

Les sources anthropiques de polluants



Mécanismes

Fiche détaillée

Niveau ★☆☆

(A partir de la 4ème)

Les principales sources anthropiques (d'origine humaine) sont les combustions : combustibles fossiles ou combustions de biomasse. Des sources additionnelles de polluants sont dues à diverses activités telles que les industries, l'agriculture, l'élevage, le stockage et l'incinération des déchets.

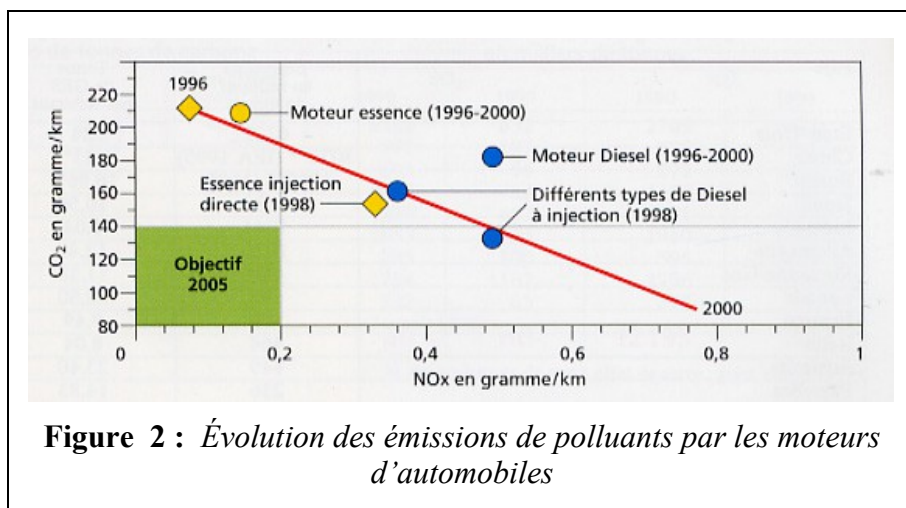
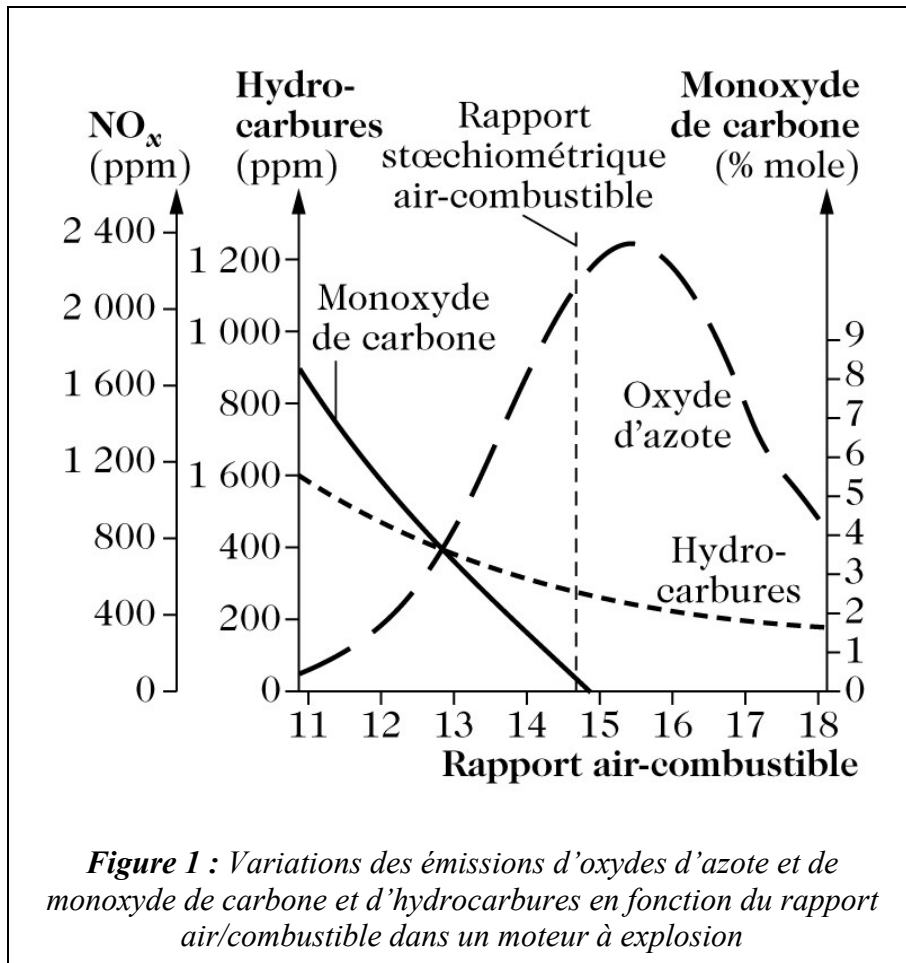
I. Les combustibles fossiles

Les émissions de polluants dans l'atmosphère dues à la combustion des combustibles fossiles, charbon, pétrole et gaz naturel interviennent dans de nombreux secteurs d'activités. Les principaux sont les transports, surtout terrestres mais aussi maritime et aérien, et la production d'énergie. Le chauffage urbain, les activités industrielles, et agricoles et diverses activités des secteurs industriel et tertiaire sont aussi directement consommatrices de combustibles fossiles en tant que source d'énergie, mais leur ordre de grandeur est plus faible que les deux premières.

La combustion des combustibles fossiles produit essentiellement du dioxyde de carbone contribuant à l'effet de serre additionnel à travers le déstockage et l'injection dans l'atmosphère de carbone fossile. Actuellement, environ 6,5 à 7 GT de carbone sont brûlés annuellement, sous forme de charbon, pétrole et dérivés, et gaz naturel. Plus des trois quarts de la consommation interviennent dans les pays industrialisés de l'hémisphère nord, en raison d'une consommation d'énergie par habitant bien supérieure à celle des pays de l'hémisphère sud : 8 tonnes d'équivalent pétrole par an et par habitant ($\text{tep}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{hab}^{-1}$) en Amérique du Nord, $4 \text{ tep}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{hab}^{-1}$ en Europe, à comparer aux $0,4 \text{ tep}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{hab}^{-1}$ en Afrique, par exemple.

Si une combustion (oxydation) parfaite (complète) transforme le carbone en dioxyde de carbone, la plupart des combustions sont incomplètes et conduisent à l'émission de composés gazeux autres que le CO_2 (dont du monoxyde de carbone, CO), ainsi qu'à l'émission de particules contenant une proportion importante de carbone suie et de carbone organique (dont des composés organiques volatils, COV). Les polluants gazeux émis comprennent également des composés soufrés et azotés, qui résultent de l'oxydation des molécules de soufre et d'azote contenus dans les carburants solides, liquides ou gazeux. Les quantités émises dépendent du type de combustible, de la qualité de la combustion et de la masse relative d'azote et de soufre dans le combustible. Dans les moteurs à explosion, une proportion significative des oxydes d'azote produits provient de l'azote de l'air, par rupture à haute température des liaisons moléculaires du diazote et du dioxygène.

Les émissions de polluants varient également en fonction de la qualité de la combustion, notamment en fonction du combustible. Dans un moteur à explosion, les émissions d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone décroissent lorsque le rapport air/combustible augmente. En revanche, les émissions d'oxydes d'azote augmentent jusqu'à une valeur de l'ordre de 16 du rapport air/combustible, avant de diminuer. Les émissions de polluants par la combustion des combustibles fossiles dépendent donc de la nature du combustible, et du secteur d'activité : sources stationnaires (chauffage, industries) ou mobiles (transports routiers, ferroviaires, maritimes, fluviaux et aériens). Elles dépendent en fin du type de technologie utilisé.



Les émissions de gaz à effet de serre par exemple mais aussi celle des autres polluants dépendent fortement de la nature du combustible ; le charbon étant le plus polluant, non seulement pour le CO₂, mais aussi pour les autres composés comme le SO₂, le CO ou les hydrocarbures.



Figure 3 : En France, c'est le secteur des transports qui est le plus gros producteur de gaz à effet de serre devant l'industrie, le résidentiel et tertiaire et l'agriculture. Le secteur de l'énergie arrive ensuite car plus de 80% de l'énergie électrique produite est d'origine nucléaire, mais la France est atypique dans ce domaine. (d'après C. Ducroux et P. Jean Baptiste 2004)

Les combustibles fossiles sont majoritairement consommés dans les pays industrialisés de l'hémisphère Nord. Si on fait un parallèle entre l'abondance de la production d'énergie électrique et sa consommation la figure 4 qui est une image satellite composite dans le visible de nuit montre bien les principales régions de (sur)consommation d'énergie fossile révélées par l'éclairage nocturne.

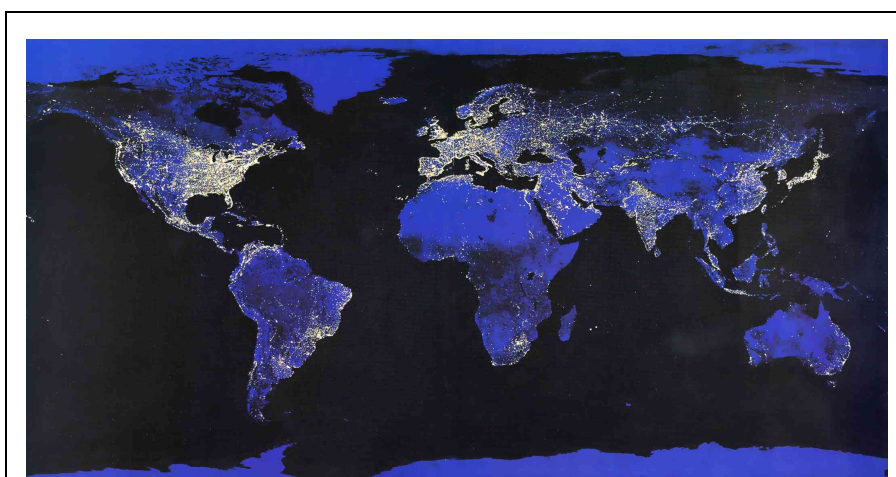


Figure 4 : Image satellite composite de la Terre, de nuit, dans le visible

Inversement les combustions de biomasse, qui sont aussi une importante source de pollution pour l'atmosphère en termes d'émission de gaz à effet de serre et autres espèces polluantes, sont principalement localisées dans les régions tropicales comme le montrent les cartes ci-dessous (Figure 5).

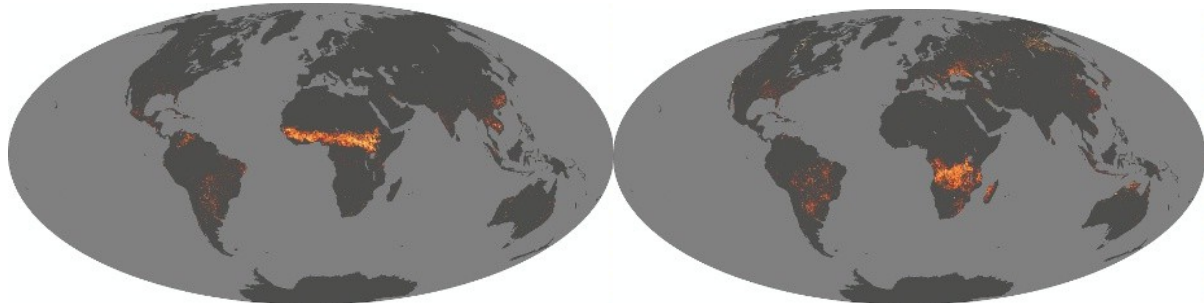
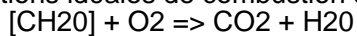


Figure 5 : Cartes de feux biomasse en janvier 2009 (saison sèche dans l'hémisphère Nord) à gauche et en juillet 2008 (saison sèche dans l'hémisphère Sud) à droite obtenues à partir des données du capteur MODIS sur le satellite TERRA (<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps>)

II. Les combustions de biomasse

II.1. Les mécanismes de la combustion.

Si dans les pays industrialisés, la pollution atmosphérique est essentiellement due aux combustibles fossiles, les émissions de polluants liées à la combustion de la biomasse affectent surtout les pays en voie de développement de la ceinture tropicale. Outre les feux naturels, la combustion de biomasse due aux activités humaines est certainement l'une des plus anciennes pollutions anthropiques de l'atmosphère. La combustion de matière organique est un processus d'oxydation qui produit essentiellement de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone, dans des conditions idéales de combustion complète, d'après la réaction simplifiée :



où $[\text{CH}_2\text{O}]$ représente la composition moyenne de la matière organique (hydrate de carbone). Dans les feux naturels, la réserve en dioxygène n'est jamais suffisante. Par conséquent, la combustion est toujours incomplète, ce qui provoque la formation de composés réduits, comme le méthane. Pour la plupart des constituants mineurs atmosphériques, les émissions des feux de biomasse dépendent de deux paramètres : la quantité de matière végétale brûlée et le facteur d'émission

Le facteur d'émission dépend largement du type de matériau brûlé et des conditions de brûlage, qui déterminent l'importance relative des deux phases principales de combustion : la combustion avec flammes et la combustion sans flammes (proche de la pyrolyse). La première favorise l'émission de composés complètement oxydés, alors que la seconde permet l'émission de composés incomplètement oxydés (CO), voire réduits (CH_4 , NH_3). Comme pour les combustions de combustibles fossiles, les facteurs d'émission des composés azotés sont directement liés à la teneur en azote du combustible



Photo 1 : feu de savane en Afrique ; © R. Delmas



Photo 2 : feu de forêt en Guyane © R. Delmas

II.II. Distribution des sources de combustion de biomasse dans les zones tropicales.

Parmi les différentes activités de combustion de biomasse, presque toutes sont d'origine anthropique. Plus de 80 % des combustions de biomasse ont lieu dans les régions tropicales. Dans ces zones, les combustions de biomasse sont liées au besoin, pour les pays en voie de développement, de sources d'énergies accessibles à des populations croissantes. Elles sont également liées au défrichage pour l'utilisation permanente des terres pour l'agriculture et l'élevage, l'agriculture itinérante et l'utilisation de bois de chauffage. Les feux de savanes sont liés à des pratiques plutôt traditionnelles qu'économiques. C'est un phénomène très ancien et très répandu. Les régions de savanes brûlées représentent environ 7,5 millions de km² par an. En Afrique, plus de 70 % des zones de savane sont potentiellement soumises au feu chaque année. En conséquence, l'Afrique est le continent qui contribue le plus à la pollution de l'atmosphère par les combustions de biomasse.

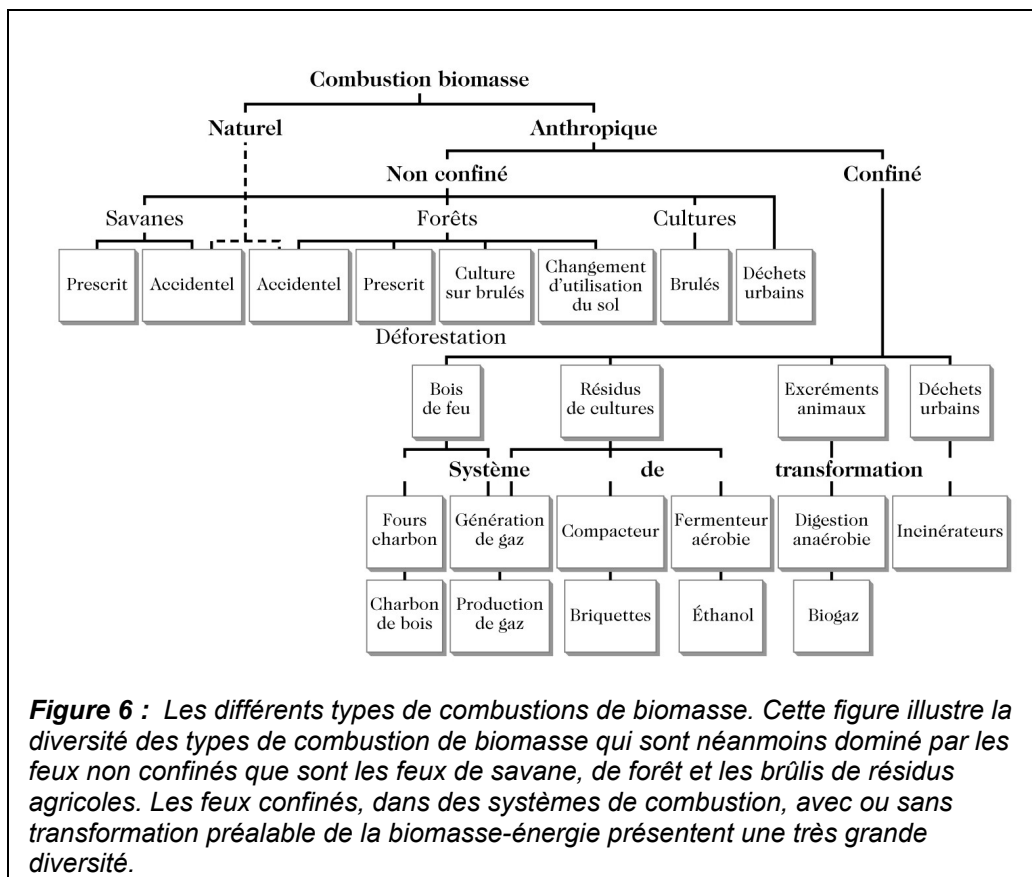


Figure 6 : Les différents types de combustions de biomasse. Cette figure illustre la diversité des types de combustion de biomasse qui sont néanmoins dominé par les feux non confinés que sont les feux de savane, de forêt et les brûlis de résidus agricoles. Les feux confinés, dans des systèmes de combustion, avec ou sans transformation préalable de la biomasse-énergie présentent une très grande diversité.

Le défrichement de la forêt par combustion n'affecte pas la forêt tropicale humide avec la même ampleur sur les différents continents. Chaque année, on estime que 0,6 % des régions forestières sont détruites et brûlées, avec actuellement la moitié de la déforestation localisée en Amérique du Sud. La déforestation dans les régions tropicales a commencé à la fin du XIX^e siècle, mais elle a considérablement augmenté pendant les trente dernières années à la suite de l'accroissement de la population. En Afrique de l'Ouest, par exemple, 70 % des régions forestières existant au début du XX^e siècle ont déjà été détruites.

La collecte de bois de chauffe affecte les écosystèmes forestiers, comme les savanes. Le bois de chauffe est la principale source d'énergie pour l'utilisation domestique dans la plupart des pays tropicaux.

Enfin, la combustion des résidus agricoles est également une source significative, notamment en Asie du Sud-Est, en lien avec la culture du riz. Les combustions de biomasse dans les autres régions du monde (feux résidentiels et accidentels dans les régions tempérées, feux des forêts boréales) représentent moins de 20 % de la biomasse annuellement brûlée dans le monde.

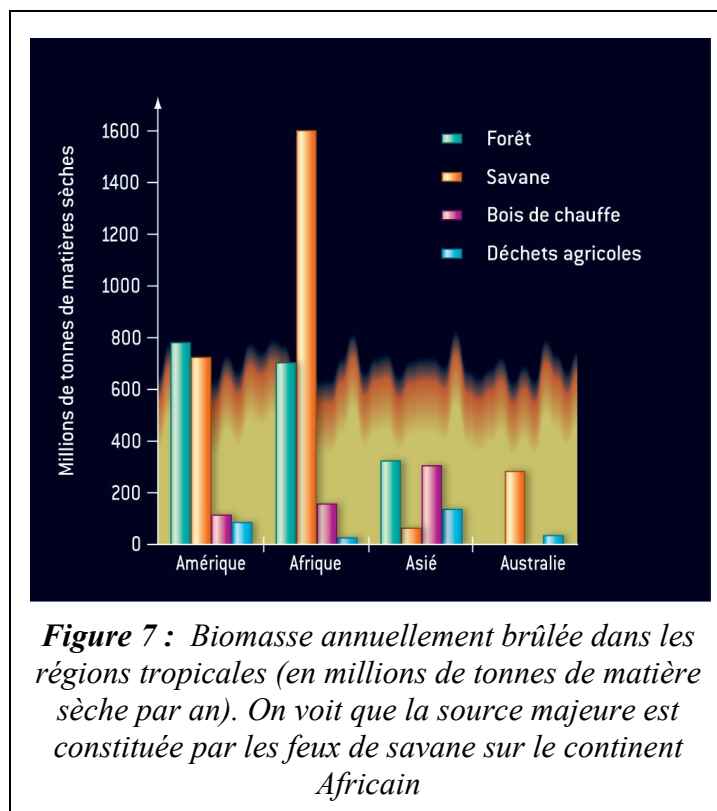
II.III. Biomasse brûlée annuellement dans le monde.

Contrairement aux combustibles fossiles, dont la production annuelle est connue, la quantité de biomasse brûlée annuellement est difficile à évaluer. Cette évaluation se fait à partir de formules du type : $M = A \times B \times a \times b$ où A est la surface soumise au feu, B est la densité de biomasse totale, a est la proportion de biomasse épigée par rapport à la biomasse totale, et b est le facteur de combustion qui représente la fraction de biomasse épigée (située au dessus du sol) réellement brûlée.

Un certain nombre d'études, fondées sur des observations, ont été conduites dans différents écosystèmes pour estimer ces paramètres. Elles concernent la biomasse réellement soumise au feu et les différentes caractéristiques des combustions. Ces estimations conduisent à des chiffres globaux qui varient entre 5 et 8 GT de matière sèche brûlées par an.

Types de combustions	Biomasse brûlée MT (m.s.).an ⁻¹	MT (C).an ⁻¹	Contribution à l'effet de serre additionnel MT (C).an ⁻¹
Feux de savane	3160	1420	# 0
Feux de forêts tropicales	1330	600	600
Feux de forêts extra-tropicales	640	290	290
Combustion de bois (énergie)	1950	880	880
Fabrication du charbon de bois	450	200	200
Feux de résidus agricoles	1190	530	# 0
TOTAL	8720	3720	1970

Tableau 1. Contribution de différents types de feux de biomasse à l'effet de serre additionnel (par émission de gaz traces et d'aérosols). Les feux de savane et les feux de résidus agricoles ne sont pas comptabilisés comme contribuant directement à l'effet de serre additionnel, car ces feux ne provoquent pas de déstockage durable de carbone. Ils génèrent néanmoins des émissions d'aérosols et de polluants gazeux qui contribuent, entre autres, à la formation d'ozone.



II.IV. Emissions de composé gazeux et d'aérosols par les combustions.

Les émissions de gaz traces et d'aérosols par les feux de biomasse dépendent de la quantité de matériau brûlé et du facteur d'émission (EF) de chaque composé. Les aérosols produits par les feux de biomasse contiennent principalement du carbone sous forme d'espèces organiques polymérisées parmi lesquelles la matière la plus réfractaire est constituée par le carbone-suie (carbone élémentaire). La teneur des particules en carbone suie (3 à 25%) est fortement variable selon, en premier lieu, les paramètres physiques de la combustion. Le tableau 2 montre que la combustion de la biomasse constitue une source significative de polluants atmosphériques à l'échelle globale.

Composé émis	Régions Tropicales 10^6 T.an^{-1}	Monde 10^6 T.an^{-1}	Pourcentage relatif à l'ensemble des sources
Carbone brûlé	3 000	3 720	40%
Composés gazeux			

CO ₂	10 500	13 200	40%
CO	567	709	32%
Méthane	31	39	10%
NMHC(C2-C10)	38	48	24%
N ₂ O	1,1	1,3	6%
NO _x	17	21,4	21%
Ammoniac	8	10,1	12%
SO ₂	2,8	3,5	2%
COS	0,06	0,07	6%
Chlorure de méthyl	0.6	0,76	22%
Hydrogène	15,2	19	25%
Ozone (1)	340	420	38%
Aérosols			
Total	67,7	84,6	7%
C. organique	28	35,2	39%
C. élémentaire	3,7	4,7	<86%
Potassium	1,7	2,1	

(1) O₃ : contribution indirecte due aux émissions de précurseurs

Tableau 2. Contribution des combustions de biomasse en région tropicale et dans le monde à l'ensemble des sources de constituants mineurs atmosphériques gazeux et particulaires

III. Les émissions du secteur industriel et du secteur tertiaire

Les sources anthropiques autres que les combustions sont essentiellement les sources industrielles (cimenteries, usines chimiques... etc), le secteur résidentiel ou tertiaire, et le traitement des déchets domestiques et industriels. Pour de nombreux gaz précédemment cités (CH₄, N₂O, COV, SO₂, NH₃), l'industrie ne constitue pas la principale source d'émission. Pour d'autres tels que le CO₂, le CO ou les NO_x, l'industrie représente une part non négligeable, mais néanmoins minoritaire devant la production liée aux transports et aux combustions (production d'énergie en particulier). Il n'en est pas de même pour de nombreux gaz dont l'origine est presque exclusivement liée à l'industrie manufacturière. Les concentrations atmosphériques de ces gaz sont en général de plusieurs ordres de grandeurs inférieures à celles des gaz précédemment cités. Néanmoins, leur composition chimique les rend particulièrement



Photo 3 : Usine dans le Nord de la France © Karine Delmas

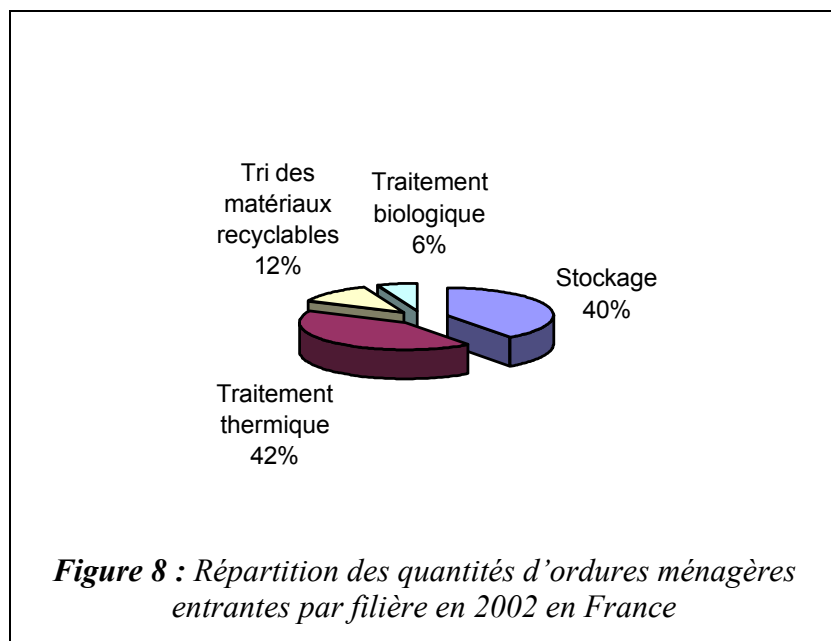
nocifs, soit à travers leur impact sur la chimie de l'atmosphère et l'effet de serre (cas des composés du chlore en particulier, CFC, HFC), soit par leur impact sur la santé, la végétation, ou les infrastructures.

Un certain nombre de polluants ont été regroupés sous l'appellation Produits Organiques Persistants ou POP. On trouve parmi ces composés, ou famille de composés, les dioxines et furanes, les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) les polychlorobiphényles (PCB) et l'hexachlorobenzène (HCB). Les dioxines et furanes particulièrement toxiques sont produits par des phénomènes complexes qui accompagnent principalement l'incinération des déchets et certains procédés industriels particuliers. Les HAP se formeraient dans des proportions importantes lors de combustion de biomasse en conditions mal maîtrisées. Les activités industrielles conduisent également au rejet de métaux lourds (Pb, Hg, Cd...) dans l'atmosphère. Leurs concentrations restent généralement très basses mais leur bio-accumulation dans les écosystèmes (mercure par exemple) peut générer localement des problèmes de santé publique.

IV. Le traitement des déchets

Le traitement de déchets est une autre source importante de polluants atmosphériques d'origine humaine. La France produit environ 46 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés, dont 24 millions de tonnes d'ordures ménagères, soit plus de 400 kg/hab/an. Cette quantité est environ le double de celle qu'on recueillait en 1960.

Pour traiter ce volume de déchets, la France s'est dotée de plus d'un millier d'installations de traitement. Les centres d'enfouissement technique et l'incinération représentent plus de 80% du devenir de l'ensemble des ordures ménagères.



Les centres d'enfouissement produisent un biogaz, mélange de méthane combustible et de gaz carbonique, issu de la fermentation anaérobie de la matière organique contenue dans les déchets. Les proportions relatives de ces gaz dépendent de la nature du substrat fermenté et des conditions de la fermentation. Le biogaz ainsi formé est récupéré puis brûlé au niveau de torchères. La chaleur produite peut éventuellement être valorisée. La combustion des gaz de décharge permet de transformer le méthane en dioxyde de carbone et par conséquent, de réduire considérablement son incidence sur le réchauffement climatique. De plus, ces méthodes traditionnelles de combustion permettent de détruire bon nombre des constituants nocifs des gaz de décharge, mais il est toujours possible que certains soient rejetés dans l'atmosphère comme des COV, des fréons, et des substances toxiques telles que le chlorure de vinyle ou le 1,3-

butadiène. D'autres composés peuvent être produits par une combustion incomplète ou par le procédé de combustion lui-même. Par exemple on peut retrouver en sortie des torchères du monoxyde de carbone, du soufre, des oxydes d'azote, des dioxines, des furanes ou encore des HAP.

En 2002 en France, près de 45% de la production de déchets était incinérée dans 168 usines d'incinération.

L'incinération possède trois avantages majeurs par rapport aux autres techniques de traitement des déchets :

- suppression de la possibilité de contamination microbienne
- récupération d'énergie pouvant être valorisée
- réduction importante de la masse et du volume des déchets (1/3 de la masse et 10% du volume initial restant)

En effet ce procédé transforme la matière en gaz (70 à 80%), en mâchefer (20%) et en cendres volantes (2 à 5%).

L'incinération des déchets, même dans des incinérateurs les plus avancés technologiquement, entraîne le rejet de trois types de polluants dans l'environnement :

- des éléments traces métalliques
- de nombreux composés organiques (comme les dioxines)
- des gaz (comme les oxydes d'azote ou de soufre, ou comme le chlorure ou le fluorure d'hydrogène), ainsi que du dioxyde de carbone.

Le procédé d'incinération conduit à former davantage de molécules « nouvelles » (dioxines, furanes) que n'en contiennent les biogaz. Ceci est dû à diverses réactions favorisées par les conditions de combustion au niveau des fours des incinérateurs. Quant à l'aspect quantitatif des polluants émis, il est extrêmement délicat de procéder à une comparaison entre les deux technologies puisque, même entre deux incinérateurs ou deux décharges, la comparaison est impossible. En effet, les émissions sont étroitement liées à la composition et la quantité des déchets à traiter.



Photo 4 : Installation d'incinération des ordures ménagères

V. L'agriculture

Une dernière catégorie de sources anthropiques est liée à l'agriculture et à l'élevage. Le

fonctionnement de ces sources est proche de celui de sources naturelles. Les rizières, fortement émettrices de méthane, sont des zones inondées artificielles ; les ruminants domestiques sont également une amplification considérable d'une source naturelle au même titre que les décharges d'ordures qui sont des milieux artificiels anoxiques et à forte teneur en matière organique. L'élevage est également la principale source d'ammoniac atmosphérique. Les mécanismes d'émission de ces sources sont sensiblement analogues à ceux des sources naturelles ; leur part dans les bilans globaux des émissions est particulièrement importante, notamment pour le méthane et les composés de l'azote. L'emploi d'engrais azotés peut entraîner notamment l'émission de monoxyde d'azote et surtout de protoxyde d'azote dans l'atmosphère. Les excès d'azote sous formes de nitrates non consommés par les plantes sont soit lessivés et entraînés dans les cours d'eau et les nappes phréatiques soit, après dénitrification, transformés partiellement en N_2O qui est émis dans l'atmosphère. On considère que l'emploi d'engrais azoté est la principale cause de l'augmentation continue du N_2O dans l'atmosphère et on sait que celui-ci est un puissant gaz à effet de serre dont le potentiel de réchauffement global est de plus de 200 fois supérieur à celui du CO_2 .

