sont libérés dans l'atmosphère et se condensent ou sont adsorbés sur la surface des particules. Plusieurs systèmes de combustion différents produisent des composés HAP et les feux de forêts en font partie.

- Radicaux libres :

Ils sont abondamment produits au cours de la combustion des combustibles forestiers. Combien de temps ces matériaux persistent dans l'atmosphère et leur réactivité une fois en contact avec les tissus humains sont les deux sujets d'inquiétude.

La plupart des groupes de radicaux libres subissent une condensation dans les quelques secondes mises par le mélange du gaz à sortir de la flamme, ce qui réduit probablement la toxicité de la fumée. Toutefois, certains radicaux libres, persistent jusqu'à 20 minutes après leur formation et peuvent représenter un danger pour les individus exposés aux aérosols frais au voisinage de l'incendie. La partie de la matière organique qui reste active à l'état de radicaux libres est inconnue.

### **1.1.3 Polluants secondaires**

Les polluants secondaires correspondent aux substances émises à partir des polluants primaires par d'autres types de procédés chimiques tels que la photochimie. La formation des dioxines et furanes est donc favorisée lors d'une combustion incomplète, mais d'autres paramètres tels que la teneur en chlore du combustible, sa charge en métaux lourds, en cuivre notamment qui catalyse la formation de ces polluants joue également un rôle déterminant :

- L'ozone O<sub>3</sub> :

Près des incendies il n'y a pas de concentration d'ozone assez élevée pour être un sujet d'inquiétude. L'ozone est formé par réaction photochimique près du sommet des panaches de fumées sous certaines conditions de grand ensoleillement. Généralement l'ozone est formée lorsque la fumée est piégée dans des vallées ou encore lorsqu'il y a inversion de la température de l'atmosphère ou lorsque les deux conditions existent. Les pompiers travaillant à de hautes altitudes peuvent rencontrer des niveaux élevés d'ozone. Tout effort de caractérisation de l'exposition des individus aux fumées doit tenir compte des potentiels d'exposition à l'ozone quand ces individus travaillent à des altitudes proches du sommet des couches de mélanges atmosphériques.

- Dioxines :

Les feux de bois font partie des différentes sources de dioxines possibles présentes dans la nature. Les quantités calculées varient de quelques grammes par an jusqu'à plusieurs kilogrammes.

Les procédés biologiques complexes qui forment la dioxine sont tout autant intéressants. Une partie importante des mycètes qui font moisir le bois et environ la moitié des champignons utilisent des composés entraînant une chloration et une oxydation afin de scinder la lignine, le collant qui donne leur résistance à toutes les plantes. Ils le font pour atteindre la cellulose, dont ils ont besoin comme source d'énergie. Ces organismes sont très efficaces pour transformer le chlore inorganique provenant du sel en différents types de substances organiques chlorurées, surtout de méthyle, mais aussi des phénols chlorurés ou des composés semblables. Ce qui reste de ce recyclage biologique normal du bois, est une série d'acides chlorés humiques et de lignine chlorurée dans l'eau, de l'humus contenant du chlore et des phénols chlorurés dans le sol.

Des phénols chlorurés à la dioxine, le pas est rapidement franchi : il manque seulement le peroxyde d'hydrogène, qui est produit par de nombreux micro-organismes. Ceci se traduit par le fait que, exception faite de certains « points chauds », à côté de vieux incinérateurs ou d'autres sources particulièrement actives dans le passé, le contenu en dioxine le plus élevé du sol se trouve dans les *bois*.

## 1.2 Pathologies - effets observés

Les effets sanitaires les plus fréquemment observés liés à l'inhalation de fumées vont de la simple irritation des yeux et du tractus respiratoire à de plus sérieuses pathologies incluant l'asthme, les bronchites, la diminution des fonctions pulmonaires voire la mort prématurée.

Les **matières particulaires fines** provoquent (seules ou avec d'autres polluants) des effets sur les systèmes cardiovasculaires et respiratoires. Ces effets sont d'autant plus significatifs si les personnes exposées sont préalablement atteintes par des maladies respiratoires ou cardiovasculaires. De plus, les particules sont des irritants respiratoires et des études de laboratoire ont montré qu'une exposition à de fortes concentrations de PM peut conduire à l'apparition de toux persistantes et à des difficultés physiques à respirer. Les matières particulaires peuvent également altérer le système immunitaire et affecter l'excrétion de corps étrangers des poumons comme le pollen et les bactéries.

Le **monoxyde de carbone** pénètre dans le système sanguin par les poumons et réduit la distribution de l'oxygène aux organes et tissus du corps. Les risques sanitaires sont d'autant plus élevés que les personnes souffrent de maladies cardiovasculaires.

A des taux élevés, une exposition au monoxyde de carbone peut causer des maux de têtes, des visions et une diminution de la capacité de concentration et de dextérité. A de très fortes concentrations (rarement associées seulement à un feu) le CO peut être mortel.

Certains **Composés Organiques Volatiles (COV)**, en se dégradant dans l'atmosphère, contribuent à perturber les équilibres chimiques. Ces perturbations peuvent avoir pour conséquence la formation ou l'accumulation dans l'environnement de composés nocifs pour les espèces animales et végétales (ex : formation d'ozone dans la basse atmosphère).

**L'ozone (O<sub>3</sub>)** est un oxydant extrêmement réactif. Respirer de l'ozone peut déclencher une variété de problèmes de santé comprenant des toux, des irritations de gorge, et des congestions. Cela peut empirer en bronchite, emphysème, et asthme. L'exposition répétée peut de manière permanente marquer le tissu des poumons.

Les personnes en bonne santé éprouvent également des difficultés respiratoires une fois exposées à la pollution à l'ozone. Puisque l'ozone se forme par temps chaud, n'importe qui passant son temps dehors en été peut être affecté, en particulier les enfants, les ouvriers et plus généralement les personnes qui exercent à l'extérieur.

Les expositions au **SO<sub>2</sub>** et aux **particules de sulfates** :

Des niveaux élevés de SO<sub>2</sub> dans l'air peuvent engendrer des difficultés respiratoires temporaires pour les personnes souffrant d'asthme et ayant des activités extérieures. Les expositions à longs termes à des niveaux élevés de SO<sub>2</sub> (gaz et particules) engendrent des maladies respiratoires et aggravent des cas existant de problème cardiaque.

Le SO<sub>2</sub> réagit avec d'autres produits chimiques de l'air pour former des particules minuscules de sulfates. Quand elles sont respirées, elles s'associent dans les poumons et augmentent les symptômes de maladies respiratoires, les difficultés pour respirer et le risque de mort prématurée.

L'exposition aux **dioxines** est associée à un risque de lésions graves de la peau (par exemple, chloracné et hyperpigmentation), une faiblesse générale liée à la perte de poids, un changement des activités de diverses enzymes du foie, une diminution du système immunitaire et endocrinien ainsi que des anomalies du système nerveux.

L'exposition au **NO<sub>x</sub>** à court terme (moins de 3 heures) peut modifier la fonction des poumons pour les individus ayant des maladies respiratoires préexistantes et augmenter les risques de maladies respiratoires chez les enfants (de 5 à 12 ans).

L'exposition chronique au **NO<sub>2</sub>** peut mener à des infections respiratoires et peut causer des modifications des tissus des poumons. La transformation atmosphérique de NO<sub>x</sub> peut mener à la formation de particule d'ozone qui est également associé à des effets sanitaires indésirables.

Les personnes exposées aux polluants atmosphériques à des concentrations et des durées importantes ont un risque de développer un cancer ou d'avoir de sérieux problèmes de santé. Cependant, d'après les données de la littérature (WHO, « Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) »), les risques à long terme liés aux polluants atmosphériques émis par les feux de forêts sont très faibles. Certains composants de ce type de fumée comme les **hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)** sont reconnus comme cancérigènes pour l'homme. Le plus cancérigène d'entre eux est sans doute le Benzo(a)pyrène (BaP). De plus, il a été démontré que le pouvoir toxique de ce dernier augmente lorsqu'il est en mélange avec du carbone particulaire. D'autres composants, comme les aldéhydes, sont de puissants irritants. Trois autres composants toxiques sont également retrouvés lors de feux de forêts :

- **Acroléine** : c'est un composé de la famille des aldéhydes avec une odeur très caractéristique. Même à de faibles concentrations, l'acroléine peut gravement irriter les yeux et le haut du tractus respiratoire. Les symptômes liés à une exposition à ce composé sont une irritation des yeux, des nausées et des vomissements.
- **Formaldéhyde** : de faibles niveaux d'exposition peuvent causer une irritation des yeux, du nez et de la gorge. De plus hauts niveaux sont responsables d'irritations localisées dans la région respiratoire inférieure. Des expositions à long terme sont associées au développement de cancers nasopharyngiaux.
- **Benzène** : il peut causer des maux de têtes, des nausées, des difficultés à respirer et est un cancérigène avéré pour l'homme. Le benzène peut provoquer des anémies, des lésions du foie et des reins ainsi que des cancers.

Toute personne exposée à la fumée résultant de feux de forêts ne développera pas systématiquement de problèmes de santé. Le niveau, l'ampleur et la durée de l'exposition, l'âge, la sensibilité individuelle et bien d'autres facteurs jouent un rôle significatif dans l'occurrence d'effets sanitaires.

Aussi, pour la majorité des polluants atmosphériques générés par les feux de forêt, les effets associés chez l'homme sont relativement similaires. Il s'agit pour la plupart des composés d'effets respiratoires. Il apparaît donc difficile de pouvoir associer les effets sanitaires observés à un type ou une famille de polluants en particulier.

## 1.3 Facteurs influençant l'impact sanitaire

### 1.3.1 Facteurs environnementaux influençant le potentiel toxique

#### 1.3.1.1 Influence de la composition et de la combustion du bois

La manière dont le bois se consume est essentielle car il en découle une combustion complète ou incomplète associée à l'émission de différents polluants (présentés dans la première partie de l'étude) :

- ✓ Une combustion complète émet principalement du **dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau** et dans de plus faibles quantités les composés suivants : **des oxydes d'azote, du dioxyde soufre, des cendres**, des éléments traces : **métaux lourds** notamment.
- ✓ Les produits supplémentaires émis lors d'une combustion incomplète sont le **monoxyde de carbone, les particules, les composés organiques, l'ozone**, voire d'autres composés toxiques tels que les **aldéhydes, les dioxines et furanes, les hydrocarbures aromatiques polycycliques**, etc.

- *Composition du bois*

La cellulose ( $C_5H_{10}O_5$ )<sub>x</sub>, x variant entre 1000 et 10000, est le constituant principal du bois. Le bois est ensuite constitué de lignine, d'hémicellulose, de protéines, de résines, de tanins, de colorants, etc. Le tableau 1 présente ces constituants. Le tableau 2 détaille la composition chimique (en pourcentage de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de cendres) de certaines essences de bois sec.

Cellulose	50 %
Lignine	25 %
Hémicellulose	15 %
Produits solubles	5 %
Minéraux	< 1 %

**Tableau 1 : Principaux constituants du bois**

	<b>C%</b>	<b>H%</b>	<b>O%</b>	<b>N%</b>	<b>Cendres</b>
<b>Hêtre</b>	49.06	6.11	44.17	0.09	0.57
<b>Bouleau</b>	48.88	6.06	44.67	0.10	0.29
<b>Frêne</b>	49.18	6.27	43.19	0.07	0.57
<b>Peuplier</b>	49.37	6.21	41.60	0.96	1.86
<b>Pin</b>	50.31	6.20	43.08	0.04	0.37
<b>Orme</b>	48.99	6.20	44.25	0.06	0.50
<b>Sapin</b>	52.30	6.30	40.50	0.10	0.80
<b>Chêne</b>	50.16	6.02	43.26	0.09	0.37

**Tableau 2 : Composition chimique de différentes essences de bois sec**

En conséquence, la masse majoritaire d'un échantillon de bois sec est essentiellement constituée de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, d'un faible pourcentage de composés azotés (0.04 à 0.96% du poids sec) provenant des protéines et de quelques éléments minéraux présents en très faible quantité. Par comparaison aux autres combustibles solides, le bois contient de faibles quantités de composés soufrés (0.02%). Du chlore est présent en quantité extrêmement faible (0.001 à 0.03%). Des éléments traces tels que cuivre, manganèse et zinc sont également présents à des teneurs inférieures à 100 ppm.

- *Facteurs affectant la combustion*

Les principaux facteurs affectant la combustion sont les suivants :

- **l'humidité du bois** : avec un bois sec (20% d'humidité maximum), il est plus aisé d'obtenir une combustion complète. Si le taux d'humidité est trop fort, le feu est refroidi par l'importante quantité de vapeur d'eau générée qui entraîne une diminution de l'efficacité de la combustion et une augmentation des émissions d'imbrûlés. L'allure (puissance réelle/puissance nominale) : ce paramètre joue un rôle important. Si l'allure est trop faible, la température nécessaire à une bonne combustion ne sera jamais atteinte ; si elle est trop forte, la combustion ne pourra être complète, il y aura alors formation d'imbrûlés,
- **la taille du bois** : si les morceaux de bois sont petits, le processus de dégazage et d'inflammation est très rapide, on obtient une bonne flamme de bois, même pour des bois humides. Si les morceaux de bois sont de grandes dimensions, le processus de combustion se poursuit par couche successive. Les matières volatiles et l'eau proviennent des couches de plus en plus profondes, tandis que simultanément une couche isolante de charbon de bois de plus en plus épaisse se forme à la surface de la bûche. Les matières gazeuses s'échappent ainsi par les pores et les fentes du bois en formant de petits jets et une couche de gaz autour des bûches. L'effet de tirage naturel autour des bûches fournit de l'air à leur partie inférieure et un mélange de gaz et d'air pollué à leur partie supérieure. L'air est d'autant plus pollué par les fumées que le charbon de bois formé à la partie inférieure de la bûche brûle mieux. Le mélange des gaz combustibles avec l'air s'effectue dans les fumées, ce qui rend la combustion des gaz difficile et ceci d'autant plus si la turbulence locale et la température des flammes sont faibles,
- **l'essence du bois** : l'essence joue également un rôle sur la combustion et donc l'émission de polluants. Un bois tendre génère plus d'hydrocarbures qu'un bois dur,
- **la température** : une température importante dans la zone de combustion favorisera les réactions chimiques et permet une combustion complète.

### **1.3.1.2 Les différents types de végétations**

Comme décrits précédemment, tous les feux de forêts ne produisent pas les mêmes types de polluants. En effet, les incendies sont fonction de la nature du sol et de la végétation qui le recouvre de même que les polluants dégagés (différentes essences d'arbres, température...). Ainsi une liste fournie en annexe 1 énumère les différents types de végétation où ont déjà eu lieu des incendies ainsi que les différents combustibles susceptibles de développer les feux de végétation.

### **1.3.1.3 Facteurs météorologiques : le vent**

Les connaissances météorologiques (surtout concernant le vent : force, direction) sont importantes lors d'un incendie de forêt car la dispersion du panache de fumées peut avoir un impact sanitaire important pour deux raisons essentielles :

- les populations sont plus exposées aux produits toxiques lorsqu'elles se trouvent sous le panache de fumée,
- l'apparition ou la transformation de certains produits ont lieu lors de leur transport.

- *Orientation du panache*

Par mesure de précaution, il apparaît judicieux dans les régions à risque d'essayer d'identifier l'orientation du panache pour qu'en cas d'incendie majeur, les populations ne se trouvent pas exposées directement aux éléments nocifs qu'il est susceptible de contenir.

Une fois que l'incendie a atteint le seuil qui provoque une action d'urgence de grande envergure, un composant critique de celle-ci sera de fournir les renseignements sur les endroits situés sous le vent des incendies, qui risquent de subir l'impact des émissions et si possible, les renseignements sur les concentrations de pollution.

Il sera donc intéressant de connaître les trajectoires des panaches de fumée pour des hauteurs spécifiques ainsi que la surface de déposition.

- *Transformation des composés de combustion durant leur propagation*

Après leur formation, le mélange hautement dynamique des composés de la combustion est transporté à partir de la source d'émission. Durant le transport la composition chimique, les caractères physiques et la concentration dans l'air des composés changent. Le temps de résidence dans l'air des composés de combustion dépend de la nature des procédés qu'ils subissent et varient avec les secondes ou les minutes jusqu'aux jours ou semaines.

Les aérosols sont formés soit par les émissions primaires (généralement solides) ou secondaires (généralement liquides). Les particules les plus grosses, ayant un diamètre aérodynamique d'un micromètre ou plus, sont surtout produites par procédés primaires (dont les procédés mécaniques), et sont ôtées de l'atmosphère par sédimentation. Par exemple, à une distance de 20km d'un grand incendie, alors que la concentration des particules inférieures à un micron augmente considérablement, celle des particules plus grosses ne subit aucun accroissement, ce qui prouve que ces particules ont disparu du panache d'air pendant le transport sur cette distance (Morawska et al., 1998).

Les petites particules sont transformées surtout par agglomération et condensation et sont ôtées de l'air par agglomération en particules plus grosses ou par lavage des pluies durant les précipitations. La distribution des particules varie durant le processus de transport : les particules du mode nucléique (taille comprise entre quelques nanomètres et des dizaines de nanomètres) se transforment en mode d'accumulation (taille inférieure à un micron), tandis que les particules grossières sont enlevées de l'air par décantation. Les variations sont plus rapides immédiatement après que les particules sont générées, et ralentissent à mesure que la concentration des particules diminue par dilution ou par transformation. Les temps de résidence des particules dans l'air varient considérablement, et pour de très grosses particules, ils peuvent être de l'ordre des minutes, alors que les particules plus petites qu'un micron, peuvent rester dans l'air pendant des semaines, selon les conditions météorologiques.

Dans la troposphère, ces particules peuvent même persister des années (Sous-comité des particules atmosphériques, 1979). La distribution de taille des particules est importante pour l'estimation des risques sanitaires car il existe de grandes probabilités pour que les petites particules se déposent dans les parties profondes de l'appareil respiratoire.

La durée de vie des composés chimiques émis dans l'atmosphère par brûlage de végétation varie considérablement. Pour plusieurs espèces, le facteur le plus important qui contrôle les variations après leur formation est la transformation/destruction par le radical OH (hydroxyle). Les **hydrocarbures non-méthaniques** tels que les alcènes C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> sont typiquement perdus par réaction avec les radicaux OH en quelques heures, alors que la perte des C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> alcanes a lieu après quelques jours ou quelques semaines.

Le **monoxyde de carbone** a une durée de vie de 2 à 3 mois, alors que celle du **CH<sub>4</sub>** est d'environ dix ans. Les **oxydes d'azote** sont convertis en HNO<sub>3</sub> après quelques heures.

Un nombre de composés (exemple: **formaldéhyde HCHO**) sont produits par l'oxydation photochimique des espèces déjà mentionnées (ce qui est intéressant du point de vue santé publique). La durée de vie atmosphérique du **HCHO** est d'environ une heure. Les temps de résidence des gaz émis dans les panaches de fumées des incendies de forêts peuvent être estimés à partir d'autres études. Les taux de transformation/destruction sont généralement mesurés au cours d'expériences de laboratoire et quelques exemples de ces mesures sont donnés par De More et al (1997). Les temps de résidence des hydrocarbures peuvent varier de très courts (quelques jours) à très longs par exemple 7.3 années pour le méthane. Le tableau ci-dessous donne les temps de résidence caractéristiques dans la basse troposphère pour des densités de OH de  $10^6$  par  $\text{cm}^3$ .

Espèces	Temps de résidence (années)	Référence
<b>CH<sub>4</sub></b>	7.3	Miller et al (1998)
<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>	0.04	Ehhalt et al (1998)
<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	0.19	Colman et al (1998)
<b>CH<sub>3</sub>Cl</b>	1.26	Colman et al (1998)
<b>CO</b>	0.25	Colman et al (1998)
<b>NO</b>	0.035	Koike et al (1996)
<b>O<sub>3</sub></b>	0.044	Davis et al (1996)
<b>Aérosols</b>	0.02	Baker et al (1979)

**Tableau 3 : Temps de résidence de certaines espèces chimiques pour des densités de OH de  $10^6$  par  $\text{cm}^3$**

L'**ozone** est produit dans le sens du vent des feux de végétation sur une période de quelques heures par action de photolyse sur les hydrocarbures et  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) à condition qu'il y ait assez de radiation ultraviolette pour faire démarrer les réactions d'oxydation. Dans les panaches de fumées denses, l'ozone serait produit plus rapidement dans les couches supérieures du panache.

Les panaches de fumées des feux de végétation peuvent voyager de 500 à 1000 kilomètres et plus en quelques jours (Browall et al 1996). Par exemple, à la vitesse du vent étant de 4 m par seconde, un panache pourrait couvrir 480 km en 5 jours. Les panaches peuvent évidemment voyager plus longtemps que 5 jours. Au cours d'une autre mission de la NASA dans le Pacifique sud, à la fin de 1996, on a trouvé des panaches qui avaient plus de 20 jours (Blake et al, 1999). Ainsi, quelques espèces moléculaires n'auraient subi aucune variation, alors que les concentrations d'autres auraient subi une réduction importante.

#### **1.3.1.4 Ajout à la pollution atmosphérique en milieu urbain (phénomène de bruit de fond)**

Les feux de forêts, notamment ceux incontrôlés, sont une source importante de pollution de l'air dans les zones urbaines et rurales. Aussi, ils affectent les systèmes de santé, l'accès aux soins et accélèrent les changements et la dégradation rapide de l'environnement. Les feux de forêts augmentent également la pollution de l'air urbain et la pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments (qui est liée à la combustion du bois et du charbon pour la cuisine et le chauffage). Les fumées des feux de végétation masquent parfois même la pollution de l'air urbain et les niveaux d'exposition sont intermédiaires entre la pollution de l'air ambiant et la pollution de l'air à l'intérieur des habitations. Ils augmentent les risques d'infections respiratoires aiguës chez les enfants, qui sont une cause majeure de mortalité infantile dans les pays en voie de développement. La santé des femmes notamment est affectée par la pollution des feux de forêts alors qu'elles sont déjà exposées à des niveaux élevés de pollution de l'air à l'intérieur des habitations. Dans la mesure où la santé est étroitement dépendante d'un environnement physique salubre, il est nécessaire de traiter la dimension globale du problème des feux de forêts.

#### **1.3.2 Populations sensibles (“Wildfire Smoke: A guide for public health officials”, 2001 Department of Environmental Health)**

La plupart des adultes en bonne santé se remettent rapidement d'une exposition aux émissions des feux de forêt. De plus, les conséquences sur leur santé à long terme sont à priori négligeables. Cependant certaines populations plus sensibles peuvent connaître des symptômes chroniques accrus.

##### **✓ Personnes asthmatiques ou atteintes d'une maladie respiratoire :**

Un niveau de pollution élevé peut ne pas affecter une personne sans problème respiratoire. Pourtant pour une personne ayant de l'asthme, cela peut entraîner une inflammation ou obstruction des voies respiratoires.

##### **✓ Personnes atteintes de maladies cardio-vasculaires :**

La pollution particulaire augmente le taux d'attaque cardiaque et les symptômes de ce type de maladies. D'autres études montrent que cette pollution a des effets sur le système nerveux.

##### **✓ Personnes âgées :**

Chaque année des personnes âgées meurent prématurément des suites d'une exposition à l'émission de particules dans l'air. Cela est en partie dû au fait que ces personnes sont plus sujettes à développer des maladies pulmonaires et cardiaques.

De plus, leur mécanisme de défense respiratoire est diminué avec l'âge. Ces personnes ont alors plus de difficultés à éliminer les particules entrant dans leurs poumons. Les particules peuvent augmenter la possibilité de développer des infections bactériennes ou virales.

✓ **Enfants :**

Leurs poumons n'étant pas encore totalement développés, les enfants peuvent être considérés comme des personnes sensibles en cas d'incendie de forêt. De plus, comparés à des adultes, les enfants passent plus de temps à l'extérieur. Ils passent environ 3 heures par jour en activités extérieures. Des études montrent que la pollution particulaire a une influence sur l'augmentation des symptômes respiratoires chez les enfants. Elle pourrait en effet être responsable d'une détérioration prématurée des fonctions respiratoires, ce qui peut se traduire par l'apparition de toussotements et de difficultés à respirer.

✓ **Fumeurs :**

Les personnes fumant endommagent leurs voies respiratoires. L'exposition aux émissions de fumées d'incendies peut aggraver leur situation. Différents symptômes peuvent alors se manifester : toussotements, troubles de la respiration...

## **2 EVALUATION DE L'EXPOSITION DES POPULATIONS**

### **2.1 Méthodologies d'évaluation des expositions**

D'une manière générale, il existe deux méthodes pour la détermination des effets sur la santé de l'exposition à la pollution de l'air. La première consiste à estimer la contamination de l'environnement par les divers polluants émis lors des feux de forêt ainsi que le budget espace temps des populations susceptibles d'être exposées. La deuxième méthode consiste à définir des indicateurs biologiques et à les mesurer sur la population exposée. Les types de modèles d'études épidémiologiques sur la pollution de l'air sont très variables et incluent : des études d'exposition contrôlée à court terme (études en chambres), des études d'exposition à court terme et des études d'exposition à long terme. Cette section va se concentrer sur les deux derniers types, qui reflètent l'approche épidémiologique typique du problème de l'exposition à la pollution de l'air. Durant une urgence, cependant, il peut être nécessaire de déterminer les besoins immédiats dans une communauté exposée aux fumées des feux de végétation.

Devant cette situation, les autorités sanitaires doivent conduire une rapide évaluation de l'impact sanitaire qui met l'accent sur les données démographiques et les préoccupations de santé de la population dans la communauté affectée. Une composante importante d'un plan de santé publique qui traite des expositions relatives à la pollution est un système de surveillance qui contrôle les maladies respiratoires et cardio-vasculaires.

### **2.1.1 Mesure de la contamination et détermination du budget espace temps**

- **Mesure de la contamination**

- ✓ ***Méthodes utilisées pour mesurer les polluants***

- **Le contrôle au sol**

Le contrôle au sol de la qualité de l'air et les images fournies par télédétection permettent d'estimer les concentrations de polluants atmosphériques des fumées causées par les feux de végétation. Le contrôle de la qualité de l'air au sol doit viser à fournir des éléments d'information pour l'alarme de santé publique, pour décider des mesures de protection, pour les modèles de dispersion, leur vérification et leur développement et pour les études sur la santé des êtres humains et l'évaluation des effets des fumées.

Le contrôle de la qualité de l'air doit être effectué régulièrement dans les zones urbaines les plus importantes ainsi que dans les zones peuplées soumises à l'influence probable de la combustion des biomasses. En outre, des stations doivent être localisées en zones rurales pour mesurer les concentrations de fond.

Il est également possible d'échantillonner l'air respiré en réalisant des mesures dans les logements. Bien que ce type d'échantillonnage donne les meilleures et les plus précieuses données, il n'est pas pratiqué dans les études d'envergure.

- **Les données satellites**

Elles sont disponibles pour le contrôle des feux et des aérosols de fumées c'est-à-dire à l'Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace (NASA) ou à l'Administration Nationale Océanique et Atmosphérique (NOAA) des Etats Unis d'Amérique.

Les images fournies par satellites donnent des informations sur la sécheresse de la végétation, la localisation et l'ampleur des incendies majeurs et des panaches de fumées, l'énergie libérée par ces feux ainsi que les polluants atmosphériques de ces panaches de fumées.

✓ **Produits et particules mesurés**

➤ Matières particulaires ( $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$ )

La tendance actuelle est d'obtenir plus de données sur la fraction des particules fines. La fraction des particules grossières peut contenir des poussières provenant du vent qui transporte de la terre ou du sable, qui peuvent affecter la visibilité mais qui ont un effet relativement faible sur la santé humaine. La fraction des particules fines semble être le meilleur indicateur des fumées de feux transportées.

➤ Monoxyde de carbone et Ozone

Le monoxyde de carbone est un indicateur de la combustion incomplète et peut être un substitut utile pour mesurer l'exposition aux fumées. Les niveaux d'ozone peuvent s'accroître en association avec les feux de végétation, mais ces niveaux augmentent d'une manière insignifiante, comparés aux niveaux de pollution par les particules. La mesure des niveaux d'ozone ne doit pas faire partie d'un indicateur de santé publique à une urgence d'incendie de végétation.

➤ Composés organiques volatiles (COV)

Ils peuvent servir de repères à l'exposition aux polluants provoqués par un incendie. Cependant, ils sont utiles seulement comme outil de recherche, et les mesures de COV ne doivent pas faire partie d'indicateurs de santé publique à une urgence d'incendie de végétation.

• **Budget espaces-temps**

L'objectif du budget espace temps est d'établir l'emploi du temps de la population afin de connaître d'une manière générale le temps passé à l'intérieur et à l'extérieur des habitations.

Dans les pays les plus développés et dans plusieurs pays en développement, plus de 90% du temps est passé dans des milieux intérieurs. Cette proportion peut varier quelque peu à travers le monde.

## **2.1.2 Les indicateurs biologiques**

Les indicateurs biologiques d'exposition déterminent les concentrations de polluants contenus dans l'organisme : on parle de dose interne.

Il sera possible d'obtenir des échantillons de sang et de les analyser pour rechercher des composés utilisés comme indicateurs d'une récente exposition. Il peut s'agir par exemple des COV.

## **2.2 Type d'exposition**

### **2.2.1 Expositions aiguës**

L'exposition aux incendies de forêt se faisant essentiellement à court terme (caractère temporaire de l'incendie), la discussion portera donc essentiellement sur les effets lors d'une exposition aiguë.

### **2.2.2 Expositions chroniques**

Les effets sur la santé dus à l'exposition chronique aux polluants de l'air peuvent inclure la mortalité, les taux d'hospitalisation, les taux de maladies (tel que maladies cardiaques et cancer du poumon) et les diminutions des fonctions pulmonaires. Par contraste, les études liées à l'exposition épisodique aux feux de végétation mettent l'accent sur les expositions aiguës. C'est pourquoi, les études relatives aux feux de végétation sur le long terme ne peuvent porter que sur un impact sanitaire chronique et non pas sur une exposition chronique.

## 3 EVALUATION DES EFFETS SANITAIRES

### 3.1 Méthodologie d'évaluation des effets sanitaires

#### 3.1.1 Justification de l'utilisation de données épidémiologiques plutôt que d'une méthodologie d'évaluation des risques

Afin d'estimer l'impact sanitaire sur les populations exposées à la pollution atmosphérique engendrée par les feux de forêt, nous avons choisi de nous baser sur les résultats d'études épidémiologiques. Il n'existe pas en effet dans la littérature de données relatives à l'évaluation des risques pour ce type d'exposition.

Une solution pour adopter une démarche d'évaluation des risques aurait pu consister à utiliser des données relatives à la pollution atmosphérique urbaine (qui a été largement plus étudiée) et de les transposer à un cas de pollution atmosphérique résultant de feux de forêt.

Cette technique n'a pas été retenue pour plusieurs raisons :

- aucune étude ne prouve que la fumée dégagée par les feux de forêt ait le même impact sanitaire sur les populations exposées que la pollution atmosphérique urbaine typique,
- les agents chimiques présents dans les particules émises lors de feux de forêt ne sont pas tous identiques à ceux présents dans les particules relatives à la pollution atmosphérique urbaine,
- les niveaux de concentrations des substances émises dans l'atmosphère lors d'un feu de forêt et également typique d'une pollution atmosphérique urbaine sont beaucoup plus élevés,
- la nature même de l'exposition est différente pour ces deux types de pollution. La pollution atmosphérique urbaine caractérisée par des niveaux de concentrations faibles va induire des effets à long terme, il s'agit donc majoritairement d'une exposition de type chronique. A l'inverse, la pollution atmosphérique engendrée par les feux de forêt se caractérise par des pics de concentration de forte intensité mais de faible durée induisant des effets majoritairement à court terme. Il s'agit donc dans ce cas d'une exposition de type aiguë,

- il est particulièrement difficile d'attribuer un effet sanitaire à une substance en particulier (approche substance par substance dans la méthodologie d'évaluation des risques). Les composants émis à l'atmosphérique lors d'un feu de forêt sont relativement complexes et variables et peuvent également interagir entre eux et ainsi provoquer des effets sanitaires qu'il sera impossible d'attribuer à une substance en particulier.

Pour l'ensemble de ces raisons et l'absence de données concernant une méthodologie d'évaluation des risques pour ce type d'exposition, l'approche épidémiologique a été retenue.

### **3.1.2 Effets attendus**

#### **✓ Cas des expositions aiguës :**

Les effets sur la santé peuvent inclure le décès, l'hospitalisation, l'aggravation de maladies, l'aggravation des maladies préexistantes, des symptômes tels qu'une diminution des fonctions pulmonaires.

#### **✓ Cas des expositions chroniques :**

Les études liées à l'exposition épisodique aux feux de végétation mettent l'accent sur les expositions aiguës. C'est pourquoi, les études relatives aux feux de végétation sur le long terme ne peuvent porter que sur un impact sanitaire chronique et non pas sur une exposition chronique. Les effets recensés sur le long terme concernent principalement :

- *Les maladies pulmonaires*

Les effets sur la santé de l'inhalation des fumées de la biomasse ont été documentés dans les pays en développement, où les femmes passent plusieurs heures à faire la cuisine devant des poêles à bois non ventilés, à l'intérieur des habitations. Ces études indiquent que l'exposition aux fumées de la biomasse est associée au développement des maladies pulmonaires chroniques chez les adultes ( Sandoval et al.1993 ; Dennis et al. 1996 ; Perez-Padilla et al. 1996). Comme ces expositions sont plus élevées que celles qui se produiraient à la suite d'une exposition à court terme aux fumées de la biomasse des feux de végétation, des comparaisons directes sont difficiles à faire. Ces études mettent en évidence les conséquences sérieuses sur le long terme de l'exposition à des niveaux élevés de fumées de la biomasse.

En particulier, le développement des maladies pulmonaires chroniques chez les adultes est associé à une mortalité prématurée et une morbidité importante.

- *Le cancer*

Les études évoquent invariablement que la pollution de l'air ambiant, résultant de la combustion des carburants fossiles, est associée aux taux croissants de cancer du poumon.

Deux études de cohortes prospectives récentes ont montré un accroissement de 30 à 50% des cas de cancer du poumon associé à l'exposition aux particules inhalables, qui sont un mélange complexe provenant des gaz d'échappement du diesel, du charbon, de l'essence et du brûlage du bois. L'excédent de risque de cancer du poumon, dû à la pollution de l'air ambiant (risque relatif de 1.0 à 1.6), est faible, par rapport à celui de la tabagie (risque relatif de 7 à 22). Il est par contre comparable au risque associé à l'exposition à long terme aux fumées de tabac dans l'environnement (risque relatif de 1.0 à 1.5) (Cohen et Pope 1995 ; Cohen et al. 1997).

Les données limitées sur les fumées de la biomasse et le cancer n'indiquent aucun accroissement de risque, même à des niveaux d'exposition très élevés. Ce témoignage provient également des études à long terme d'exposition à des niveaux élevés de fumées de la biomasse provenant des cuisines domestiques dans les pays en développement. L'évidence pour une relation entre les particules de pollution d'air urbain et le cancer du poumon est également limitée mais suggère un léger accroissement du risque. Il n'y a pas eu suffisamment d'études pour évaluer la cohérence de tout accroissement de risque pour différentes sources de particules. Cependant, tandis que les fumées de la biomasse sont manifestement et potentiellement cancérigènes, elles le sont beaucoup moins que les gaz d'échappement des véhicules à moteur ( Lewis et al. 1998 ; Lewtas et al. 1992 ; Cuppit et al. 1994).

### **3.1.3 Types d'études utilisées**

- ✓ **Cas des expositions aiguës :**

- **Etudes de corrélation**

Ces modèles d'études se concentrent à étudier les taux de mortalité ou d'hospitalisation soit pour des maladies spécifiques ou l'ensemble des maladies. Le prototype dans cette catégorie est l'étude des décès dans l'épisode du smog de Londres de 1952.

- Etudes de séries chronologiques

Plusieurs études de séries chronologiques ont été publiées, ces dernières années. Elles ont mis l'accent sur l'effet des particules sur la mortalité liées aux maladies cardiovasculaires et respiratoires et sur l'hospitalisation due aux maladies telles que l'asthme, la pneumonie, les maladies pulmonaires d'obstruction chronique, les maladies coronariennes et les arrêts cardiaques. Ces types d'études se révèlent analytiquement très compliqués.

- Etudes de cohortes ou de suivi

Elles mettent en évidence les symptômes engendrés par une exposition liée à la pollution atmosphérique et l'aggravation des maladies ou de la fonction pulmonaire en particulier.

- Etudes Focus-groupes

Elles mesurent les données (débit maximum, utilisation des broncho-dilatateurs, symptômes asthmatiques, contrôle personnel) dans un petit groupe de personnes (par exemple, personnes souffrant d'asthme) sur une période relativement courte. De telles études dépendent surtout de l'auto déclaration et peuvent représenter des défis analytiques.

✓ **Cas des expositions chroniques :**

- Etudes écologiques basées sur la population

Dans ces études, l'exposition spécifique d'un individu n'est pas connue, mais l'exposition des communautés l'est. Le but de ces études est d'examiner les résultats (les taux de mortalité à long terme et les taux de maladies) dans les zones où les niveaux de pollution d'air sont très différents. Les résultats importants dans ces types d'études sont l'examen des facteurs d'incertitude et l'assurance de la qualité des données.

- Etudes de cohortes

Ces études suivent des groupes de sujets sur lesquels des données de base (sexe, âge, relation par rapport au tabac, profession, présence de maladies préexistantes, etc.) sont collectées. Ces groupes sont suivis dans le temps pour chercher les devenir tels que la mortalité, le développement de maladies cardio-pulmonaires, et la diminution des fonctions pulmonaires. Alors que ces études peuvent produire des données très importantes dans une population bien définie, elles sont limitées du fait qu'elles sont coûteuses et difficile à exécuter.

- Etudes de contrôle de cas

Ces études prennent pour échantillon des individus avec un problème de santé chronique et spécifique (tel que le développement de maladies chroniques d'obstruction pulmonaire, de cancer des poumons ou d'arrêt cardiaque) et des individus témoins non atteints.

L'exposition antérieure des individus aux polluants et aux autres facteurs est ensuite recherchée. Les limites de ces études résident dans les difficultés à évaluer les expositions rétrospectives.

### **3.2 Effets sanitaires par exposition aux feux de forêts d'après des études épidémiologiques**

Cette partie a pour but d'évaluer l'impact sanitaire des populations exposées à la pollution atmosphérique engendrée par les feux de forêt.

La méthodologie employée dans les études sélectionnées pour évaluer les impacts ainsi que les résultats obtenus dans ces dernières seront présentés.

#### **3.2.1 Méthodologie adoptée dans les études de cas retenues**

Trois études tirées de la littérature ont été retenues pour estimer l'impact sanitaire sur les populations exposées à la pollution atmosphérique engendrée par les feux de forêt. Le choix de ces études s'est fait pour la diversité des données fournies ainsi pour la méthodologie utilisée et les objectifs atteints.

Ces documents sont les suivants :

- « Etude des effets sanitaires liés aux feux de forêt parmi les résidents de la réserve nationale Indienne de la vallée de Hoopa ». Cette étude a été réalisée en 1999 par le CDC Epidemic Aid. Une synthèse de cette étude est présentée en annexe 2.
- « Détermination de l'exposition sous les vents et des effets sanitaires associés, évaluation des effets sanitaires dans la pratique : étude de cas sur les feux de forêt de 1997 en Indonésie ». Cette étude rédigée par le Ministère de la Santé au Japon, est issue d'un document de l'OMS et a servi de base à la conférence de Lima au Pérou (du 6 au 9 octobre 1998) relative aux «guides sanitaires liés événements de feux de végétation ». Une synthèse de cette étude est présentée en annexe 3.

- « Caractérisation des émissions de fumées et évaluation des risques sanitaires relatifs à la qualité de l'air – étude de cas, Thaïlande ». Cette étude rédigée par l'Institut de Recherche sur la Santé en Thaïlande, est également issue d'un document de l'OMS et a servi de base à la conférence de Lima au Pérou (du 6 au 9 octobre 1998) relative aux « guides sanitaires liés événements de feux de végétation ». Une synthèse de cette étude est présentée en annexe 4.

Le tableau suivant présente les objectifs de chaque étude, la méthodologie employée pour évaluer l'impact sanitaire sur les populations exposées ainsi que leurs avantages et leurs limites.

	<b>Objectifs</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>Avantages</b>	<b>Limites</b>
<b>Vallée de Hoopa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluer l'impact sanitaire</li> <li>- Déterminer l'incidence des effets en fonction de l'état de santé de la personne</li> <li>- Evaluer l'incidence de mesures de protection sur les effets observés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elaboration d'un questionnaire</li> <li>- Sélection d'un échantillon de la population pour laquelle des données sont disponibles</li> <li>- Stratification (personnes atteintes ou non de maladies cardiovasculaires ou respiratoire avant l'incendie)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluer l'efficacité des campagnes de prévention mises en place</li> <li>- Connaître précisément les caractéristiques de la population d'étude</li> <li>- Evaluer les effets sanitaires majeurs et les populations les plus à risque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de prise en compte de la mortalité</li> <li>- Echantillonnage non établi au hasard</li> <li>- Pas de quantification de la quantité de fumées inhalées</li> <li>- Puissance statistique faible</li> </ul>
<b>Indonésie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déterminer la qualité de l'air</li> <li>- Evaluer l'impact sanitaire</li> <li>- Déterminer la perception qu'on les personnes exposées des fumées</li> <li>- Connaître leurs comportements</li> <li>- Estimer le nombre de morts prématurés attendus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campagne de mesures</li> <li>- Elaboration d'un questionnaire</li> <li>- Sélection d'un échantillon de la population</li> <li>- Quantification du nombre de décès attendus à partir de données issues de la pollution atmosphérique urbaine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suivre l'état de santé général de la population</li> <li>- Corréler les résultats d'analyses avec les effets observés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimation de la mortalité par une méthode discutable</li> <li>- Pas d'utilisation des données d'admission dans les hôpitaux</li> <li>- Utilisation unique du questionnaire sur un petit échantillon de la population</li> </ul>
<b>Thaïlande</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caractériser les émissions de fumées</li> <li>- Evaluer l'impact sanitaire</li> <li>- Evaluer les relations entre les changements météorologiques, la qualité de l'air et les impacts sanitaires dans le but de mettre en place des mesures préventives</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recueil des données météorologiques</li> <li>- Campagnes de mesures</li> <li>- Etude au niveau régional et local</li> <li>- Utilisation des données des hôpitaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suivre l'état de santé général de la population</li> <li>- Corréler les taux d'admissions et de consultations aux données météorologiques et analytiques</li> <li>- Déterminer l'impact des fumées en terme d'admission et de consultation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de mise en commun des données à l'échelle locale</li> <li>- Restriction aux seules données des hôpitaux pour certaines maladies</li> <li>- Pas de prise en compte des caractéristiques de la population d'étude</li> </ul>

**Tableau 4 : Objectifs des études retenues, méthodologie employée et avantages et limites**

### **3.2.2 Résultats obtenus dans chaque étude**

#### **3.2.2.1 Le cas de la Vallée de Hoopa**

Cette étude est basée sur les résultats de données collectées auprès de la population de la réserve Indienne suite à l'élaboration d'un questionnaire d'enquête et à la sélection d'un échantillon de 298 personnes.

Les résultats des effets sanitaires observés sur la population et mis en évidence dans cette étude sont les suivants :

- 60% des participants ont vu leurs problèmes respiratoires augmenter pendant les émanations de fumées,
- deux semaines après l'épisode de fumées, 20% des personnes se plaignaient encore de problèmes respiratoires persistants,
- 75% de la population d'étude présentait des symptômes d'irritation pendant les incendies,
- il existe une relation significative entre les émissions atmosphériques des fumées et les symptômes d'irritation observés dans la population,
- les participants déjà atteints par des maladies respiratoires ou cardiovasculaires ont vu se développer des problèmes plus sérieux.

#### **3.2.2.2 Le cas Indonésien**

Cette étude est basée sur les résultats de données collectées auprès de la population locale suite à l'élaboration d'un questionnaire d'enquête et à la sélection d'un échantillon de la population (539 personnes).

Les résultats en terme d'effets sanitaires observés dans la population sélectionnée sont succinctement présentés ci-dessous :

- 91,1% des participants ont déclaré souffrir de symptômes respiratoires,
- les participants âgés de 16 à 59 ans ont développé un nombre de symptôme significativement plus élevé que les autres classes d'âges,
- les participants âgés de plus de 60 ans ont développé des pathologies plus graves,
- les personnes préalablement atteintes d'asthme, de bronchites ou de maladies cardiaques présentaient également un plus haut taux de manifestation de symptômes.

Concernant la perception des fumées, 83,3% des participants se sont sentis menacés par les fumées et 60,5% d'entre eux ont voulu évacuer la ville vers des endroits moins contaminés par les fumées.

Une estimation du nombre de morts prématurés attendus a également été calculée en utilisant des données relatives à l'exposition aiguë aux  $PM_{10}$  obtenues à partir d'études épidémiologiques relatives à la pollution atmosphérique urbaine. Le nombre de morts attendus calculé est de 30,789.

Cependant le nombre de morts réellement attribuable aux feux de forêt reste inconnu étant donné le peu de documentation disponible et le manque de données relatives aux causes de la mort.

### **3.2.2.3 Le cas Thaïlandais**

Deux études ont été menées conjointement en Thaïlande Méridionale, la première au niveau régional, qui concerne toute la région sud de la Thaïlande, et la seconde au niveau local, relative à la ville de Hatyai.

Dans les deux cas, les études présentent les données statistiques de santé rassemblées et analysées en terme de consultation et d'admission à l'hôpital, de surveillance de la qualité de l'air, et des conditions météorologiques locales.

#### **- Résultats de l'étude de l'impact sanitaire au niveau régional**

Cette étude a permis de mettre en évidence une augmentation significative du taux d'admission (de 7%) et de consultations (de 8%) pour maladies respiratoires pour la période de septembre à octobre 1997 en Thaïlande Méridionale par rapport à une région témoin non affectée par les fumées.

Des analyses statistiques par régression ont montré des associations significatives entre :

- Les admissions pour maladies respiratoires et le taux de  $PM_{10}$ ,
- Les admissions pour pneumonies et le taux d'humidité relative.

#### **- Résultats de l'étude de l'impact sanitaire au niveau local**

Cette étude a permis de mettre en évidence pendant la période de deux mois couvrant l'épisode de fumées, entre septembre et octobre 1997, une augmentation significative des consultations pour maladies respiratoires et des admissions pour bronchites dans la ville d'Hatyai.

Des analyses statistiques par régressions ont également été menées et ont montré des associations significatives entre le nombre d'admissions pour maladies respiratoires et le taux de  $PM_{10}$ .

Une étude sur la mortalité a également mis en évidence une augmentation du nombre de décès par maladies respiratoires pendant l'épisode de fumées. Cependant, cette association est statistiquement non significative.

Les résultats de ces deux études menées dans une même région mais à des niveaux d'études différents restent en adéquation les uns par rapport aux autres.

## 4 GESTION DU RISQUE

### 4.1 Méthodologie de gestion des risques préconisée par l'OMS

Dans beaucoup de pays, les cas répétés de fumées provenant d'incendies de forêt, qui entraînent des problèmes respiratoires aigus et à long terme, nécessitent la mise en place d'une stratégie globale. Cette stratégie a été largement inspirée des préconisations présentées par l'OMS et l'étude épidémiologique établie en Indonésie en 1997. Elle inclue :

- la capacité de détection rapide, à l'échelon planétaire, des situations d'urgences dues à des incendies de forêt incontrôlés,
- le recueil de données de surveillance utiles et fiables et la surveillance médicale,
- la diffusion des informations à toutes les parties concernées, pour une prise de décision adéquate,
- l'élaboration de plans nationaux en matière d'environnement et de santé, basés sur une directive internationale, pour faire face aux situations d'urgences provoquées par les incendies de forêt.

Il faut prendre en compte les aspects environnementaux tout comme les aspects liés à la santé, les relations de causes à effets, le transport des polluants sur de longues distances. Dans ce but d'éliminer les effets environnementaux, sociaux et économiques néfastes des incendies de forêt, une politique globale de gestion doit être mise en place.

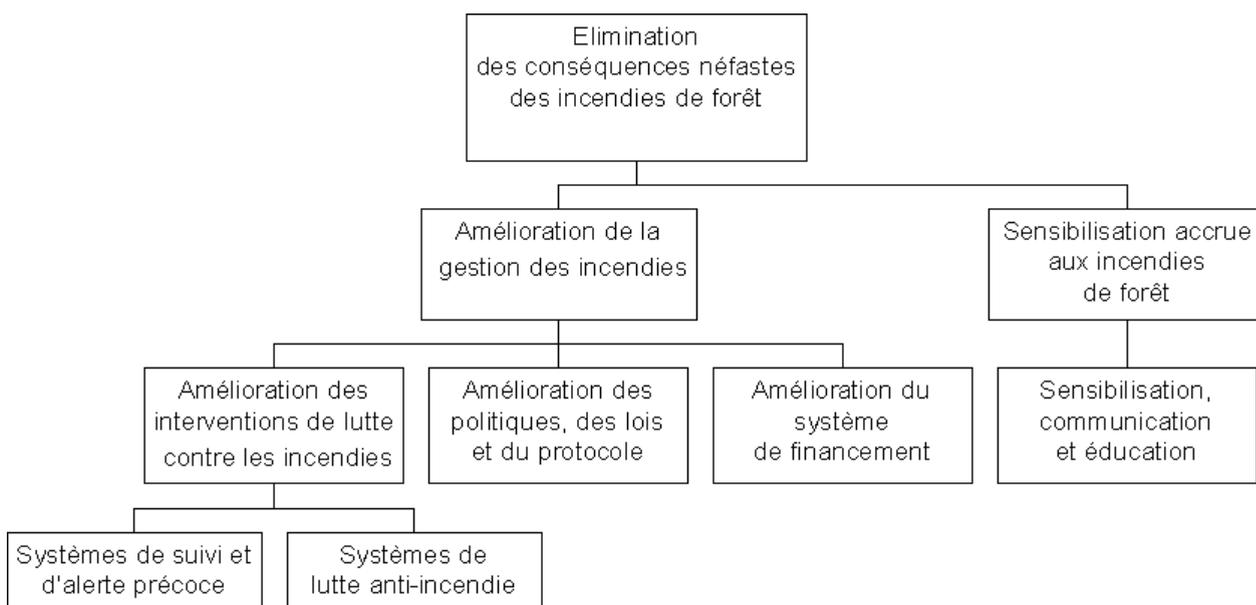


Figure 1 : gestion des incendies.

Les objectifs globaux de cette politique seraient de :

- Prévenir et contrôler le feu des champs et des forêts et la pollution de l'air qui en résulte,
- Prévenir et contrôler la pollution de l'air transfrontalière,
- Atténuer et minimiser l'impact sur l'environnement et la santé des incendies de forêts,
- Sauvegarder la santé publique et la sécurité.

Ainsi, des mesures de gestion simples peuvent être mises en place :

- Donner au public et aux autorités les renseignements sur la qualité de l'air et les actions prises,
- Promouvoir la sensibilisation, l'éducation et la réaction du public,
- Assurer des services médicaux et sanitaires adéquats.

### **Information au public :**

Comme les particules fines sont les principaux polluants provenant des feux de végétations, la mesure des concentrations de particules doit être utilisée pour établir les directives relatives aux incendies de végétation, afin de refléter directement leurs effets sur la santé. Ces particules sont sujettes au transport à longue distance et transfrontalier, ce qui entraîne un accroissement à court terme des niveaux de matières particulaires dans les zones affectées. La mesure des concentrations de particules doit être utilisée pour établir les directives relatives aux incendies de végétation, afin de refléter directement leurs effets sur la santé.

En pratique, il peut être établi des niveaux de matières particulaires (PM<sub>10</sub>) ayant une relation avec les effets sur la santé, ainsi que des conseils au public et des activités d'atténuation des effets. Par exemple, trois niveaux au-dessus du niveau de base normal tels que léger (Alerte), modéré (Avertissement) et grave (Urgence) pourraient être développés.

### **Étapes proposées :**

Chacun des plans d'action qui suivent, suggère que les individus restent à l'intérieur des bâtiments pour réduire leur exposition aux fumées. Dans les maisons mal isolées, pleines de courants d'air et avec un taux élevé d'échange d'air, cette recommandation peut offrir une faible protection contre l'exposition aux fumées.

### **Niveau 1, Alerte**

Tous les individus atteints d'une maladie des poumons ou du cœur devraient essayer de rester à l'intérieur des bâtiments avec portes et fenêtres fermées. Ils doivent éviter les efforts excessifs et l'exposition aux fumées de tabac et autres irritants respiratoires.

Les personnes qui doivent prendre régulièrement des médicaments doivent s'assurer qu'ils disposent d'une provision d'au moins cinq jours.

Les individus atteints de maladies chroniques doivent contacter leur médecin pour prendre conseil, sans se soucier de l'apparition des symptômes.

Tous les autres doivent contacter un médecin en cas d'apparition d'un symptôme parmi les suivants : maux de tête, toux répétée, poitrine oppressée ou douloureuse, sifflement respiratoire, flegme excessif, difficulté de respiration et nausée. Tous les individus doivent éviter les activités violentes à l'extérieur des bâtiments.

## **Niveau 2, Avertissement**

Toutes les actions du niveau 1 sont aussi valables pour le niveau 2. En plus, les individus avec des conditions chroniques respiratoires ou cardiaques doivent être évacués en toute sécurité vers des environnements libres de fumées. De tels environnements peuvent être loin de la zone d'émissions de fumées d'incendie ou des sites "propres" à l'intérieur de la zone tels que des habitations équipées de fenêtres et de portes étanches et avec un équipement approprié pour la filtration de l'air intérieur. Tous les autres individus doivent demeurer à l'intérieur avec portes et fenêtres fermées, éviter des efforts excessifs et l'exposition à la fumée de cigarette et aux autres irritants respiratoires.

## **Niveaux 3, Urgence. Conditions de fumées denses**

Les individus en bonne santé qui ont choisi de rester dans la zone d'émissions de fumées doivent être avisés de rester à l'intérieur, de garder les portes et les fenêtres fermées, de réduire leurs activités, de s'abstenir de fumer et d'économiser l'énergie. Les personnes qui se sentent mal doivent être avisées de quitter la zone ou d'aller vers un endroit dont l'air est sain. Les pourvoyeurs de soins de santé doivent également reloger les individus ayant des problèmes respiratoires et/ou cardiaques, les personnes âgées, les personnes infirmes et les jeunes enfants vers des endroits à "air propre". Ceci doit être fait après un dépistage rigoureux. On doit veiller à garder les familles unies. Le retour des personnes relogées doit avoir lieu sitôt que les conditions de fumées le permettent.

Ces différents niveaux d'alerte peuvent être diffusés par les médias (presse écrite, radio, télévision), affichage en mairie, pharmacie, médecin...

## 4.2 Politique de prévention et de lutte en France

### 4.2.1 Les moyens de surveillance

#### 4.2.1.1 Les moyens de surveillance de la végétation :

L'état de la végétation permet d'estimer le risque incendie. Le nombre de départs de feu est lié en partie au degré de sécheresse des végétaux. Sur le terrain, les forestiers effectuent régulièrement des tests sur des échantillons représentatifs de la forêt pour en déterminer la teneur en eau. Seulement ce système est long et coûteux, aussi, depuis quelques années, les images satellites et plus particulièrement les images du satellite français Spot sont utilisées pour l'étude et le suivi des forêts. Elles permettent d'accéder à la connaissance très précise de l'occupation du sol à l'échelle régionale. Combinées à d'autres bases de données dans un Système d'Information Géographique (SIG), elles apportent des informations indispensables pour une meilleure gestion du territoire. En utilisant les images de ce satellite avec des données météorologiques et l'expérience des hommes de terrain, des coupes feux peuvent être judicieusement mis en place. Les programmes d'entretien et de protection des espaces ont un suivi plus fiable.

#### 4.2.1.2 Les moyens de surveillance des conditions climatiques :

La météorologie nationale peut prévoir l'évolution des différents paramètres favorisant les incendies : température, direction et force de vent, précipitations. Les mesures et les calculs faits sur ces paramètres permettent de dresser la carte du risque d'incendie et de donner des avis sur son importance, par zones géographiques. La définition des indices de risque est donnée dans le tableau suivant :

<b>vitesse du vent (v) en km/h</b>	<b>&lt;20</b>	<b>20&lt;v&lt;40</b>	<b>&gt;40</b>
<b>Sécheresse :</b>			
<b>nulle</b>	0	0	0
<b>assez forte</b>	1	1	2
<b>forte</b>	1	2	3
<b>très forte</b>	1	2	3

Ces informations permettent aux moyens de surveillance et de lutte d'organiser leur dispositif en fonction de l'intensité du risque et d'assurer en cas de nécessité, un quadrillage préventif du terrain, avant tout départ d'incendie. Si un incendie se propage, la prévision de la force du vent permet aussi de faire des hypothèses sur la progression du feu.

## 4.2.2 Les politiques de prévention

### ➤ *La surveillance des massifs forestiers :*

Aujourd'hui, la lutte contre les feux de forêts repose sur la mobilisation préventive des moyens d'intervention et sur une évaluation quotidienne et précise du risque. L'objectif est de détecter au plus tôt les départs de feux de façon à pouvoir intervenir le plus rapidement possible sur les feux naissants, dans un délai inférieur à 10 minutes. Cet objectif devient une priorité absolue lorsque le risque météorologique est élevé. Le système repose sur :

- L'évaluation quotidienne d'un niveau de risque à partir des prévisions météorologiques.
- La mobilisation préventive. En situation de risque très sévère un ensemble important de personnes et de moyens matériels est placé au plus près des zones forestières. Chaque département dispose, sous l'autorité du préfet, d'un plan de surveillance qui combine l'observation à poste fixe (tours de guet) ou mobiles (patrouilles terrestres) et l'observation aérienne (avion léger de reconnaissance).

### ➤ *Un meilleur entretien de la forêt :*

La présence d'une broussaille basse, desséchée en été et très combustible, est particulièrement favorable au départ et à l'extension des feux. **La loi de 1966 fait obligation aux propriétaires de débroussailler jusqu'à 50 mètres des habitations;** par ailleurs, elle autorise l'administration à débroussailler les terrains privés sur une largeur de 50 mètres de part et d'autre des voies publiques. Cette loi a été complétée par les dispositions plus contraignantes de la loi de 1985. Par ailleurs, en 1989, une aide publique importante a été mise en place, sous la forme d'un fonds de préfinancement des débroussailllements.

### ➤ *La sensibilisation du public :*

La prévention primaire repose sur l'information et la formation du public, en particulier des habitants, des résidents secondaires et des touristes. Cette sensibilisation demeure néanmoins insuffisante. Sans oublier les agriculteurs, les éleveurs et les forestiers, car dans bien des cas, les activités traditionnelles du monde rural sont aussi à l'origine des départs de feu.

Les imprudences de toutes sortes provoquent plus d'un feu sur deux. Malgré tout, le maintien d'une activité agricole, pastorale et forestière, constitue la meilleure des préventions. Selon les statistiques, 9 feux sur 10 sont dus à l'homme et à ses activités. Les trois quarts des mises à feu dont l'origine est connue ont la même cause directe d'imprudence. Les actions de formation, d'éducation et de sensibilisation sont donc essentielles pour la prévention.

Le but de la formation est de faire adopter à un public bien précis un "comportement préventif" dans son domaine d'action :

- Les élus locaux, souvent en charge de la maîtrise d'ouvrage des travaux et responsables de la mise en œuvre de la réglementation correspondante,
- Les agriculteurs et les entrepreneurs forestiers, appelés à intégrer le risque de mise à feu dans leurs pratiques professionnelles,
- Les propriétaires riverains des massifs forestiers qui doivent s'interdire le moindre feu en saison à risque et respecter la réglementation.

L'éducation s'adresse aux jeunes en âge scolaire, particulièrement réceptifs aux impératifs de la protection de la nature. Par la sensibilisation, on tente également de toucher des publics peu réceptifs et ceux qui ne sont que de passage dans les zones à risques, les touristes notamment.

### **4.2.3 Politique de lutte**

#### ***4.2.3.1 Une lutte départementalisée***

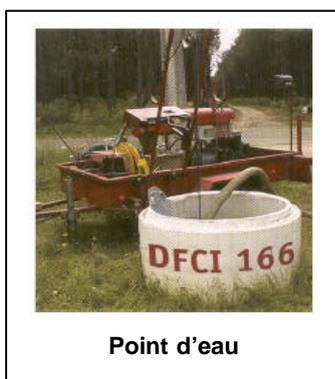
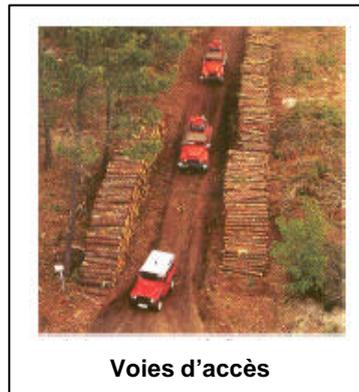
La France est le pays d'Europe qui consacre le plus de moyens, proportionnellement à la surface directement exposée, pour lutter contre les incendies de forêts. Selon les régions, l'organisation varie quelque peu. Dans tous les cas, la tendance est à la départementalisation des moyens de secours et à leur coordination au travers d'un centre opérationnel départemental d'incendie et de secours (CODIS). Chaque département dispose d'un ordre général d'opérations. Ce document détaille les moyens et l'organisation propres au département. Il définit les procédures à employer et rappelle les missions principales. Il est réactualisé chaque année. Dans tous les cas, chaque fois que l'incendie menace des zones habitées ou aménagées, la mission prioritaire est la protection des personnes et des biens. La protection de la forêt n'est possible que lorsque les moyens disponibles sont en nombre suffisant pour assurer la totalité des missions ou lorsque le sinistre ne concerne que des zones boisées dépourvues de tout enjeu autre que forestier.

#### 4.2.3.2 Les moyens nationaux d'intervention

Les avions sont fréquemment les premiers sur les lieux de l'incendie, grâce au dispositif de surveillance appelé « guet aérien armé ». Il appartient alors aux moyens terrestres d'exploiter leurs largages et d'achever l'extinction. Dans les autres cas, les moyens aériens appuient l'action des équipes au sol.

La stratégie générale de lutte contre l'incendie repose sur la rapidité d'intervention des pompiers sur un foyer. Outre une détection rapide des feux, ceci suppose de permettre l'accès des camions en un lieu quelconque du massif et de disposer de point de ravitaillement en eau, nombreux et bien répartis. La nature des travaux à effectuer découle de ces impératifs

Un nombre important de pistes, chemins d'exploitation et pare-feu permettent de quadriller efficacement les zones à risques majeurs d'incendie. Des ponts, passages busés et ponceaux permettent l'accès en forêt et facilitent l'intervention des engins de lutte. Un débroussaillage autour des zones urbanisées permet de protéger celles-ci.



Les différentes zones à risque doivent être équipée de nombreux points d'eau créé la plupart du temps par forage grâce à une nappe phréatique proche de la surface du sol. Le but recherché dans la création de ces points d'eau est de permettre aux véhicules de lutte, équipés de citernes, de pouvoir se ravitailler aisément et rapidement sans avoir à parcourir des distances trop grandes. La réalisation de points d'eau naturels est envisageable par la construction des réserves d'eau soit au sol, soit surélevées.

Les **plans de prévention des risques naturels prévisibles** (PPR) créés par la loi du 2 février 1995 ont intégré le risque feu de forêt. Ces plans ont des incidences fortes en matière d'urbanisme à travers l'intégration des prescriptions dans le PLU.

#### **4.2.3.3 La nécessité d'un outil spécifique : objectifs et rôle du PPR**

Le PPR permet de délimiter les zones concernées par les risques et d'y prescrire des mesures de prévention. Il couvre plusieurs domaines de risque. C'est le document de référence pour la prise en compte des risques naturels dans l'aménagement, le document de synthèse en matière d'urbanisme demeurant le plan local d'urbanisme.

Lorsque le PLU prend en compte de manière satisfaisante l'existence des risques naturels, le PPR le complète et pérennise ses mesures. Si les risques naturels ne sont pas pris en compte dans les PLU, soit parce qu'il les ignore, soit parce qu'il en tient insuffisamment compte, le PPR en est alors le complément indispensable.

Enfin le PPR vient en complément des documents de gestion de la forêt. Il peut rendre obligatoire certaines mesures de prévention, de protection et de sauvegarde.

#### **4.2.3.4 Les territoires concernés**

L'analyse du nombre de départs de feu et des surfaces brûlées ramenées aux surfaces forestières permet de mettre en avant certains départements situés dans différentes régions.

Pour identifier les communes ou les communautés de communes dans lesquelles l'établissement d'un PPR peut se justifier, la priorité sera donnée à celles présentant à la fois des niveaux d'aléas et d'enjeux élevés. Ces derniers s'appréhendent au travers de plusieurs critères, utilisés isolément ou combinés entre eux :

- des zones caractérisées par des prédispositions naturelles que l'on peut mettre en évidence à l'aide de cartes climatiques, de cartes de l'inventaire forestier national, etc.
- des communes où, historiquement, les incendies de forêts ont toujours représenté une menace importante,
- des communes où le développement de l'urbanisation et la présence d'habitat dispersé ont multiplié les zones d'interface habitat-forêt et ont donc augmenté les probabilités de départ de feu,
- des communes où le développement rapide des activités a conduit à une augmentation importante des installations humaines exposées au risque d'incendie,
- des communes où le phénomène de déprise agricole a entraîné une fermeture des milieux et par conséquent une sensibilité au feu plus forte.

## 5 DISCUSSION

Du fait d'effets attendus peu spécifiques des polluants issus des incendies de forêt, d'effets aigus et de risques individuels élevés, la seule démarche envisageable est celle d'études épidémiologiques. En effet, dans le domaine des risques environnementaux, l'évaluation de l'impact sanitaire est confronté au fait que les pathologies liées aux expositions environnementales sont multifactorielles et donc peu spécifiques de ces expositions. L'épidémiologie permet de relier une source particulière (fumée émises par les feux de forêts) à un impact sur la population.

Mais la difficulté de mesure des expositions est délicate et les inévitables erreurs de classification (des exposés classés non exposés et vice versa) affectent la puissance des études épidémiologiques, c'est à dire leur aptitude à détecter une association existante. L'épidémiologie doit être appliquée de manière pertinente selon le calendrier des événements considérés.

Concernant les effets susceptibles de se produire maintenant ou plus tard dans la population du fait d'expositions passées ou présentes, la démarche d'évaluation des risques permet d'estimer un ordre de grandeur du nombre de cas attendu pour une substance considérée. Une évaluation des risques requiert notamment de connaître : les dangers liés aux polluants émis ; les relations entre les doses reçues et les effets sanitaires (relations dose-réponse, valeurs toxicologiques de référence). Cependant, cette démarche ne permettra pas de prendre en compte l'interaction entre les substances et les effets associés.

Dans le cas des incendies de forêts, il a donc été jugé plus intéressant de se tourner vers les études épidémiologiques.

### 5.1 Discussion sur la méthodologie employée dans les études retenues

Deux des études retenues (Vallée de Hoopa et Indonésie) ont choisi d'adopter une stratégie de recueil d'information sur l'état de la population pendant la période d'incendie à partir d'un questionnaire d'enquête. Dans les deux cas, l'échantillon de la population sélectionné reste de très petite taille par rapport à la population réellement exposée, ce qui implique une faible puissance statistique pour chacune des études.

Pour l'étude menée en Thaïlande, aucun questionnaire n'a été élaboré auprès de la population. Le recueil des données concernant l'état de santé de la population a été effectué auprès des hôpitaux et a concerné le nombre d'admissions et de consultations essentiellement pour maladies respiratoires.

Ces deux stratégies d'études et de recueil des données ont permis dans tous les cas de suivre l'état de santé général de la population pendant la période de feux.

Cependant, pour l'étude menée dans la vallée de Hoopa, il n'a pas été mis en évidence de corrélation entre le taux de fumées ou de contaminants traceurs (comme les PM<sub>10</sub>) présents dans les fumées et les effets sanitaires observés. En effet, pour cette étude, aucune quantification de la quantité de fumées inhalée ou de la concentration en polluants de l'air n'a été effectuée.

Lorsqu'on s'attache à évaluer les effets sanitaires liés à la pollution atmosphérique engendrée par les feux de forêt, il apparaît donc important de :

- s'intéresser aux effets observés dans la population,
- pouvoir corrélérer ces effets à des résultats de campagnes de mesures sur la pollution en elle-même.

Ce travail est nécessaire à l'estimation de l'incidence des effets des fumées sur la santé des populations exposées.

Aussi, les deux stratégies utilisées (enquête auprès d'un échantillon de la population et données des hôpitaux) mériteraient d'être étudiées en parallèle car chacune d'entre elle ne va pas délivrer le même type d'information.

Dans des pays comme l'Indonésie ou la Thaïlande, il est clair que ne prendre en compte que les données des hôpitaux ne permet pas une représentation objective de l'état de santé de la population. Une partie des personnes exposées notamment celle vivant à l'extérieur des villes et celle disposant de faibles moyens financiers ne sera pas représentée dans les hôpitaux. Et pourtant, étant donné le manque d'accès aux soins et aux mesures préventives de ces personnes, elles sont probablement plus affectées lors d'épisodes de pollution atmosphérique liés aux feux de forêt.

Dans ce cas, une enquête auprès d'un échantillon représentatif de la population exposée permettrait de pallier au manque de données concernant ces personnes.

Les enquêtes effectuées auprès d'un échantillon de la population permettent de prendre en compte le ressenti des personnes exposées par rapport aux épisodes de pollution atmosphérique. Il est également possible à partir de questionnaires d'enquête de savoir si les éventuelles mesures préventives mises en place contre ce type d'évènement sont efficaces et adoptées par la population.

A l'inverse, l'utilisation des données des hôpitaux permet de connaître avec précision les pathologies engendrées par les fumées dégagées lors de feux de forêt. Ainsi, une association entre les taux de polluants mesurés et les pathologies observées peut être effectuée. De même, il est plus concevable d'évaluer le nombre de morts attribuable aux feux de forêt par cette méthode, bien que tous les décès n'ai pas lieu à l'hôpital et n'y soient pas recensés.

## **5.2 Discussion sur les résultats obtenus dans les études sélectionnées**

Seule l'étude réalisée en Thaïlande a permis d'établir un lien entre des indicateurs de la pollution atmosphérique (ex : taux de  $PM_{10}$ ) et l'augmentation de certaines maladies, notamment respiratoires. Pour les deux autres études, les résultats mis en évidence s'attachent à décrire l'état de santé d'un échantillon de la population. Ces résultats sont exprimés en terme de quantification de l'augmentation de symptômes qui pourraient être associés à la présence de fumées.

Le fait de pouvoir prouver une association statistiquement significative entre l'augmentation d'un indicateur de pollution atmosphérique lié aux feux de forêt et le développement de maladies respiratoires, peut constituer un élément important dans la gestion des risques.

En effet, le suivi de la concentration de cet indicateur peut permettre, en cas d'incendie, de prévoir l'augmentation de certains symptômes et d'adopter les mesures préventives nécessaires (consignes de sécurité, distribution de masques...) dès qu'un seuil d'alerte pour l'indicateur est dépassé.

Pour les études menées sur la base d'enquête auprès d'un échantillon de la population, aucune association de ce type n'aurait pu être mise en évidence. En effet, l'utilisation même d'un questionnaire ne permet pas de connaître le taux moyen de maladies respiratoires par exemple et donc de quantifier l'augmentation de ces maladies liées à la pollution atmosphérique engendrée par les fumées.

Cependant, les résultats mis en évidence par ce type d'étude permettent une meilleure prise en compte des populations sensibles. En effet, l'échantillon de la population choisi pour chacune des études a été stratifié en fonction de la spécificité des personnes (âge, préexistence de maladies respiratoires ou cardiovasculaires).

Aucune des études menées ne prend en compte les effets sanitaires à long terme engendrés par les feux de forêt. Ce type d'étude mériterait donc d'être développé afin de savoir s'il existe des effets à long terme sur les populations exposés et de connaître ces effets.

### **5.3 Discussion sur les moyens mis en œuvre pour gérer les risques**

La gestion du risque incendie a pour objectif de réduire et si possible d'éliminer les effets environnementaux et sanitaires. Il a été établi qu'un système de surveillance basé sur un indicateur aiderait à prendre les mesures d'alerte. Il a semblé être plus pertinent d'utiliser comme indicateur les particules  $PM_{10}$  pour définir les seuils d'alerte.

Or, dans le cas présent, l'exposition est multifactorielle. Se restreindre à l'utilisation d'un seul composé pour déterminer les niveaux d'alerte ne peut être aussi fiable que si on avait pris deux ou trois indicateurs. Il est aussi évident que l'utilisation de plusieurs indicateurs peut être plus intéressante mais aussi plus compliquée dans la mise en pratique.

On aurait pu par exemple considérer la mise en place de la détection des COV. Mais tous les systèmes de surveillance de la qualité de l'air ne sont pas équipés pour la mesure des COV. Les COV sont composés d'une multitude d'éléments ce qui rend leur utilisation comme indicateur plus difficile.

Dans la mesure où les particules fines se déplacent facilement sur de longue distance et qu'elles ont un impact sur la santé, elles peuvent être considérées comme un indicateur d'intérêt. Ces polluants viennent s'ajouter au bruit de fond engendré par la pollution atmosphérique urbaine. D'autre part, une étude épidémiologique (Thaïlande, 1997) a établi l'existence d'une relation dose effet entre l'augmentation de particules  $PM_{10}$  dû aux incendies et l'augmentation de problèmes respiratoires.

L'utilisation de particules  $PM_{10}$  comme indicateur vis-à-vis des émissions liées aux incendies semble donc le plus pertinent. De plus, les systèmes de qualité de l'air mesurent déjà cet indicateur.

## CONCLUSION

Les incendies de forêts émettent divers polluants pouvant affecter la santé des populations. Ces composés de nature primaire ou secondaire peuvent provenir de combustion complète ou incomplète. La combustion influe sur la nature des émissions ainsi que sur les effets sanitaires engendrés. D'autres facteurs sont à prendre en considération tel que le contexte météorologique et le type de forêt.

De part le caractère temporaire de l'incendie, les expositions aux fumées sont considérées d'une manière générale comme aiguës. Les populations exposées aux incendies ont développé des problèmes respiratoires et irritations diverses. Il a été établi comme pertinent d'utiliser les études épidémiologiques pour associer les émissions de fumées à ces effets sanitaires.

Une relation significative a été définie entre les émissions atmosphériques des fumées et les symptômes respiratoires ou d'irritation pendant les incendies pour l'étude réalisée dans la vallée de Hoopa. En ce qui concerne l'étude thaïlandaise, les analyses statistiques par régression ont montré une association significative entre les taux d'admissions pour maladies respiratoires et taux de  $PM_{10}$  émis lors de l'incendie. L'analyse de ces études a montré la nécessité de s'intéresser aux effets observés dans la population et de corrélérer ces effets à des résultats de campagne de mesures. Les différentes études épidémiologiques se penchent sur les effets à court terme, il serait judicieux d'étudier les effets à long terme.

Le fait de pouvoir prouver une association statistiquement significative entre un indicateur de pollution ( $PM_{10}$ ) et l'apparition de problèmes respiratoires peut constituer un élément important dans la gestion des risques. Le suivi de cet indicateur pourra permettre de mettre en place rapidement des mesures de prévention et protection des populations.

L'OMS préconise des mesures de prévention et gestions du risque qui sont à priori appliquées dans les pays concernés par les incendies. Au niveau français, la réduction du risque à la source semble être la stratégie de gestion adoptée.

L'utilisation de retardateurs pour éviter la propagation des feux est largement utilisée. Mais les constituants de ces types de produits sont susceptibles de provoquer des effets sanitaires non négligeables. Des études pourront être menées pour évaluer l'impact des retardateurs sur la santé des populations directement exposées.

---

## Bibliographie

---

Nigel J. Tapper G. Dale Hess, "Forest fire emissions dispersion modelling for emergency response planning : determination of critical model inputs and processes", 1999, disponible sur le site : [www.who.int](http://www.who.int).

Osamu Kunii, "Basic facts - Determining downwind exposures and their associated health effects, assessment of health effects in practice : a case study in the 1997 forest fire in Indonesia", 1999, disponible sur le site : [www.who.int](http://www.who.int).

Johann G. Goldammer, "Les incendies dans le monde", Global Fire Monitoring Center, 1999.

Josephine Malilay, "A review of factors affecting the human health impacts of air pollutants from forest fires", 1999, disponible sur le site : [www.who.int](http://www.who.int).

OMS, "Feux de végétation", août 2000, disponible sur le site : [www.who.int](http://www.who.int).

V. Ferlay-Ferrand, C. Picard, C. Prim, "Approche toxicologique des fumées de feux de forêts", urgence pratique, 1998.

WHO , "Health Guidelines for Vegetation Fire Events ", Lima, Peru, 6-9 October 1998.

Joshua A. Mott, "Health effects associated with Forest Fires among residents of the Hoopa Valley National Indian Reservation: report of findings from the CDC Epidemic Aid # 2000-09", septembre 2000, disponible sur le site : <http://depts.washington.edu/wildfire/>.

Tony J. Ward and Garon C. Smith, "Air Sampling Study of the 2000 Montana Wildfire Season", 2000, disponible sur le site: <http://depts.washington.edu/wildfire/>.

OMS, « Directives de santé pour les feux de végétation », disponible sur [www.who.int](http://www.who.int).

Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, « Plans de prévention des risques naturels (PPR) risques d'incendies de forêt ».

Université de Cergy-Pontoise, UFR des sciences humaines, département de géographie,  
« Etude comparée des incendies de forêts et de leurs préventions dans les départements  
du var et des landes », Aude BRANKA, juin 2001.

WHO, « Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) », Regional Office for Europe,  
Copenhagen, Denmark, 2000.

Department of Environmental Health, "Wildfire Smoke: A guide for public health officials",  
2001, disponible sur : <http://depts.washington.edu/wildfire/resources/pubhealthguide.pdf>.

---

## Liste des annexes

---

Annexe 1 : Les différents types de végétation.

Annexe 2 : Etude des effets sanitaires liés aux feux de forêt parmi les résidents de la réserve nationale Indienne de la vallée de Hoopa.

Annexe 3 : Détermination de l'exposition sous les vents et des effets sanitaires associés, évaluation des effets sanitaires dans la pratique : étude de cas sur les feux de forêt de 1997 en Indonésie.

Annexe 4 : Caractérisation des émissions de fumées et évaluation des risques sanitaires relatifs à la qualité de l'air.