Les dossiers de science et politiques publiques

Pollution de l'air et de l'eau

Responsable Alain Hénaut

Les Dossiers Science et politiques publiques ont été réalisés dans le cadre de l'unité mixte Science et décision dirigée par Alain Hénaut (CNRS, université d'Evry), de 2002 à 2007, puis dans le cadre de l'enseignement Science et débat public de l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI) de 2008 à 2011, ainsi que pour l'IHEST.
La vocation de ces textes est de fournir une information nécessaire et suffisante pour un débat public sur le sujet, accompagnée d'une abondante bibliographie. Chaque dossier est composé de plusieurs fascicules d'une trentaine de pages. Tous les fascicules sont datés.

Dossier Pollution de l'air et de l'eau

Les *Dossiers Science et politiques publiques* ont été réalisés dans le cadre de l'unité mixte *Science et décision*
dirigée par Alain Hénaut (CNRS, université d'Evry), de 2002 à 2007, puis dans le cadre de l'enseignement
Science et débat public de l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI) de 2008 à 2011, ainsi que pour l'IHEST.
La vocation de ces textes est de fournir une information nécessaire et suffisante pour un débat public sur
le sujet, accompagnée d'une abondante bibliographie. Chaque dossier est composé de plusieurs fascicules
d'une trentaine de pages. Tous les fascicules sont datés.
Les documents *Faits et chiffres* fournissent une information factuelle en complément des *Dossiers*.

Sommaire

Qualité de l'eau et lutte contre la pollution : faut-il distinguer protection de la santé et protection de l'environnement ?** Mai 2011

- La politique européenne dans le domaine de l'eau
- La proposition du Conseil d'Etat : *distinguer normes de santé humaine et normes de protection du milieu*
- Les sources de pollution
- Les bases scientifiques de la réglementation
- Qualité de l'eau : comment mesure-t-on la pollution ?
- L'épuration
- Limites techniques et économiques de la dépollution
- Remédier à la pollution
- Peut-on séparer protection de la santé et protection de l'environnement ?
- Références

De la bonne utilisation de l'eau de pluie et autres eaux alternatives : économie de la ressource et valorisation climatique,** juin 2011

- Les ressources en eaux alternatives
- Les différentes utilisations des eaux alternatives
- L'utilisation des eaux alternatives par les
- particuliers : une fausse bonne idée ?
- La maîtrise du gaspillage de l'eau
- Récupérer et utiliser les eaux alternatives : intérêt collectif vs intérêt particulier
- Références

Pollution de l'air et santé : il s'agit avant tout d'un problème de particules en suspension,** Août 2010

-
- L'air que l'on respire
- La propagation des particules dépend de leur taille
- La ventilation : une solution pour améliorer la qualité de l'air dans les locaux
- Le passage des particules dans le corps
- Les effets de la pollution de l'air sur la santé
- La protection des personnes contre la pollution de l'air à l'intérieur des locaux

- La protection contre la pollution de l'air dans les établissements scolaires et les hôpitaux
- La protection des personnes contre la pollution de l'air à l'extérieur
- Références

Qualité de l'eau et lutte contre la pollution : faut-il distinguer protection de la santé et protection de l'environnement ?

Arnaud Calaudi, Fabrice Delorme, Marie-Odile Delorme, Nina Fraigne, Denis Fraysse, Rudy Larsonnier, Emmanuelle Ollivier, Aziz Ourachane, Mathieu Paillard, Caroline Paolino, Bertrand Sarrey, Alain Hénaut.

DU Science et politiques publiques. Université Pierre et Marie Curie.

La politique européenne dans le domaine de l'eau

La politique de l'Union européenne dans le domaine de l'eau a deux objectifs principaux : la santé publique et la préservation de la ressource. L'Union européenne y consacre environ 2 % de son budget (15,1 milliards d'euros pendant la période 2000-2006).

Entre 1975 et 1980, la politique européenne dans le domaine de l'eau a suivi une approche classique en déclinant la protection de la santé par secteurs (ex : eau potable, baignade, conchyliculture). Les limites de qualité fixées dans les directives correspondent aux recommandations de l'OMS. Les directives fixent aussi le niveau de pollution au-delà duquel une eau ne peut plus être utilisée pour produire de l'eau potable (ex : pas plus de 50 mg/l de nitrates).

A partir de 1988-1989, suite à une demande des gouvernements des Etats membres, la législation européenne a pris en compte la protection de la ressource et traité les questions de la pollution et de l'assainissement (les stations d'épuration). Les directives ont porté successivement sur la pollution par les nitrates, les produits chimiques et plus récemment les pesticides.

L'aboutissement logique de cette politique a été de faire de la protection du milieu aquatique et de sa qualité un objectif autonome « l'eau n'est pas un bien marchand comme les autres mais un patrimoine qu'il faut protéger, défendre et traiter comme tel » (directive 2000/60 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, dite aussi directive-cadre sur l'eau ou DCE). La directive-cadre s'accompagne d'une obligation de résultats : atteindre un « bon état » écologique et chimique de toutes les eaux communautaires d'ici à 2015.

Tous les Etats membres de l'Union européenne, dont la France, sont dans l'obligation de respecter les valeurs réglementaires fixées au niveau communautaire. Les Etats membres peuvent aussi, s'ils le souhaitent, retenir des valeurs plus strictes. En France par exemple, l'arrêté de janvier 2007 sur la qualité de l'eau potable reprend les directives de 1975 et de 1998 (qui sont relatives à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine) mais introduit en plus la valeur recommandée par l'OMS pour la concentration maximale de toxines de cyanobactéries.

La proposition du Conseil d'Etat : *distinguer normes de santé humaine et normes de protection du milieu*

Depuis quelques années, la politique européenne de l'eau va dans le sens d'un durcissement des normes de protection, tant sanitaires, qu'environnementales. Dans un rapport récent concernant « l'eau et son droit », le Conseil d'Etat, sans prendre parti sur le fond, déplore ce durcissement et souligne que celui-ci ne pouvait de plus que s'accentuer : « Les parlementaires européens, réunis au sein de l'*European Water Forum*, influent de plus en plus fortement sur le contenu de cette politique et poussent au relèvement des exigences ».

A en croire le Conseil d'Etat, Il n'existe pourtant pas de raisons objectives de s'inquiéter. En effet, selon lui, « en l'état des données avancées par le ministère de la Santé, il est difficile de conclure à un niveau de risque élevé ». Ainsi le Conseil préconise-t-il que des études sur les risques soient menées en amont et que leurs conclusions soient discutées avec nos partenaires communautaires d'abord, puis au sein de l'OMS, afin « de pouvoir peser

utilement lors de l'élaboration des normes et de contenir la normalisation émotionnelle ou alibi, qui gagne partout du terrain ».

Enfin pour conclure sur ce point, le Conseil d'Etat distingue en matière de protection des ressources en eau potable, les normes destinées à la protection de la santé humaine de celles destinées à la protection des ressources et s'interroge sur la nécessité de fixer dans les deux cas le même degré d'exigence. « Les deux sont souvent confondues à tort : si l'on veut uniquement garantir la qualité de l'eau potable, un traitement approprié de la ressource apporte la réponse adéquate sans qu'il soit pour autant nécessaire de fixer la même contrainte ou le même degré d'exigence pour le milieu ».

Les sources de pollution

L'eau peut être polluée par des produits chimiques et par des agents infectieux.

N.B. en conditions normales, les éléments radioactifs présents dans l'eau jouent un très faible rôle dans l'exposition totale à la radioactivité.

La pollution chimique

La pollution chimique affecte tout le cycle de l'eau, depuis la pluie (la concentration de pesticides peut y être beaucoup plus élevée que la concentration maximale autorisée pour l'eau potable) jusqu'aux eaux souterraines (7,8 % des eaux souterraines dépassent 40 mg/l de nitrates contre 1,6 % pour les eaux de surface).

On distingue parmi les produits chimiques ceux qui ont un effet néfaste à des concentrations de l'ordre de quelques milligrammes par litre – les macropolluants (ex : nitrates, phosphates, matière organique en suspension) et ceux qui sont toxiques à des concentrations beaucoup plus faibles – les micropolluants (ex : le plomb, les pesticides).

Les macropolluants proviennent principalement des rejets urbains (les égouts) et de l'agriculture. La pollution due aux rejets urbains baisse régulièrement depuis que les eaux usées sont traitées dans des stations d'épuration. En revanche, la pollution due à l'agriculture se maintient voire progresse.

Les micropolluants proviennent de l'agriculture, de l'entretien des espaces verts dans les zones périurbaines (ex : pesticides), de l'industrie (ex : métaux, plastifiants), des ménages (ex : détergents, médicaments) et du trafic automobile (ex : produits de combustion). Dès 1976, la Commission européenne avait identifié 157 substances dangereuses rejetées dans l'eau. La liste s'est allongée depuis. Une directive de 2008 énumère 33 substances dont les rejets, pertes et émissions sont à réduire d'ici 2015 et, pour les 20 plus dangereuses d'entre-elles, à supprimer d'ici 2028. De nombreux micropolluants perturbent le système hormonal des mollusques et des poissons dans la nature. Leur impact d'un point de vue sanitaire est toujours à l'étude.

Les médicaments ont en commun avec les pesticides d'avoir été conçus pour avoir un effet sur les êtres vivants. Ils constituent à ce titre des micropolluants potentiellement plus nocifs que les autres. Les médicaments sont éliminés après avoir été plus ou moins dégradés (en général, on ne connaît pas la toxicité des produits de dégradation). Ils se retrouvent dans les eaux usées. La priorité est actuellement donnée à la pollution de l'eau par les antibiotiques, les œstrogènes stéroïdiens, les hypocholestérolémiants et les psychotropes.

La pollution par des agents infectieux

Historiquement, l'assainissement avait pour but d'éradiquer les épidémies dues à la contamination de l'eau (choléra, typhoïde, dysenterie). Ceci reste la priorité dans de très nombreux pays.

Les agents infectieux présents dans l'eau proviennent en règle générale de matières fécales humaines ou animales rejetées dans les eaux usées. Ils ne sont pas totalement éliminés par l'assainissement et l'eau contaminée reste une source de gastro-entérites. Il s'agit dans la majorité des cas de maladies virales (*Norovirus* chez l'adulte, *Rotavirus* chez l'enfant).

Les agents infectieux les plus fréquents changent au cours du temps. Actuellement, parmi les bactéries, celle qui provoque le plus de gastro-entérites est *Campylobacter*. On observe aussi l'émergence de gastro-entérites dues à des protozoaires (ex : *Giardia*, *Cryptosporidium*). Ils sont à l'origine de plusieurs épidémies dues à la consommation d'eau dans les pays industrialisés, dont la France.

On trouve aussi dans l'eau d'autres virus (ex : virus de l'hépatite A ou E, virus de la poliomyélite). N.B. le problème de santé publique posé par le virus de poliomyélite a été résolu par la vaccination.

Enfin certaines bactéries qui vivent habituellement dans l'eau se sont avérées dangereuses pour les personnes fragiles ou immunodéprimées (ex : *Legionella, Mycobacterium avium*).

Les bases scientifiques de la réglementation

Chaque pays fixe la concentration tolérable des polluants à partir des valeurs recommandées par l'OMS (les valeurs guides). L'OMS est soucieuse de proposer des valeurs guides réalistes pour les pays en développement.

Les Etats doivent chercher un équilibre entre le souhait de limiter le plus possible les risques potentiels et le réalisme technico-économique (« principe ALARA » *As Low As Reasonnably Achievable*). Ils sont aussi face à l'alternative : 1) accepter un risque mineur pour tout le monde, même si l'on sait que le danger est réel pour une partie de la population ; 2) être solidaire de la population la plus fragile (nourrissons, femmes enceintes, personnes âgées ou immunodéficientes) et fixer le seuil en fonction de cette catégorie. C'est le cas par exemple de la réglementation sur les nitrates qui vise à protéger les nourrissons alimentés au biberon.

Pour établir les valeurs guides, l'OMS s'appuie sur des comités où les experts sont choisis à titre personnel en fonction de leurs compétences scientifiques et de leur expérience. Les experts proviennent de plus d'une trentaine de pays, dont la France. Ils analysent les publications scientifiques et les travaux des principales institutions de recherche dans le domaine, notamment ceux de l'Agence de protection de l'environnement des Etats Unis (US EPA). Leurs conclusions sont argumentées point par point dans des documents librement accessibles.

Les valeurs guides pour les polluants chimiques

Une valeur guide correspond à la concentration d'un constituant pour laquelle le risque encouru par le consommateur, en supposant qu'il consomme l'eau concernée pendant la totalité de sa vie, ne dépasse pas le risque tolérable ou acceptable pour la santé.

Le calcul de la valeur guide est découpé en deux phases : 1) la dangerosité de la substance (la valeur toxicologique de référence), 2) la probabilité d'être exposé à la substance (le risque). Les deux notions sont distinctes : le lion est un animal dangereux mais le risque est pratiquement nul dans un zoo.

La mesure de la dangerosité (la valeur toxicologique de référence)

En général on ne dispose pas de données précises sur la dangerosité pour l'homme. On a donc recours à des animaux de laboratoire. Ils permettent de déterminer expérimentalement la relation entre la dose de produit et l'importance de l'effet nocif. On détermine ainsi le seuil au-delà duquel on observe au bout d'un temps très court un effet nocif de la substance sur une partie au moins des animaux testés (toxicité aiguë). En revanche, une telle approche n'apporte pas d'informations sur la toxicité à long terme des faibles doses (toxicité chronique).

Afin d'éviter l'effet d'éventuels biais expérimentaux, on prend comme valeur toxicologique de référence la concentration seuil divisée par un nombre généralement compris entre 10 et 100.

Il existe parfois plusieurs valeurs toxicologiques de référence pour une même substance. La différence peut venir des progrès de la toxicologie ou bien du fait que la substance engendre des effets multiples. Il y a alors autant de valeurs toxicologiques de référence qu'il y a d'effets.

La mesure du risque (la valeur guide)

Le risque est fonction de la dangerosité de la substance et de la probabilité d'être exposé. Cette dernière dépend du contexte local et de la population concernée.

Dans le cas de l'eau, on passe de la valeur toxicologique de référence à la valeur guide en tenant compte : 1) de la quantité d'eau consommée (classiquement deux litres pour un adulte, un litre pour un enfant et trois-quarts de litre pour un nourrisson) ; 2) de la part de la consommation d'eau dans les sources d'exposition à la substance.

Les valeurs guides pour les agents infectieux

La détermination d'une valeur toxicologique de référence n'a pas de sens pour les agents infectieux car quelques dizaines de particules suffisent pour provoquer la maladie (le chiffre dépend aussi de l'état de santé des personnes contaminées).

De plus, la détection d'un agent infectieux donné est difficile et coûteuse. Elle est hors de portée pour les pays en développement. Même dans les pays riches, il est inenvisageable de faire des analyses de routine pour tous les agents infectieux potentiellement présents dans l'eau.

Comme la contamination est due habituellement à une pollution par des matières fécales, les valeurs guides ne portent pas sur les agents infectieux eux-mêmes, mais sur la concentration des bactéries abondantes dans l'intestin (les coliformes). La présence de coliformes est la preuve d'une contamination fécale. En revanche, leur absence ne garantit pas l'innocuité de l'eau car les agents pathogènes peuvent rester infectieux longtemps après la disparition des coliformes. De fait, l'expérience montre que les tests basés sur l'absence de coliformes ne suffisent plus pour prévenir les épidémies dues aux agents infectieux les plus fréquents actuellement (ex : *Campylobacter*, *Norovirus*, *Rotavirus*).

L'absence de tests permettant de contrôler directement l'absence d'agents infectieux pose un vrai problème de santé publique.

Qualité de l'eau : comment mesure-t-on la pollution ?

La directive-cadre sur l'eau impose d'améliorer l'état chimique et écologique des masses d'eau. Veiller à la bonne qualité de l'eau, c'est d'abord être capable d'y détecter la présence de polluants pour pouvoir ensuite organiser leur surveillance.

Il existe deux types de stratégies pour organiser cette surveillance. La première repose sur des analyses toxicologiques et consiste à détecter la présence d'un polluant en observant les effets de celui-ci sur le milieu. La seconde repose sur des analyses physicochimiques conventionnelles pour mesurer la concentration d'un polluant donné et la comparer aux valeurs seuil réglementaires.

L'écotoxicologie : une stratégie de surveillance environnementale

Il s'agit ici non pas de mesurer la concentration d'un ensemble de polluants, mais bien de détecter leur présence par l'observation et la mesure des changements qu'ils provoquent sur un organisme vivant. On parle alors d'indicateurs biologiques. L'impact d'un polluant est estimé au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique ou comportemental. Classiquement on prélève des animaux à différents endroits d'un cours d'eau (ex : poissons, mollusques), puis on détermine leur état physiologique. On obtient ainsi une estimation du degré de pollution et de ses effets.

Contrairement aux analyses chimiques, les analyses écotoxicologiques tiennent compte de l'exposition réelle aux polluants et elles permettent d'en évaluer rapidement l'impact. Elles constituent une alarme efficace. On leur doit notamment la mise en évidence de la concentration toxique atteinte par certains micropolluants dans la nature (ex : féminisation des poissons sous l'effet des perturbateurs endocriniens présents dans les eaux sortant des stations d'épuration).

En revanche, elles ne donnent pas d'indication sur la nature et la quantité des polluants impliqués. Elles se prêtent mal à une réglementation basée sur des valeurs seuil.

L'analyse physicochimique : une logique réglementaire de la surveillance

L'analyse physicochimique est la meilleure solution lorsqu'il s'agit d'identifier une substance et d'en mesurer la concentration avec précision.

La détection d'un micropolluant dans un échantillon débute en général par un prétraitement. Son but est d'éliminer les composés qui risqueraient de fausser les mesures et de concentrer les polluants lorsque leur concentration est inférieure à la sensibilité de l'appareillage. On procède ensuite à une extraction qui permet de récupérer la fraction contenant le polluant. Après quoi, une chromatographie permet de séparer et de quantifier toutes les molécules contenues dans la fraction, leur identification étant réalisée par spectrométrie de masse.

Ces techniques bien rodées permettent de mesurer la concentration d'un polluant donné dans l'eau et de la comparer aux valeurs seuil réglementaires.

Ecotoxicologie et analyse physicochimique : deux stratégies complémentaires répondant à des logiques différentes

L'écotoxicologie et l'analyse physicochimique répondent à des logiques très différentes pour ne pas dire opposées.

1) Une logique de protection sanitaire et environnementale d'une part, permettant d'alerter sur la réalité d'un effet néfaste. On mesure ici les conséquences d'une pollution sans quantifier séparément les agents responsables de celle-ci.

2) Une logique réglementaire d'autre part, permettant l'établissement de valeurs d'alerte au-delà desquelles on considère qu'un polluant est néfaste. Dans ce cas l'alerte ne porte que sur les polluants que l'on mesure. Un produit dont on ne cherche pas à établir la présence car il ne figure pas dans la réglementation sera totalement ignoré, même s'il est toxique.

L'épuration

Tous les polluants sont un jour ou l'autre entraînés par l'eau. Ils se retrouvent dans les eaux superficielles, ils sont retenus dans le sol ou encore ils sont piégés dans les eaux souterraines. L'élimination des polluants, la dépollution, résulte de réactions physicochimiques et de l'activité des microorganismes et des plantes. On parle d'autoépuration lorsqu'elle a lieu dans la nature.

Les stations d'épuration traitent les eaux fortement polluées des zones urbaines et de l'industrie. Elles concentrent la majeure partie des polluants dans des boues et rejettent l'eau épurée dans les cours d'eau. Les boues peuvent être brûlées ou épandues dans les champs. Dans le second cas, les effets sur l'environnement dépendent des capacités d'autoépuration des sols.

L'épuration dans la nature

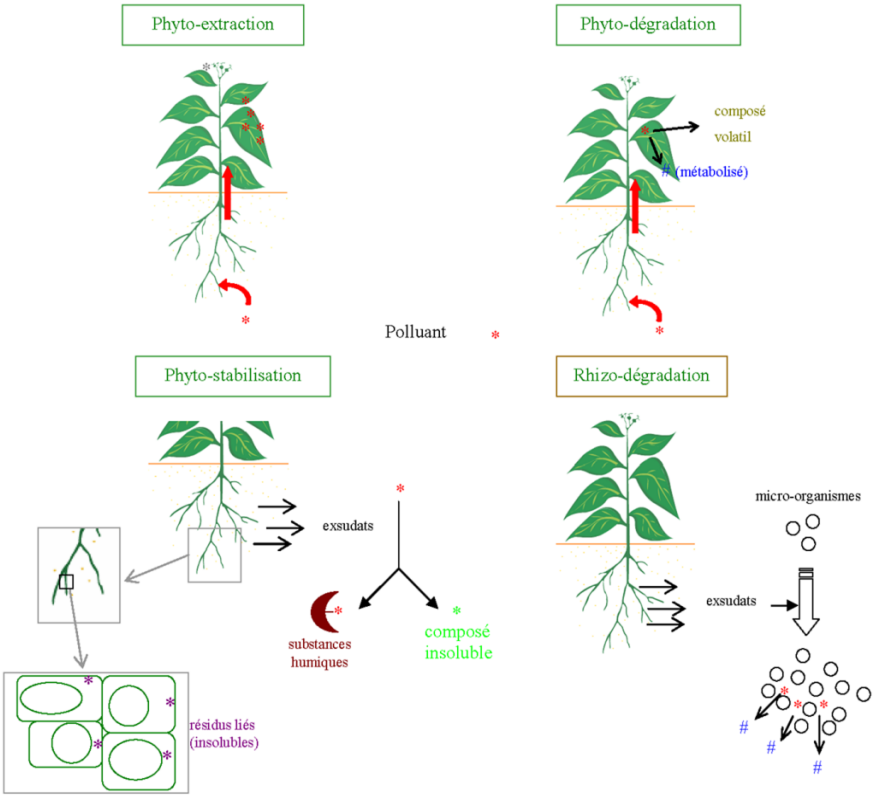
En présence d'une quantité suffisante d'oxygène, la plus grande partie de la matière organique présente dans le sol se décompose en moins d'un an. Chimiquement, c'est l'équivalent d'une combustion. La décomposition du bois et des autres débris végétaux fibreux est plus lente (de deux à cinq ans). Elle donne naissance à l'humus.

La décomposition est plus rapide dans l'eau et elle s'accompagne d'une forte consommation d'oxygène, au point qu'un excès de matière organique peut provoquer l'asphyxie des rivières. Les bactéries qui se développent en absence d'oxygène (ex : dans la vase) éliminent les nitrates en les transformant en azote gazeux.

Cette étape ne suffit pas pour rendre l'eau potable lorsque celle-ci contient en plus des microorganismes pathogènes ou des produits toxiques.

La durée de vie dans la nature se compte en mois pour les virus, les kystes de protozoaires, les œufs des vers parasites et certaines bactéries (ex : choléra, typhoïde). En revanche, les coliformes, qui sont les bactéries les plus abondantes de l'intestin, ne survivent que quelques semaines.

La plupart des micropolluants sont détruits par des microbes ou des champignons présents dans le sol et par les plantes. Les métaux lourds sont des atomes, ils ne peuvent donc pas être détruits. Par contre, certains microbes les rendent solubles (lixiviation) alors que d'autres, au contraire, les fixent alors dans le sol.



1) Phyto-extraction (ou phyto-accumulation ou phyto-filtration) Les plantes extraient les polluants du sol et les accumulent dans leur partie aérienne sans les dégrader (ex : métaux lourds). Une dépollution complète passe par la fauche et l'incinération de la récolte. 2) Phyto-dégradation (ou phyto-transformation) Les plantes dégradent les polluants après les avoir absorbés (ex : solvants, pesticides, explosifs). Les produits de dégradation sont stockés dans la plante ou rejetés dans l'atmosphère. 3) Rhizo-dégradation (ou phyto-stimulation) Les plantes ont une action indirecte sur le polluant. Elles agissent en facilitant la dépollution par les micro-organismes présents dans la zone entourant les racines – la rhizosphère (ex : hydrocarbures, polychlorobiphényle). 4) Phyto-stabilisation Les plantes freinent la dispersion des polluants dans l'environnement en les rendant insolubles (ex : métaux lourds piégés par l'humus). Ou bien elles réduisent la migration des polluants vers les nappes phréatiques en pompant de grands volumes d'eau (un peuplier adulte pompe 120 litres d'eau par jour).

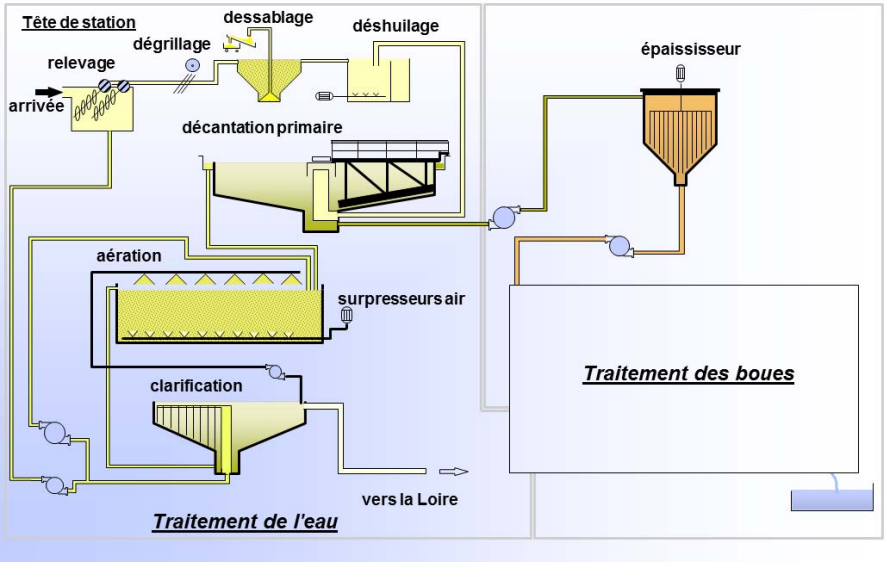
Certains micropolluants organiques persistent très longtemps dans la nature. Les plus solubles s'accumulent dans les nappes d'eaux souterraines (ex : pesticides) alors que les autres se fixent dans le sol ou la vase (ex : les polychlorobiphényles – PCB).

Les stations d'épuration

Le principal objectif des stations d'épuration est de réduire le plus possible les matières en suspension et les matières organiques pour ne pas asphyxier le cours d'eau dans lequel va être déversée l'eau épurée. L'eau est généralement dépolluée à 90 % (le chiffre varie entre 70 % et 95 % selon la technique et la taille de l'installation).

Les stations d'épuration fonctionnent sur le même principe et avec les mêmes microorganismes que l'autoépuration. Par contre, les populations de microorganismes sont fortement oxygénées (ce sont les boues activées), ce qui leur permet d'épurer l'eau beaucoup plus rapidement que dans la nature. L'élimination des nitrates et du phosphore est obtenue en supprimant périodiquement l'aération.

Les stations d'épuration consomment 20 % de l'électricité dans une ville, c'est-à-dire plus que les écoles ou les hôpitaux.



1) Tête de station : élimination des déchets solides les plus gros et des graisses. 2) Décantation primaire : élimination des matières en suspension. 3) Aération : traitement biologique par boues activées. 4) Clarification : extraction et recyclage des boues et rejet de l'eau épurée. 5) Traitement des boues : élimination des boues en surplus produites à l'étape 4.

Le processus d'épuration entraîne une prolifération massive des microorganismes qui contribuent à former les boues d'épuration, un nouveau déchet qu'il faut à son tour éliminer. Les boues sont très riches en matière organique (50 à 70 % de la matière sèche). Leur composition exacte varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année et du type de station d'épuration.

On estime que la moitié des micropolluants est dégradée par les microorganismes des boues activées ou est adsorbée sur la boue. Les autres se retrouvent pratiquement à la même concentration à la sortie de la station d'épuration. La dépollution est inefficace pour 15 % des substances visées par la directive de 2008, pour 30 % des micropolluants organiques et pour 90 % des substances pharmaceutiques qui sont présents dans les eaux usées.

L'élimination des microorganismes nécessite un traitement supplémentaire des eaux épurées, le traitement tertiaire (ex : désinfection à l'ozone, ultrafiltration). L'ultrafiltration est utilisée pour éviter la pollution des eaux de baignades par les rejets des stations d'épuration.

Limites techniques et économiques de la dépollution

L'épuration dans la nature

L'autoépuration est un processus lent dont les possibilités sont limitées par la rareté des biotopes ayant de fortes capacités d'autoépuration. Il s'agit en effet d'habitats semi-naturels (ex : zones humides, haies) ou de sols riches en matière organique. Leur surface a considérablement diminué depuis la fin des années 1950 et cette tendance ne s'inverse pas : la moitié des zones humides ont disparu au cours des 30 dernières années, les jachères sont remplacées par des cultures pour les biocarburants et on observe un appauvrissement des sols dans les régions de grandes cultures.

L'autoépuration dépend aussi de facteurs qui échappent à l'homme. Le froid ou la sécheresse diminuent les capacités d'autoépuration et la fixation des micropolluants dépend des propriétés physicochimiques des sols (ex : des micropolluants fixés dans une terre basique seront entraînés par l'eau si le sol s'acidifie).

Des techniques physicochimiques ou biologiques permettent d'augmenter ponctuellement l'efficacité de l'épuration. Mais les interventions sont coûteuses et ne sont envisageables que pour des opérations ponctuelles sur des sites fortement pollués (ex : oxydation in situ des solvants chlorés dans les eaux souterraines, dégradation biologique des résidus pétroliers après une marée noire).

Les stations d'épuration

Il est techniquement possible d'augmenter la qualité de l'eau à la sortie des stations d'épuration. Il suffit pour cela de procéder à des purifications supplémentaires. Il est même possible d'obtenir de l'eau potable. Mais ce sont des techniques coûteuses qui doublent ou triplent la consommation d'énergie. Par exemple, l'élimination des agents infectieux coûte 30 euros de plus par habitant et par an et l'obtention d'une eau potable 60 euros de plus (l'assainissement des eaux usées coûte environ 50 euros par personne et par an).

On peut augmenter l'efficacité énergétique en modernisant l'équipement et en produisant de l'énergie avec les boues d'épuration (notamment par méthanisation). Les spécialistes estiment qu'à terme, la consommation énergétique pourra être réduite de 80 à 90 %. Mais ceci nécessite de gros investissements et un personnel hautement qualifié pour optimiser en temps réel le fonctionnement de la station d'épuration. Ces améliorations ne sont envisageables que dans des stations traitant les eaux usées de plusieurs dizaines de milliers d'habitants.

Les petites collectivités n'ont pas accès à des techniques aussi évoluées. Le lagunage est une alternative à l'utilisation de boues activées lorsque l'eau est moyennement polluée (ex : mélange d'eau de pluie et d'eaux usées domestiques). Une installation desservant une centaine d'habitants occupe 25 hectares de sol imperméabilisé. Elle élimine de 60 à 70 % des nitrates et des phosphates.

L'assainissement autonome (appelé aussi assainissement non collectif) repose sur les capacités d'autoépuration du sol, la fosse septique ne jouant qu'un rôle de décantation primaire. Comme toutes les techniques basées sur l'autoépuration, l'efficacité est faible et doit être contrebalancée par une grande emprise au sol (de 200 à 300 mètres carrés pour une habitation de trois chambres) et un éloignement suffisant des zones sensibles (point de captage d'eau potable, niveau de la nappe phréatique). Dans la plupart des cas, l'épuration est insuffisante car les installations sont mal conçues et mal entretenues. La loi charge les communes du contrôle de l'assainissement non collectif, mais sa mise en œuvre se heurte à de nombreuses difficultés.

Remédier à la pollution

Moyennant d'y mettre le prix, des installations industrielles permettent un assainissement efficace lorsque la source de pollution est ponctuelle. En revanche, le traitement de la pollution diffuse (ex : petites agglomérations, habitat rural, agriculture) repose presque exclusivement sur les capacités d'autoépuration des sols et des zones humides. En Europe, la pollution dépasse à de nombreux endroits les capacités d'autoépuration. C'est le cas par exemple des régions fortement peuplées et de celles pratiquant une agriculture intensive. L'insuffisance des capacités d'autoépuration est aussi la conséquence de la dégradation des habitats semi-naturels.

Les politiques visant à préserver la qualité de l'eau portent donc sur : 1) l'amélioration des capacités d'autoépuration, 2) la réduction des émissions polluantes diffuses et urbaines.

L'amélioration des capacités d'autoépuration

Les capacités d'autoépuration dépendent fortement de l'organisation du paysage. Les habitats qui jouent le rôle le plus important sont les bandes et les chenaux enherbés, les haies, les bois et les bosquets, les prairies permanentes et les forêts alluviales. Ils permettent d'éviter la concentration des écoulements et ils facilitent la fixation, l'infiltration ou la transformation des pesticides, des matières en suspension, du phosphore et des nitrates. La création et l'entretien de ces espaces reposent principalement sur les agriculteurs mais leurs efforts dans ce domaine sont très mal rémunérés.

Dans le cas des eaux souterraines, il s'agit plus d'opérations ponctuelles que d'une augmentation générale des capacités d'autoépuration. Il est possible par exemple d'ensemencer une nappe souterraine avec des bactéries capables de dégrader le polluant qui pose le plus de problèmes. Il est possible aussi d'infiltrer ponctuellement de l'oxygène pour augmenter la vitesse de la dépollution. Mais tout ceci n'est pas envisageable à grande échelle.

La modification de certaines pratiques agricoles

L'agriculture est la principale source de pollution par les nitrates et les pesticides. On observe une dégradation continue de la qualité des eaux souterraines et, globalement, il n'y a pas de progrès pour les eaux de surfaces. En effet, les améliorations constatées dans certaines régions sont contrebalancées par l'augmentation de la pollution d'en d'autres. Ceci a conduit à la fermeture de nombreux points de captages (leur nombre a diminué de 35,3 % en dix ans) et, malgré ces fermetures, le pourcentage de ceux qui ne peuvent pas être utilisés pour produire de l'eau destinée à la consommation humaine est passé de 3,9 % à 6,2 %.

Pourtant, de nombreuses actions se sont succédées depuis le premier Plan de maîtrise des pollutions d'origine agricole (PMPOA) de 1992 (il répondait à une exigence de la directive de 1975 relative à la qualité des eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire). Les causes de cet échec sont essentiellement politiques. Bien qu'il ait une valeur constitutionnelle, le principe pollueur-payeur n'est pas appliqué à l'agriculture. Dans le même temps, d'autres pays ont obtenu une diminution de la pollution par une modification des pratiques agricoles sans mettre en danger l'équilibre économique des exploitations (ex : Danemark, Suisse).

Le renforcement de la réglementation

La réglementation est efficace lorsque la source de pollution est ponctuelle car il est alors facile d'identifier la personne responsable.

C'est le cas notamment pour les entreprises. Elles doivent rejeter dans les égouts une eau qui a les caractéristiques des eaux usées domestiques et les volumes doivent être compatibles avec les capacités d'assainissement de l'agglomération. Elles exécutent en interne les traitements nécessaires à l'obtention de ce résultat (ex : dégraissage pour les cuisines, déshuilage pour les garages). Les entreprises doivent demander une autorisation de raccordement au réseau d'assainissement et payer une redevance. Elles risquent une amende en cas de pollution accidentelle.

Les hôpitaux sont soumis à la même réglementation que n'importe quelle autre entreprise (notamment pour les produits radioactifs et le développement des films argentiques). Il n'y a pas de réglementation spécifique pour les résidus médicamenteux et ils sont rejetés dans le réseau d'assainissement général. Pourtant une élimination des résidus médicamenteux à la sortie des hôpitaux est possible et elle serait particulièrement efficace car leur concentration y est de cent à mille fois plus forte que dans les eaux usées domestiques.

La protection des zones de captage

A défaut d'une protection globale de la qualité de l'eau dans l'environnement, le législateur a prévu dès 1964 la protection des captages pour produire de l'eau destinée à la consommation humaine. Cette loi n'a pas rencontré le succès attendu : 56 % seulement des captages étaient protégés en 2009 et encore, les mesures prises ne les mettent pas à l'abri des pollutions diffuses. Les raisons de ce semi-échec sont très nombreuses. En voici quelques-unes.

La protection d'un captage est une procédure longue et compliquée qui nécessite notamment des expropriations. Elle est du ressort des communes, mais beaucoup d'entre-elles n'ont pas les moyens techniques et financiers de la mener à bien.

La protection contre les pollutions diffuses requiert une approche qui couvre l'intégralité du bassin-versant alimentant le captage. Mais la création d'une zone de protection étendue n'est que facultative. Dans ces conditions, même s'ils le veulent, les élus municipaux peuvent difficilement réglementer les activités agricoles et notamment les apports d'engrais ou de pesticides.

La législation est éclatée entre le code de la santé publique et le code de l'environnement, ce qui complique le maintien d'une cohérence globale.

La lutte contre les nouvelles pollutions

Au XIXe siècle et au début du XXe, la pollution de l'eau a provoqué de grandes épidémies (ex : choléra, typhoïde) et la contamination de l'eau destinée à la consommation humaine par des microorganismes pathogènes reste un problème majeur dans de nombreux pays. Ceci explique l'importance donnée à la lutte contre les maladies infectieuses dans les politiques de protection de la santé.

De nouvelles sources de pollution de l'eau sont apparues à partir de la fin des années 1950.

1. L'urbanisation croissante fait que les égouts concentrent la majeure partie de la pollution due à l'industrie et aux ménages (le pourcentage de Français vivant en ville a augmenté de 25 % depuis la fin des années 1950 et atteint maintenant 77 %).

2. La modernisation de l'agriculture a entraîné une pollution diffuse par les engrais et les pesticides et une raréfaction des habitats semi-naturels.

3. En 1950, la quasi-totalité des produits chimiques provenait de matières premières agricoles. Actuellement, ils sont quasiment tous issus du pétrole. La pétrochimie génère des dizaines de milliers de produits différents dont les déchets se retrouvent tôt ou tard dans l'eau (ils sont regroupés sous le

terme de micropolluants). Faute de recul, nous n'avons que très peu d'informations sur leur élimination dans la nature et sur leur nocivité pour l'homme.

Les déséquilibres biologiques observés dans les cours d'eau et sur le littoral ainsi que l'augmentation continue de la concentration de polluants dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines ont montré que les capacités d'autoépuration disponibles étaient insuffisantes pour faire face à ces nouvelles sources de pollution.

La lutte contre la pollution urbaine et industrielle a donné de bons résultats. L'insuffisance de l'autoépuration a été palliée par la généralisation des stations d'épuration. Cette politique a permis d'améliorer significativement la qualité des eaux des rivières et leur richesse biologique. Elle n'exclue cependant pas totalement le recours à l'autoépuration. En effet, certains polluants restent en solution et sont rejetés dans les cours d'eau. D'autres sont concentrés dans les boues puis se trouvent épandus dans les champs.

Les politiques mises en place pour lutter contre les pollutions diffuses d'origine agricole n'ont pas, en revanche, rencontré le succès escompté. Il s'avère très difficile de limiter les émissions polluantes à la source. L'alternative est donc d'augmenter les capacités d'autoépuration en favorisant l'extension des habitats semi-naturels.

Les micropolluants posent un problème difficile car les mécanismes de leur élimination dans la nature font encore l'objet de recherches. Faute d'informations précises, les débats tournent plus ou moins autour du principe ALARA (*As Low As Reasonnably Achievable*).

Peut-on séparer protection de la santé et protection de l'environnement ?

Il est en théorie toujours possible de réduire considérablement la concentration d'un polluant dans l'eau par un traitement approprié. En pratique, il faut traiter l'eau au plus près de la source de pollution pour minimiser les coûts et pallier les insuffisances de l'autoépuration (ex : dès la sortie des hôpitaux pour les résidus médicamenteux).

Dans un rapport récent intitulé *L'eau et son droit*, le Conseil d'Etat distingue en matière de protection des ressources en eau potable, « les normes destinées à la protection de la santé humaine de celles destinées à la protection des ressources » et s'interroge sur « la nécessité de fixer le même degré d'exigence pour le milieu ».

Cette proposition, qui consisterait à assouplir les normes environnementales tout en garantissant le respect de normes sanitaires strictes, suppose l'introduction une étape d'épuration supplémentaire. Nous avons vu plus haut que les capacités d'autoépuration sont actuellement insuffisantes pour faire face aux nouvelles sources de pollution. Le traitement supplémentaire devrait donc être réalisé lors de la potabilisation de l'eau. En l'état des connaissances, il ne semble pas que ce soit la solution la plus efficace, ni d'un point de vue technique, ni d'un point de vue économique.

L'encadrement réglementaire de l'eau basée sur les recommandations de l'OMS répond à un objectif de santé publique, mais l'amélioration de la qualité de l'eau nécessite une politique de protection efficace de l'environnement, capable de garantir une capacité d'autoépuration suffisante. Loin de s'opposer les deux types de normes sont complémentaires, d'égale importance et doivent répondre aux mêmes degrés d'exigence.

Références

Bernard CHOCAT. *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Eurydice 92. Lavoisier TEC & DOC. 1er mai 1997. ISBN 2-7430-0126-7.

Gérard MIQUEL. *La qualité de l'eau et l'assainissement en France*. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Rapport n° 215. 18 mars 2003. http://www.senat.fr/rap/l02-215-1/l02-215-11.pdf ; Annexes http://www.senat.fr/rap/l02-215-2/l02-215-21.pdf

La réglementation concernant les eaux usées. N° CB-6-1-d. Groupe Régional Environnement Eau Qualité Santé. DRASS Basse Normandie. 1er septembre 2004. http://basse-normandie.sante.gouv.fr/drass/environnement/GREEQS/outils/classeur/cb-6-1-d.htm

Guidelines for drinking-water quality, 3rd edition. Organisation mondiale de la Santé. 2005. http://www.who.int/entity/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf

De la bonne utilisation de l’eau de pluie et autres eaux alternatives : économie de la ressource et valorisation climatique

Arnaud Calaudi, Fabrice Delorme, Marie-Odile Delorme, Nina Fraigne, Denis Fraysse, Rudy Larsonnier, Emmanuelle Ollivier, Aziz Ourachane, Mathieu Paillard, Caroline Paolino, Bertrand Sarrey, Alain Hénaut.

DU Science et politiques publiques. Université Pierre et Marie Curie.

L’eau de pluie est selon les lieux et les saisons, une ressource parfois trop rare qu’il est nécessaire d’économiser, ou trop abondante qu’il faut alors maîtriser. Les pouvoirs publiques ont dans les deux cas un rôle à jouer, qu’il s’agisse de promouvoir des politiques d’économie de la ressource ou de mettre en place des plans d’urbanisme pour la prévention des risques naturels et la valorisation climatique.

Depuis la loi sur l’eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006, des mesures ont été prises afin d’inciter les particuliers à utiliser des ressources en eau autres que le réseau de distribution d’eau potable,. Ces ressources dites « alternatives » sont principalement, l’eau de pluie, l’eau des puits et les eaux retraitées à la sortie des stations d’épuration. La priorité est donnée à la récupération et l’utilisation de l’eau de pluie et plus particulièrement l’eau tombant sur les toits.

Le Conseil économique, social et environnemental, puis le Conseil d’Etat, se sont successivement interrogés sur le bien-fondé de ces mesures au regard des risques pour la santé et des économies réellement réalisées. On peut aussi se demander jusqu’à quel point ces mesures sont compatibles avec la prévention des risques naturels et la valorisation climatique en milieu urbain.

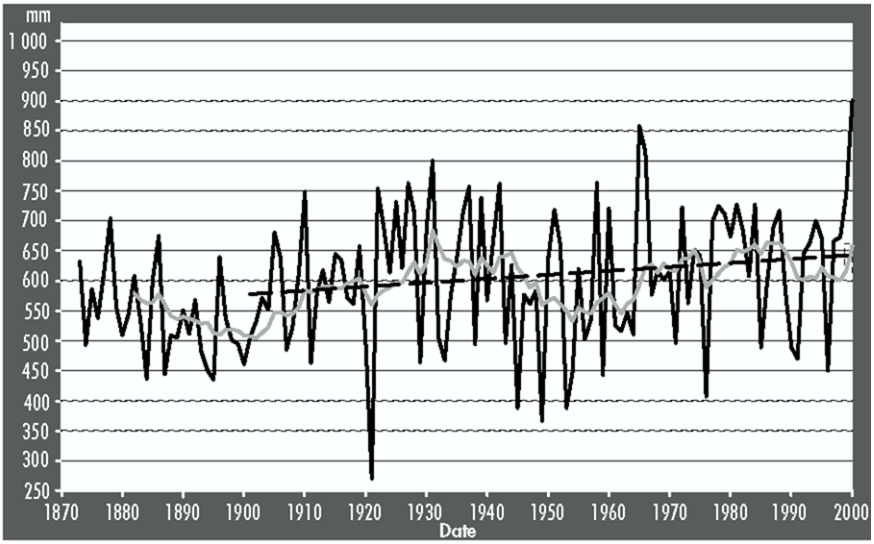
NB le dossier ne traite pas de l’utilisation de l’eau par les agriculteurs et les industriels.

Les ressources en eaux alternatives

Les principales alternatives à l’eau potable distribuée par le réseau public sont l’eau de pluie qui tombe sur le toit, l’eau du puits et les eaux retraitées à la sortie des stations d’épuration.

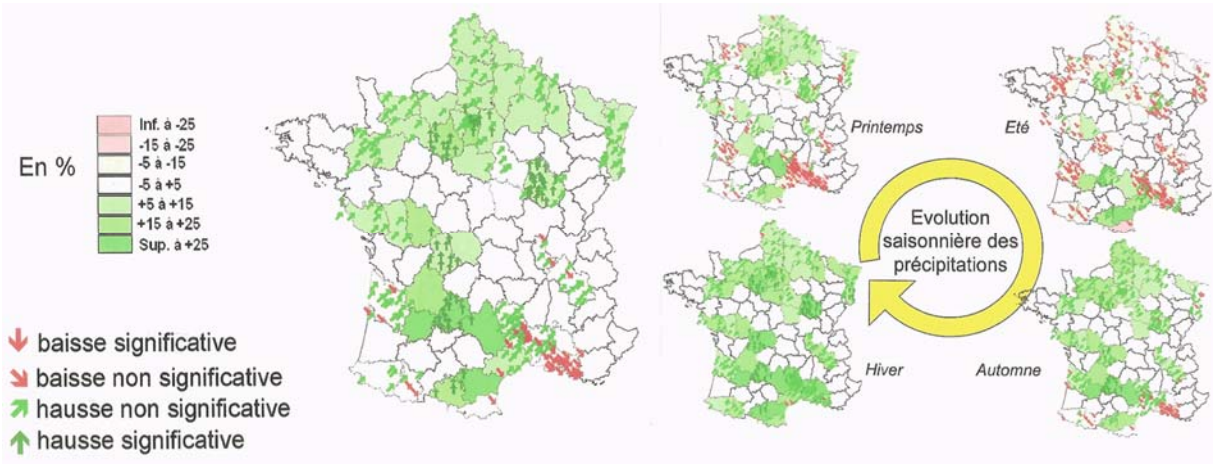
L’eau de pluie, une ressource fluctuante

La ressource en eau pluviale varie souvent de plus de 50 % d’une année sur l’autre.



Evolution du volume annuel des précipitations (en millimètres) à Paris-Montsouris de 1873 à 2000. La moyenne glissante sur quinze points est en gris et la tendance 1901-2000 en traits discontinus.

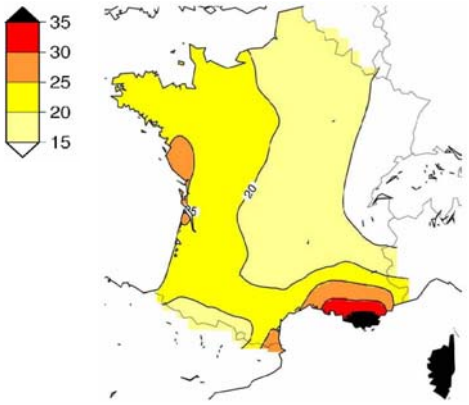
Elle fluctue aussi beaucoup au fil des saisons. Au cours du XX^{e} siècle, on a observé une diminution des précipitations en été dans la moitié de la France sans pour cela que le volume annuel des précipitations baisse (les précipitations annuelles ont diminué dans quelques endroits, dont les Bouches-du-Rhône).



Evolution du volume des précipitations entre 1901 et 2000. Carte de gauche : volume annuel ; cartes de droite : volume saisonnier.

La ressource potentiellement exploitable dépend de la surface du toit, de la pluviométrie et de l'efficacité du système de collecte (ex : pertes par évaporation). Elle est par exemple comprise entre 32,5 et 52 mètres cube par an pour une maison de 100 m^2 en Ile-de-France (pluviométrie moyenne actuelle de 650 mm × une surface de captage de 100 m^2 × 0,5 à 0,8 selon l'efficacité du système de collecte).

Un autre paramètre important est le nombre maximal de jours secs consécutifs en été car il conditionne le volume d'eau à stocker pour éviter une pénurie. La longueur maximale d'une période de sécheresse est d'environ trois semaines dans la majeure partie du pays.



Nombre maximal de jours secs consécutifs en été à la fin du XX^{e} siècle.

L'eau du puits, une ressource assez régulière mais soumise aux conflits de voisinage

Les puits assurent une ressource plus régulière que la pluie. Elle reste malgré tout sensible aux fluctuations de la pluviométrie car les particuliers n'ont accès qu'à des nappes phréatiques superficielles.

En revanche, un puits peut tarir à cause d'un forage chez un voisin. Ceci ne donne pas droit à une indemnité. En effet, si le propriétaire du sol a le droit « d'intercepter les veines d'eaux souterraines », il n'exerce ce droit qu'à hauteur de ce qu'il peut capter.

C'est aux pouvoirs publics, sous le contrôle du juge, qu'il incombe d'assurer un égal accès de tous à l'eau.

L'eau des stations d'épuration, une ressource indépendante des fluctuations climatiques

Les stations d'épuration sont les seules ressources alternatives où la quantité d'eau ne dépend pas de la pluie mais du nombre d'habitants. Elles ne sont donc pas sensibles aux périodes de sécheresse, ce qui est un avantage certain dans le cas de l'irrigation.

Il y existe pourtant des freins techniques à leur utilisation : 1) il faut un traitement important pour que la qualité de l'eau soit compatible avec l'arrosage d'espaces ouverts au public ; 2) il faut créer un second réseau de distribution pour amener l'eau jusqu'au point d'utilisation car les stations d'épurations sont à la périphérie des agglomérations.

Les différentes utilisations des eaux alternatives

L'analyse des utilisations de l'eau amène à distinguer au moins deux types d'eau :

- L'eau destinée au contact avec les aliments ou au contact prolongé avec le corps humain. Elle est obligatoirement potable.
- L'eau pour les autres usages. Elle n'est pas obligatoirement potable. Elle doit cependant être d'une qualité microbiologique suffisante pour que le public ne risque pas d'être contaminé lorsque l'eau est sous forme de gouttelettes dans l'air (ex : jet d'eau, chasse d'eau, arrosage).
- Le lavage du linge occupe une position intermédiaire. En Allemagne, la législation stipule que chacun doit pouvoir utiliser de l'eau potable à cette fin tout en laissant la possibilité d'utiliser une eau de qualité sanitaire inférieure. En France, le second cas n'est envisageable qu'avec équipement assurant notamment une désinfection de l'eau.

Les eaux alternatives sont rarement potables

L'eau de pluie n'est pas potable. Elle est souillée par les polluants présents dans l'air (15 à 25 % de la pollution totale) et par ceux qu'elle entraîne lorsqu'elle ruisselle sur le toit (75 à 85 % de la pollution totale). Trois exemples : 1) on trouve des micro-organismes pathogènes provenant des fientes d'oiseaux ; 2) dans 10 % des contrôles on observe une concentration de pesticides supérieure à la valeur admissible ; 3) la pollution par les nitrates est voisine de la valeur maximale autorisée. L'eau de pluie étant corrosive, la pollution chimique est aggravée si l'eau ruisselle sur un revêtement métallique ou du fibrociment. L'utilisation de l'eau de pluie dans les maisons est d'ailleurs interdite lorsque le toit est en fibrociment.

La réponse est moins tranchée pour l'eau de puits. D'une part, elle peut être tout à fait potable. D'autre part, la directive européenne de 1998 sur l'eau potable ne fixe pas de règles pour les points de captage fournissant moins de 10 m^3 par jour en moyenne ou approvisionnant moins de 50 personnes. Il reste malgré tout que l'eau de puits est souvent de mauvaise qualité. C'est un phénomène général : dans 30 % des cas, les points de captage d'eau souterraine ayant un très faible débit ont une qualité microbiologique insuffisante (ils représentent 80 % des cas de non-conformité). Ceci est dû aux infiltrations d'eau de ruissellement et à la pollution des nappes phréatiques superficielles.

Non seulement l'eau rejetée par les stations d'épuration n'est pas potable, mais elle pratiquement inutilisable sans traitement complémentaire, notamment parce qu'elle contient une concentration élevée de micro-organismes pathogènes.

La potabilisation des eaux alternatives est strictement réglementée

A part dans le cas des puits fournissant une eau de très bonne qualité, les eaux alternatives ne peuvent pas être rendues potables sans un traitement poussé.

Le niveau de qualité sanitaire requis pour l'eau destinée à la production d'eau potable dépend de l'importance des installations de potabilisations. Il existe un niveau de qualité minimum en dessous duquel il est interdit de produire de l'eau potable, quelle que soit la technique utilisée pour la potabilisation.

Il faut que l'eau utilisée soit d'une qualité microbiologique très supérieure à l'eau de baignade pour qu'une simple filtration suivie d'une désinfection aux UV suffisent. Il faut aussi que les concentrations de certains produits chimiques (ex : nitrates, pesticides) soient très basses car ces polluants ne sont pas éliminés par un traitement aussi simple. L'eau de pluie captée sur les toits ne répond pas à ces exigences.

La loi interdit de produire de l'eau potable à partir de l'eau rejetée par les stations d'épuration.

Les eaux alternatives, quelle qualité pour quels usages ?

Les directives européennes distinguent plusieurs niveaux de qualité selon l'utilisation qui sera faite de l'eau. L'eau de baignade peut servir de référence pour la question traitée ici car elle correspond en général à la qualité qui peut être atteinte pour des eaux provenant de ressources alternatives.

Une eau de qualité voisine de l'eau de baignade peut être utilisée à l'extérieur des bâtiments pour arroser et laver le sol et les véhicules. Elle peut être utilisée à l'intérieur des maisons pour les WC et pour laver le sol. En France, une désinfection complémentaire est nécessaire pour que l'eau puisse être utilisée dans un lave-linge.

Il faut une qualité microbiologique supérieure à celle de l'eau de baignade pour arroser les fruits et légumes consommés crus et les espaces verts ouverts au public (notamment les golfs) lorsque l'eau provient d'une station d'épuration. Cette qualité ne peut être obtenue que par une filtration poussée et une désinfection (cette étape est appelée traitement tertiaire). La réglementation est plus exigeante afin de prévenir les effets d'un éventuel dysfonctionnement du traitement tertiaire.

L'eau potable doit satisfaire à une soixantaine de critères de qualité. Les plus importants dans le cas présent sont ceux qui portent sur la contamination par des micro-organismes car ils ne sont généralement pas vérifiés dans les eaux provenant de ressources alternatives (sauf pour certains puits). Ils sont garants de l'absence de contamination fécale.

L’utilisation des eaux alternatives par les particuliers : une fausse bonne idée ?

Pour les particuliers, les mesures d’incitation à l’utilisation d’eaux alternatives concernent essentiellement la récupération de l’eau de pluie et l’utilisation de l’eau des puits. En France, 56 % des ménages habitent une maison individuelle comme résidence principale. Un peu plus de la moitié d’entre eux habite une commune rurale et ils ont généralement accès à un puits.

L’encadrement législatif et réglementaire de l’utilisation de l’eau de pluie et de l’eau du puits

Le propriétaire d’un terrain est propriétaire de l’eau de pluie et de l’eau du puits à hauteur de ce qu’il peut capter. En revanche, l’utilisation qu’il peut en faire est encadrée par la loi au titre de la protection de la santé et de la gestion de l’assainissement.

La législation part de la constatation que les eaux provenant de ressources alternatives peuvent être polluées. Aussi interdit-elle formellement tout raccordement permanent ou temporaire du réseau d’eau potable et du réseau d’eau alternative. Le respect de cette interdiction est très important car le réseau public de distribution d’eau potable peut être très rapidement contaminé par l’eau alternative. L’expérience montre que la décontamination coûte alors plusieurs centaines de milliers d’euros.

Puisqu’elle n’est pas potable, il est interdit d’utiliser l’eau de pluie pour la boisson, la préparation des aliments, le lavage de la vaisselle et l’hygiène corporelle. Pour mémoire, la moitié des familles possédant un puits l’utilise comme eau potable.

L’eau de pluie est utilisable sans contraintes à l’extérieur de la maison pour des activités telles que l’arrosage ou le lavage des véhicules. Son utilisation à l’intérieur des maisons pour les chasses d’eau de WC et le lavage des sols est encadrée pour éviter tout risque de confusion ou de mélange avec l’eau potable. L’utilisation de l’eau de pluie pour le lavage du linge est envisageable dans certaines conditions, notamment une désinfection de l’eau.

Une fois rejetées à l’égout, les eaux de pluies ou de puits usées sont retraitées au niveau de la station d’épuration. La loi retient deux solutions pour facturer l’assainissement : l’installation d’un compteur sur les ressources alternatives ou l’instauration d’une redevance forfaitaire. Dans le cas où l’eau de pluie est utilisée à l’intérieur de la maison, il faut établir un relevé mensuel de la quantité d’eau rejetée à l’égout.

L’entretien du réseau d’eau de pluie fait l’objet d’une réglementation précise et le propriétaire de l’installation doit tenir à jour un carnet sanitaire où sont notées toutes les interventions.

Le contrôle du bon usage de l’eau de pluie

Le respect de la réglementation repose quasi-exclusivement sur le civisme des propriétaires car les communes n’ont pas les moyens matériels d’exercer un contrôle. Par exemple, le propriétaire est obligé de déclarer à la mairie qu’il installe un système de récupération d’eau pluviale. C’est une démarche volontaire dont il a l’initiative. Pourtant, il peut bénéficier des déductions fiscales correspondantes sans être obligé de présenter le récépissé de déclaration.

Quand le propriétaire joue le jeu, le système est en théorie sans faille : 1) la présence d’un réseau d’eau de pluie à l’intérieur d’un bâtiment et les volumes d’eau rejetée à l’égout doivent être déclarés à la mairie ; 2) le propriétaire de l’installation tient à jour semestriellement un carnet portant sur toutes les opérations d’entretien et sur les volumes d’eau utilisés ; 3) un agent du service public de distribution d’eau potable peut venir contrôler l’installation ; 4) le préfet peut imposer un délai de mise en conformité.

De la même façon, les agents du service de l’eau peuvent contrôler les installations permettant d’utiliser l’eau du puits à l’intérieur d’un bâtiment.

Les usages possibles des eaux alternatives chez les particuliers

On admet généralement que les eaux alternatives peuvent répondre à 45 % des besoins en eau d'un ménage.

Ce chiffre n'est qu'un ordre de grandeur. En effet la consommation d'eau est très variable en fonction de la localisation géographique (environ 43 m^3 par habitant et par an dans le Nord de la France, 48 m^3 dans l'Ouest, 65 m^3 en Ile-de-France et 72 m^3 sur le pourtour méditerranéen), du type d'habitat (environ 80 m^3 par logement et par an dans les logements collectifs HLM et 160 m^3 pour un pavillon individuel) et des habitudes familiales. Par convention, les statistiques officielles retiennent le chiffre de 120 m^3 par logement et par an pour une résidence principale.

Les eaux alternatives peuvent être utilisées pour :

1. L'arrosage. Dans le cas des pavillons individuels, on considère généralement que l'arrosage d'une pelouse de 100 m^2 consomme 5 m^3. On compte aussi 5 m^3 pour le lavage des véhicules.
2. Les WC. Les WC à un seul bouton et réservoir de dix litres consomment 40 m^3 par an pour un ménage de quatre personnes. La consommation tombe à 25 m^3 pour des WC à deux boutons et réservoir de trois et six litres.
3. Le lave-linge. C'est usage reste marginal car il nécessite un équipement de prétraitement agréé par le ministère de la santé pour désinfecter l'eau. Il consomme 10 m^3 par an.

Des expériences menées en Ile-de-France montrent qu'une cuve de 2,5 m^3 suffit à couvrir les besoins en eau des WC tout au long de l'année pour un ménage de quatre personnes. En revanche, 60 % de l'eau de pluie récoltée est évacuée par le trop-plein et rejetée dans les égouts. De toute façon, sauf à concevoir des citernes totalement disproportionnées aux besoins, il est inévitable qu'elles débordent lorsqu'il pleut beaucoup.

Le coût des installations permettant d'utiliser l'eau de pluie chez un particulier

L'installation la plus simple est une cuve d'un mètre cube ou moins posée sur le sol et utilisée pour l'arrosage ou le lavage des véhicules. Elle coûte une centaine d'euros, soit l'équivalent de 25 m^3 d'eau potable. Elle permet d'arroser une pelouse de 100 m^2 (5 m^3 par an) et l'excédent d'eau peut être utilisé pour le lavage de la voiture. Le temps de retour sur investissement est inférieur à cinq ans.

Un stockage d'un mètre cube est insuffisant si l'eau de pluie est aussi utilisée à l'intérieur du bâtiment pour les WC. L'expérience montre qu'il faut dans ce cas une cuve enterrée d'au moins 2,5 m^3. Les coûts se répartissent alors entre l'équipement (prix des travaux de terrassement, de la cuve et des équipements annexes), le fonctionnement (ex : électricité pour le pompage de l'eau) et de la maintenance (ex : élimination des déchets susceptibles de pourrir ou de boucher le circuit de distribution, renouvellement des filtres et des joints).

Dans le cas d'un pavillon pour une famille de quatre personnes, l'équipement coûte de 4 000 à 5 000 euros pour une cuve béton de 10 m^3 avec filtre et groupe de pompage et de 1 000 à 2 000 euros pour le terrassement et les raccordements. C'est l'équivalent de 1 500 m^3 d'eau potable et les frais de fonctionnement équivalent à 10 m^3 d'eau potable par an. Le coût du double réseau d'eau diffère beaucoup suivant que l'installation a lieu au moment de la construction ou qu'elle est réalisée dans un bâtiment existant. Il n'est pas pris en compte ici.

L'eau de pluie fournissant environ 35 m^3 par an (25 m^3 pour les WC deux boutons à réservoir de trois et six litres, 5 m^3 pour l'arrosage et 5 m^3 pour le nettoyage de la voiture), l'économie sur la facture d'eau est de 80 euros par an (la diminution de 35 m^3 de la consommation d'eau potable est contrebalancée partiellement par une consommation d'électricité d'un coût équivalent à une augmentation de 10 m^3 de la consommation d'eau potable).

Dans ces conditions, le temps de retour sur investissement dépasse 50 ans. Le calcul ne tient pas compte d'une éventuelle taxe d'assainissement sur les eaux alternatives ni de la maintenance. On ne connaît pas actuellement les coûts supplémentaires induits par les opérations de contrôle et de maintenance imposées par le décret d'août 2008 sur la récupération des eaux de pluie.

NB le prix du mètre cube d'eau potable varie selon les communes. Il était en moyenne de 3,10 euros en France en 2009. Nous avons retenu pour les calculs ci-dessus 4,00 euros.

La maîtrise du gaspillage de l'eau

Une autre façon de diminuer la consommation d'eau potable est d'utiliser des équipements économes en eau. Cette solution présente plusieurs avantages. Elle permet des économies sur des postes où il n'y a pas d'alternative à l'eau potable. Elle ne nécessite pas d'investissements élevés. Elle est accessible aux personnes vivant dans des immeubles (44 % des Français ont leur résidence principale dans l'habitat collectif).

Les économies engendrées par une meilleure maîtrise de la consommation d'eau chez les particuliers

Le principal poste de consommation d'eau dans un ménage est la salle de bain, il est suivi par les WC, le lave-linge et le lave-vaisselle.

Le tableau ci-dessous porte sur la consommation d'une famille de quatre personnes vivant dans une maison individuelle avec une pelouse de 100 m^2. Il permet de comparer la consommation sans équipement particulier à la consommation avec un équipement permettant de réaliser des économies d'eau.

	Equipement standard	**Equipement économe en eau**
WC trois à quatre fois par personne et par jour	Réservoir de 10 l 40 m^3 par an soit 160 €	Réservoir 3 et 6 l deux boutons 25 m^3 par an soit 100 €
Lave-linge quatre lavages par semaine	Modèle ancien 100 l par lavage 20 m^3 par an soit 80 €	Modèle récent économique 50 l par lavage 10 m^3 par an soit 40 €
Baignoire, douche et lavabo toilette quotidienne de quatre personnes	Douche : 45 l par douche Bain : 150 l par bain Lavabo : 5 l par jour et par personne Quatre douches : 75 m^3 par an, soit 300 € Quatre bains : 230 m^3 par an soit 920 €	Douche économe* : 35 l par douche Lavabo avec robinet mousseur : 2,5 l par jour et par personne 55 m^3 par an soit 220 €
Lave-vaisselle vaisselle une fois par jour	Modèle ancien 40 l par jour 15 m^3 par an soit 60 €	Modèle récent économique : 20 l par jour 7,5 m^3 par an soit 30 €
Jardin 100 m^2 de pelouse 20 litres par m^2 50 fois par an	Arrosage à l'eau potable 5 m^3 par an soit 20 €	Stockage d'eau de pluie permettant de récupérer 5 m^3 par an
TOTAL	155 m^3 par an soit 620 € (310 m^3 par an soit 1 240 € dans l'option bain quotidien)	97,5 m^3 par an soit 390 € Environ 40 % d'économie par an

Consommation d'eau d'une famille de quatre personnes vivant dans une maison individuelle avec une pelouse de 100 m^2.
** La « douche économe » consiste à installer une douchette qui augmente la pression et qui diminue le débit et à ne faire couler l'eau que 5 minutes.*

Les actions les plus efficaces concernent l'hygiène corporelle. Elles permettent d'économiser 20 m^3 par an pour un faible investissement (environ 35 euros pour une douchette à pression plus élevée). Une modification de l'installation des WC permet d'économiser 15 m^3 par an, mais au prix d'un investissement plus élevé (environ 400 euros au lieu de 250 euros pour un réservoir standard). Le temps de retour sur investissement est de un à deux ans si le choix est fait à la construction et de cinq à dix ans si le réservoir à deux boutons remplace une installation existante.

Les 15 à 20 m^3 par an gagnés sur le lave-linge et le lave-vaisselle sont obtenus automatiquement lors du renouvellement des appareils tombés en panne.

Une diminution de la consommation est possible aussi dans l'habitat collectif. Elle est d'environ 35 % car elle n'inclue pas l'arrosage des pelouses.

NB le prix du mètre cube d'eau potable varie selon les communes. Il était en moyenne de 3,10 euros en France en 2009. Nous avons retenu 4,00 euros pour les calculs ci-dessus.

Les économies engendrées par une meilleure maîtrise de la consommation d'eau dans les établissements recevant du public

Les principaux postes de consommation d'eau dans les établissements recevant du public sont les lavabos et les WC (sauf cas particulier tels que les piscines). La consommation d'eau par personne des lavabos est plus élevée que chez les particuliers. Elle diminue fortement lorsque les robinets ordinaires sont remplacés par des robinets à fermeture automatique (la baisse de consommation peut atteindre 75 % et la dépense est amortie en quelques mois). En revanche, la consommation d'eau par personne pour les WC est en moyenne sur l'année deux fois plus faible que dans l'habitat.

L'utilisation d'eau non-potable (ex : eau de pluie) est fortement encadrée à l'intérieur des établissements recevant du public. Elle est strictement interdite dans les locaux accueillant des personnes fragiles (ex : enfants, malades, personnes âgées) ou dans lesquels on fabrique des produits destinés notamment à ces personnes.

Les fuites d'eau dans le réseau public de distribution

Les fuites du réseau public de distribution représentent 21 % de la consommation d'eau potable en France. La perte est très variable suivant les réseaux (5 % à Paris, 50 % dans les petites communes rurales). Cela représente 1,4 milliard de mètres cube d'eau potable par an (soit 5,6 milliards d'euros à 4 euros le mètre cube).

La lutte contre les fuites se heurte au coût des travaux et au gigantisme du réseau de distribution (environ 800 000 km de tuyaux en France). Les pouvoirs publics investissent entre 1 et 1,5 milliard d'euros par an pour des travaux ne portant à chaque fois que sur 1 % du réseau. Dans de nombreuses communes, le réseau de distribution a été modernisé à l'occasion de la suppression des conduites en plomb. Le coût des travaux a été estimé à 4,5 milliards d'euros pour la collectivité et 7,6 milliards d'euros pour les particuliers.

Paradoxalement, les fuites du réseau de distribution d'eau potable ont une utilité : elles pallient l'imperméabilisation des surfaces et évitent l'assèchement des sols urbains. En l'absence de fuite, les sols qui contiennent de l'argile se tassent, ce qui provoque des fissures dans les bâtiments, voire des désordres plus graves. En France, les phénomènes de ce type sont en train de devenir la première cause de déclarations de catastrophes naturelles.

Les eaux alternatives et la maîtrise des aléas climatiques

Les pouvoirs publics ne sont pas seulement responsables de l'approvisionnement en eau potable, ils doivent aussi prévenir les risques dus à la pollution et aux aléas climatiques (ex : inondations, sécheresses). Vu l'importance des dégâts matériels et, dans le pire des cas, des pertes humaines, la prévention des risques est prioritaire sur l'économie d'eau potable. Les solutions pertinentes ne sont pas nécessairement compatibles avec l'intérêt du particulier.

La gestion et le traitement des eaux pluviales et des eaux usées : un service public local

Les communes sont chargées de la collecte, du transport, du stockage et du traitement des eaux pluviales et des eaux usées. Les eaux usées sont collectées par les égouts et traitées dans des stations d'épuration. Les eaux pluviales peuvent être collectées avec les eaux usées (réseau unitaire) ou faire l'objet d'une collecte séparée (réseau séparatif). Le réseau unitaire, plus ancien, est surtout présent dans les petites communes (moins de 400 habitants) ou à l'inverse dans les centres villes anciens des communes de plus de 50 000 habitants.

Le réseau unitaire présente l'inconvénient d'envoyer des volumes très fluctuants à la station d'épuration alors qu'il faut un débit régulier pour que celle-ci fonctionne correctement. Le système séparatif est constitué d'un double réseau, l'un dédié aux eaux usées et l'autre aux eaux pluviales. Le traitement des eaux usées en est facilité. En revanche, les eaux pluviales échappant de ce fait à l'épuration, il faut leur prévoir un traitement spécifique. La séparation est loin d'être absolue dans le système séparatif à cause du grand nombre d'erreurs de branchements (il y a jusqu'à 40 % d'inversions dans les villes nouvelles de la région parisienne).

Les communes sont obligées de délimiter sur leur territoire les zones où des mesures doivent être prises pour limiter l'imperméabilisation des sols et lutter contre les inondations. Elles doivent aussi délimiter les zones où des aménagements sont nécessaires pour protéger les milieux récepteurs (fleuves et nappes phréatiques). Les pouvoirs publics peuvent imposer un ruissellement maximum sans pour autant fixer les moyens à mettre en œuvre (ex : trois litres d'eau par seconde et par hectare dans les constructions nouvelles à Berlin, deux litres d'eau par seconde et par hectare en Ile-de-France). En Belgique en revanche, la réglementation porte sur les moyens : elle impose la création de citernes pour éviter une surcharge des égouts (dimensions minimales de 33 litres par m² de surface de toitures).

La gestion des eaux pluviales est un service public qui peut être financé par une taxe payée par les propriétaires d'immeubles raccordés au réseau public de collecte des eaux pluviales. Le traitement des eaux usées est facturé en même temps que la consommation d'eau potable. Il représente à peu près la moitié de la facture pour un particulier (hors taxes et redevances).

La gestion et le traitement des eaux pluviales et des eaux usées : le classique traitement « en bout du tuyau »

Les traitements classiques partent du principe que les eaux pluviales et les eaux usées sont des déchets qu'il faut éliminer le plus rapidement possible.

La première étape a été de construire un réseau d'égouts permettant d'évacuer rapidement les eaux pluviales et les eaux usées et de les rejeter loin de la ville. Elles sont ensuite traitées « en bout de tuyau ».

Au début des années 1980, ce système avait atteint ses limites à cause de l'urbanisation de la périphérie des villes. Il a été complété par des bassins de retenue. Leur rôle est double : 1) limiter les débits de pointe ; 2) réaliser un assainissement sommaire pour protéger les milieux récepteurs. Bien que ce ne soit pas leur vocation première, les bassins de retenue peuvent trouver une place dans le paysage urbain (ex : plans d'eau, zones humides, espaces verts).

Une autre amélioration de l'approche « en bout du tuyau » a été d'augmenter la qualité des eaux rejetées par les stations d'épuration.

Un traitement tertiaire des eaux usées à la sortie des stations d'épuration répond à deux besoins : 1) protéger l'environnement en rejetant une eau suffisamment épurée ; 2) fournir une ressource alternative pour pallier aux difficultés d'approvisionnement dans les cas où on peut utiliser de l'eau non potable. Dans le second cas, la qualité sanitaire minimum de l'eau est fixée par l'arrêté du 2 août 2010. L'arrêté précise notamment le niveau à atteindre pour l'arrosage des espaces verts et l'irrigation des cultures.

En France, le traitement tertiaire sert principalement à préserver la qualité des eaux de baignade. L'arrosage des espaces verts et des golfs reste marginal alors qu'il se développe en Italie et en Espagne. Une des raisons invoquée est l'importance de l'investissement au regard de besoins en eau qui restent modestes dans notre pays. Une autre est l'absence d'une réglementation adaptée, l'arrêté d'août 2010 ne résolvant que partiellement ce problème.

La gestion et le traitement des eaux pluviales : le traitement innovant « dès que la goutte d'eau tombe »

Les surfaces imperméabilisées ont pris une telle importance dans les zones urbaines qu'il a fallu limiter les ruissellements en traitant l'eau de pluie sur place au lieu de la rejeter dans les égouts (on parle de gestion « à la parcelle » et « dès que la goutte d'eau tombe »). Il existe plusieurs techniques qui sont généralement utilisées simultanément. Elles visent toutes à valoriser les eaux pluviales.

La première famille de techniques est le stockage de la pluie à l'endroit où elle tombe combiné à un dispositif permettant de disposer de nouveau des capacités de stockage maximales lors de la prochaine pluie. Il faut noter que cette façon de faire est diamétralement opposée à celle d'un particulier. En effet, ce dernier souhaite avoir toujours un maximum d'eau dans sa citerne en prévision des jours secs. Dans ces conditions, la citerne déborde au moment des fortes pluies et le trop-plein est rejeté à l'égout.

L'eau peut être stockée dans des citernes qui sont vidées rapidement après la pluie ou dans des bassins en plein air. Un dimensionnement suffisant des bassins permet d'éviter qu'ils soient à sec pendant les périodes de sécheresse et qu'ils débordent lors des fortes pluies. Le toit végétalisé s'apparente à cette logique de stockage et élimination. Il stocke l'eau (un sol de 10 cm retient plus de 35 mm d'eau) et diminue le ruissellement de 45 à 60 % grâce à l'évapotranspiration. Là encore, l'objectif est diamétralement opposé à celui d'un particulier qui souhaite récupérer le plus possible d'eau de pluie.

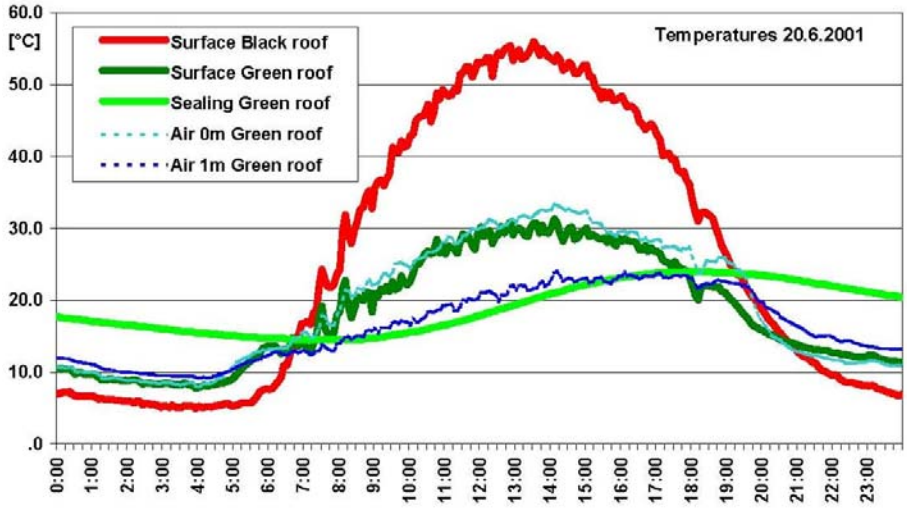
Une autre solution est de favoriser l'infiltration dans le sol (ex : espaces verts, revêtements poreux pour les chaussées). La chaussée peut jouer un rôle non négligeable puisqu'elle représente plus de 10 % de la surface d'une ville. Les deux utilisations principales de l'infiltration de l'eau de pluie sont : 1) limiter l'assèchement des sols urbains et les tassements de terrains qui en résultent ; 2) alimenter la nappe phréatique pour lutter contre les risques de pollution des eaux souterraines (ex : envahissement des nappes phréatiques des communes du littoral par l'eau de mer).

L'utilisation de l'eau de pluie dans les bâtiments à la place de l'eau potable ne consomme qu'une faible partie de l'eau à éliminer. Il en est de même de l'irrigation des espaces verts car les surfaces sont généralement petites en ville.

La valorisation climatique des eaux pluviales

L'eau de pluie peut également être utilisée pour améliorer le microclimat urbain en exploitant l'abaissement de température provoqué par l'évaporation et l'évapotranspiration. Cette valorisation climatique combine le plus souvent un intérêt collectif (action au niveau de la rue, du quartier ou de la ville) et un intérêt individuel (réduction de la température intérieure des immeubles).

Les techniques de base sont l'aménagement de plans d'eau et l'installation de toitures végétalisées. Dans le second cas, il s'agit le plus souvent de couvrir un toit en terrasse d'une pelouse rase demandant peu d'entretien (ex : sedum). Aux heures chaudes, on observe une chute de température de plusieurs degrés à proximité des pièces d'eau et sur les toits végétalisés.



Températures observées en fonction de la nature du toit (Cultural Center UFA-Fabrik à Berlin). Surface Black roof : revêtement en bitume ; Surface Green roof : toiture végétalisé ; Sealing Green roof : membrane imperméable sous la couche de gazon.

Le quartier de Potsdamer Platz à Berlin illustre bien cette approche. Il a une surface au sol de 68 000 m^2 et une surface construite de 555 000 m^2 dont un tiers de bureaux. Une partie de l'eau de pluie est éliminée par évapotranspiration grâce à des toitures végétalisées. Le reste, 23 000 m^3 par an, est réparti en trois : 11 100 m^3 s'évaporent dans des bassins ornementaux, 10 800 m^3 sont utilisés pour les WC après filtrage et désinfection et

1 100 m^3 servent à l'arrosage des pelouses. Cet exemple a cependant ses limites : c'est un dispositif complexe qui nécessite un personnel technique nombreux et qualifié.

La valorisation climatique de l'eau de pluie est couramment utilisée dans plusieurs pays européens. Par exemple, 40 % des villes allemandes subventionnent l'installation de toitures végétalisées. La ville de Baden, en Suisse, va jusqu'à prélever une taxe pour les bâtiments sans toiture végétalisée et sans infiltration d'eau pluviale. La valorisation climatique reste marginale en France. Parmi les raisons, on peut citer l'inertie des pouvoirs publics et des entreprises et une fiscalité défavorable.

Récupérer et utiliser les eaux alternatives : intérêt collectif *vs* intérêt particulier

Les pouvoirs publics sont confrontés à la nécessité de repenser la place de l'eau dans la ville pour répondre à l'engorgement des réseaux d'assainissement. La façon d'aborder le problème a beaucoup changé au cours des trente dernières années. On est passé de la gestion technique du ruissellement et de l'assainissement à l'amélioration du microclimat urbain. La maîtrise de la consommation d'eau potable dans les bâtiments publics ne vient qu'en second. Elle repose principalement sur l'installation d'équipements économes en eau.

Les ménages qui utilisent l'eau de pluie ou l'eau du puits mettent majoritairement deux motivations en avant : 1) réduire la facture d'eau (« l'eau de pluie est gratuite ») ; 2) ne pas subir de restrictions d'eau en cas de sécheresse. On observe aussi depuis quelques années une motivation écologique : « préserver la ressource en eau potable ».

Il appartient à chacun d'évaluer les économies qu'il réalise réellement. Cependant, il faut être conscient que ces choix présentent un risque de dérégulation économique du système de gestion de l'eau.

L'utilisation d'eaux alternatives par les ménages ne change pas le débit de pointe du réseau public de distribution puisqu'ils ont recourt à l'eau potable pendant les périodes de sécheresse prolongée. En revanche, le réseau est surdimensionné la majeure partie de l'année. A Berlin, où la baisse de la consommation a été de -16,5 % en dix ans, il faut faire couler l'eau potable à pure perte pour éviter les problèmes sanitaires dus à la stagnation de l'eau dans les tuyaux.

De plus, la logique des ménages pose un problème d'égalité face au principe pollueur-payeur si on ne facture pas l'assainissement des eaux alternatives rejetées à l'égout. En effet, actuellement le traitement des eaux usées est facturé en même temps que la consommation d'eau potable. Il représente à peu près la moitié de la facture pour un particulier (hors taxes et redevances).

Enfin, la baisse de la consommation provoque inévitablement une augmentation du prix du mètre cube d'eau potable car plus de 80 % des charges des opérateurs sont constituées de frais fixes (ceux-ci sont alors répartis sur un volume moindre). On aboutit à une augmentation des inégalités sociales au détriment des ménages vivant en habitat collectif.

Références

Bernard CHOCAT. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Technique et Documentation – Lavoisier. Mai 1997. ISBN 2-7430-0126-7.

Marielle MONTGINOUL. La consommation d'eau des ménages en France : état des lieux. Cemagref & Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. 10 juin 2002. http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/Eau_de_consommation.pdf

Sibylle C. CENTGRAF, Marco SCHMIDT. Water management to save energy, a decentralized approach to an integrated sustainable urban development. Rio5 – World Climate & Energy Event. Rio de Janeiro. 15-17 February 2005. http://www.a.tu-berlin.de/GtE/forschung/Adlershof/Rio2005.pdf

Récupération et utilisation de l'eau de pluie dans les opérations de construction : Retours d'expériences et recommandations. CSTB, Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies Ile-de-France. Avril 2007. http://www.areneidf.org/medias/publications/Recuperation_et_utilisation_de_leau_de_pluie_dans_.pdf

Valentina LAZAROVA, François BRISSAUD. Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, **299** (2007) 29-39.
http://www.ecoumenegolf.org/XEauXLAZAROVA.pdf

Gwenaëlle LAVISON, Laurent MOULIN. Réutilisation des eaux usées : réglementation actuelle et paramètres d'intérêt. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, **299** (2007) 41-46.
http://www.ecoumenegolf.org/XEauXMoulin%20CRECEP.pdf

M. ABIRACHED, D. DELAGE, J.A. FABY. Utilisation des eaux pluviales dans l'habitat aux Pays-Bas et en Allemagne : réglementation en vigueur ; bilan des actions menées ; retours d'expériences. Office International de l'Eau. Juin 2008. http://www.onema.fr/IMG/pdf/2008_025.pdf

Bernard CHOCAT. Etat de l'art sur la gestion urbaine des eaux pluviales et leur valorisation. Office International de l'Eau. Juillet 2008. http://www.onema.fr/IMG/pdf/2008_023.pdf

Arrêté du 21 août 2008 relatif à la récupération des eaux de pluie et à leur usage à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.
http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000019386409&fastPos=1&fastReqId=712626971

Guide des économies d'eau dans les bâtiments et espaces publics. Etablissement public du bassin de la Vienne. Janvier 2009. http://www.eptb-vienne.fr/IMG/pdf/Guide_Eco_Eau_allege.pdf

Paul DE VIGUERIE. Les usages domestiques de l'eau. Conseil économique, social et environnemental. 29 avril 2009. http://www.conseil-economique-et-social.fr/rapport/pravi/PA080940.pdf

Systèmes d'utilisation de l'eau de pluie dans le bâtiment. Règles et bonnes pratiques à l'attention des installateurs. Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature. Août 2009.
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/DGALN_plaquette_systemes%20eau_pluie_batiment_aout%202009.pdf

Cadrage du programme environnemental construction et rénovation des EPLE de la Région Ile-de-France. Décembre 2009. http://lycees.iledefrance.fr/jahia/webdav/site/lycee/users/mcbes/public/RIDF-Doc_cadrage_V0_2009-12-03.pdf

L'eau et son droit. Rapport public 2010. Conseil d'Etat. 4 juin 2010. http://www.conseil-etat.fr/cde/media/document/eau_droit_rapport.pdf

Arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts.
http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=99868DDD2C81DE622B2DCA29DBD16CD0.tpdjo12v_3?cidTexte=JORFTEXT000022753522&dateTexte=20110618

Economisons l'eau ! Ministère de l'écologie. 31 mai 2011. http://www.developpement-durable.gouv.fr/Des-gestes-simples-pour-economiser.html

Les dossiers

Pollution de l'air et santé : il s'agit avant tout d'un problème de particules en suspension

Gucki Riva, Nathalie Michielsen, Emmanuelle Ollivier, Marie-Odile Delorme, Daniel Daugeron, Paolo Ferloni, Gérard Taravella, Alain Hénaut

Diplôme d'Université
Science et politiques publiques
(*Science and Policy Making in Europe*)

Pollution de l'air et santé : il s'agit avant tout d'un problème de particules en suspension

Le dossier traite des effets de la pollution de l'air sur la santé. Il porte principalement sur les particules présentes dans l'air et notamment les particules d'origine biologiques.

La taille des particules est un facteur qui est généralement sous-estimé par les personnes qui étudient les effets de la pollution de l'air sur la santé. Pourtant, la dispersion des polluants et leur point d'entrée chez l'homme est fonction de leur taille, les solutions techniques pour leur confinement aussi. La nature chimique des polluants intervient dans un second temps pour spécifier leur toxicité et les maladies qu'ils provoquent.

Le dossier s'inspire fortement de la procédure élaborée au cours des années pour la radioprotection : identification des sources, physique de la dispersion des polluants, barrières permettant d'isoler deux à trois zones à risque décroissant.

Gucki Riva, Nathalie Michielsen, Emmanuelle Ollivier, Marie-Odile Delorme, Daniel Daugeron, Paolo Ferloni, Gérard Taravella, Alain Hénaut

www.ihest.fr

L'air que l'on respire 5

Qu'est-ce que l'air ? Quand dit-on qu'il est pollué ? 5
L'air contient-il des particules en suspension ? 5
La pollution de l'air est-elle concentrée dans les gaz ou dans les particules ? 5
Quelles particules trouve-t-on dans l'air que nous respirons ? 5
Quelle est la proportion relative des différentes tailles de particules ? 6
Quelle est la composition chimique des particules présentes dans l'air ? 7
D'où proviennent les particules présentes dans l'air à l'intérieur des habitations ? 7
Quelles sont les variations saisonnières de la composition chimique de l'aérosol urbain ? 7

La propagation des particules dépend de leur taille 8

Comment définir la taille d'une particule ? 8
La taille des particules influe-t-elle sur leur réactivité chimique ? 8
Les particules changent-elles de taille au cours du temps ? 9
Les particules restent combien de temps en suspension dans l'air ? 9
Que deviennent les gouttelettes d'eau présentes dans l'air ? 10
Que devient l'aérosol produit par un éternuement ou une toux ? 10
Quelle est la survie des agents pathogènes dans les bioaérosols ? 11

La ventilation : une solution pour améliorer la qualité de l'air dans les locaux 11

Quel profit tirer de l'expérience de l'industrie nucléaire dans la maîtrise de la contamination ? 11
Peut-on éliminer les particules en filtrant l'air ? 12
La filtration de l'air est-elle efficace ? 13
Peut-on purifier l'air efficacement avant de le faire pénétrer dans les bâtiments ? 13
Les masques protègent-ils efficacement contre l'inhalation de particules ? 14
Quels sont les effets de la climatisation ou de la ventilation sur la pollution dans les bâtiments ? 14
Comment lutter contre la propagation des maladies contagieuses ? 15
La climatisation favorise-t-elle la propagation des maladies contagieuses ? 15
Ouvrir les fenêtres est-elle une solution efficace contre la pollution de l'air intérieur ? 15
Peut-on concilier renouvellement de l'air et économies de chauffage ? 15

Le passage des particules dans le corps 16

Lorsqu'on respire que deviennent les particules présentes dans l'air ? 16
Comment les particules sont-elles éliminées après s'être déposées dans les poumons ? 16
Qu'arrive-t-il lorsqu'on inhale des microbes ? 17
Les particules peuvent-elles passer des voies respiratoires au reste du corps ? 17
Les particules peuvent-elles passer des voies digestives au reste du corps ? 17
Les particules traversent-elles la peau ? 18

Les effets de la pollution de l'air sur la santé 18

Danger ou risque, de quoi parle-t-on ? 18
Quelle est l'influence de l'humidité sur la qualité de l'air dans les locaux ? 18
Comment détermine-t-on la nocivité des polluants présents dans l'air ? 19
Quels sont les effets de la pollution de l'air sur la santé ? 19
De quoi dépend la nocivité des particules ? 19
Est-ce que les nanoparticules utilisées dans l'industrie présentent un danger ? 20
Quelles sont les spécificités de la pollution d'origine biologique ? 20
Quelle est l'origine des agents pathogènes présents dans l'air ? 20
Quels problèmes de santé peuvent apparaître lorsqu'on remue la poussière ? 21

La protection des personnes contre la pollution de l'air à l'intérieur des locaux 21

Surveille-t-on la qualité de l'air chez les particuliers ? 21
Comment éviter les problèmes de santé dus aux acariens et autres allergènes naturels ? 21
Les systèmes de ventilation fonctionnent-ils correctement ? 22
Quelles sont les maladies dues à la qualité de l'air des bureaux ? 22
La qualité de l'air est-elle surveillée dans les établissements recevant du public ? 22
Comment prévenir une contamination accidentelle ou intentionnelle de l'air dans les bâtiments ? 22
La qualité de l'air sur le lieu de travail est-elle encadrée par la loi ? 23

Existe-t-il des maladies professionnelles liées à la pollution de l'air ? 23
Comment mesurer l'exposition aux nanoparticules sur le lieu de travail ? 23
Les nanomatériaux présentent-ils des risques particuliers pour les travailleurs ? 24

La protection contre la pollution de l'air dans les établissements scolaires et les hôpitaux 24

La qualité de l'air est-elle surveillée dans les établissements scolaires et les hôpitaux ? 24
Comment a-t-on déterminé les valeurs à ne pas dépasser pour le radon ? 24
Que se passe-t-il lorsque la concentration de radon dépasse les valeurs tolérées ? 25
L'architecture hospitalière est-elle conçue pour éviter les contaminations par l'air ? 25
Quel est le taux minimal de renouvellement de l'air dans un hôpital ? 25

La protection des personnes contre la pollution de l'air à l'extérieur 26

Quelles sont les origines des particules présentes dans l'air à l'extérieur ? 26
A quoi correspondent les informations sur la qualité de l'air extérieur ? 26
Comment mesurer les particules en suspension dans l'air ambiant ? 26
De combien faut-il s'éloigner des routes pour éviter la pollution automobile ? 27
Quels sont les modes de transports urbains où l'on est le plus exposé à la pollution ? 27
Les émissions atmosphériques des entreprises sont-elles réglementées ? 28
Quels sont les risques de contamination par les légionelles dus aux tours de réfrigération ? 28
Quel est le rôle des aérosols dans la pollution par les dioxines ? 28
La qualité de l'air s'est-elle améliorée en ville ? 28
Quels sont les responsabilités et le rôle des pouvoirs publics en matière de qualité de l'air ? 29

Références 31

L'air que l'on respire

Qu'est-ce que l'air ? Quand dit-on qu'il est pollué ?

L'air est le mélange gazeux qui constitue l'atmosphère terrestre. Une partie des constituants sont en proportions variables (ex : la vapeur d'eau, le gaz carbonique). Ils sont considérés comme des impuretés. L'air débarrassé des impuretés a une composition remarquablement constante : azote 78,05 %, oxygène 21,017 %, argon 0,932 %, néon et autres gaz rares 0,001 %.

L'air est pollué lorsqu'il contient des matières toxiques pour l'homme ou l'environnement. On distingue les polluants chimiques (ex : oxydes d'azotes, vapeurs de solvants), physiques (ex : amiante, poussière de charbon) et biologiques (ex : microbes, débris allergènes).

([1] pp. 227-228, p. 8270)

L'air contient-il des particules en suspension ?

Oui. En ville, on trouve généralement entre 10 000 et 100 000 particules par centimètre cube dans l'air. Ce sont principalement des particules de moins de 0,1 mm. Du fait de leur petite taille, elles restent longtemps en suspension dans l'air. On dit qu'elles forment un aérosol. On parle de bioaérosol lorsque les particules en suspension sont d'origine biologique (ex : microbes, débris organiques, spores).

La plupart des particules sont des agrégats hétérogènes de particules plus petites sur lesquelles se fixent des molécules qui n'ont pas nécessairement la même composition chimique.

On appelle nanoparticule une particule dont une dimension est en dessous de 100 nm (les molécules ont une taille inférieure au nanomètre).

millimètre	**mm**	0,000 001	0,000 01	0,000 1	0,001	0,01	0,1	1
micromètre	**µm**	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1 000
nanomètre	**nm**	1	10	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000

Conversion des différentes unités de longueur.

([37] pp. 45-46, pp. 49-50, pp. 63-64, p. 148)

La pollution de l'air est-elle concentrée dans les gaz ou dans les particules ?

Les composés volatils sont présents à la fois dans les particules et sous forme gazeuse. Pour un composé donné, la répartition entre particules et état gazeux dépend de la nature des particules, de la température et de l'humidité de l'air. La partie fixée sur les particules est potentiellement plus nocive car elle se dépose dans les alvéoles pulmonaires.

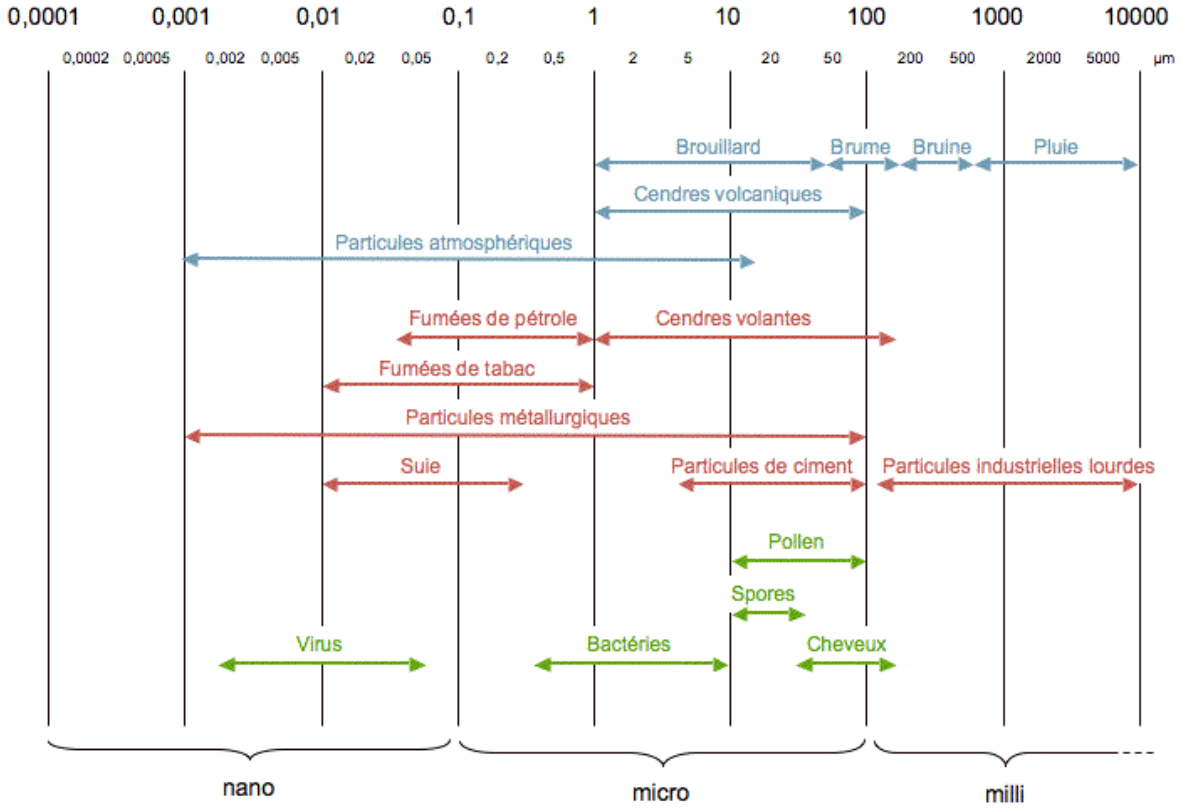
Les oxydes de soufre sont presqu'uniquement dans les particules (sous forme de sulfates). Les oxydes d'azote restent en phase gazeuse tant qu'ils ne se combinent pas avec d'autres substances (ex : ammonium) ou des particules préexistantes.

Les composés organiques volatils ne restent pas longtemps à l'état gazeux car l'oxydation les transforme en produits peu volatils. Ils se condensent alors en nanoparticules ou ils se fixent sur des particules préexistantes. L'efficacité du second mécanisme augmente si les nanoparticules contiennent des polluants acides.

([8] pp. 33-34, [86], [37] pp. 63-65, pp. 146-148, p. 579)

Quelles particules trouve-t-on dans l'air que nous respirons ?

Les particules présentes dans l'air sont très diverses. La diversité touche autant les sources de particules (phénomènes météorologiques, activités humaines, origine biologique) que leur taille : les grains de pollen ont un diamètre compris entre 20 et 50 µm ; les bactéries mesurent quelques micromètres ; les moteurs diesel émettent des particules d'une taille allant de 50 nm à 1 µm ; les virus font entre 10 et 100 nm.

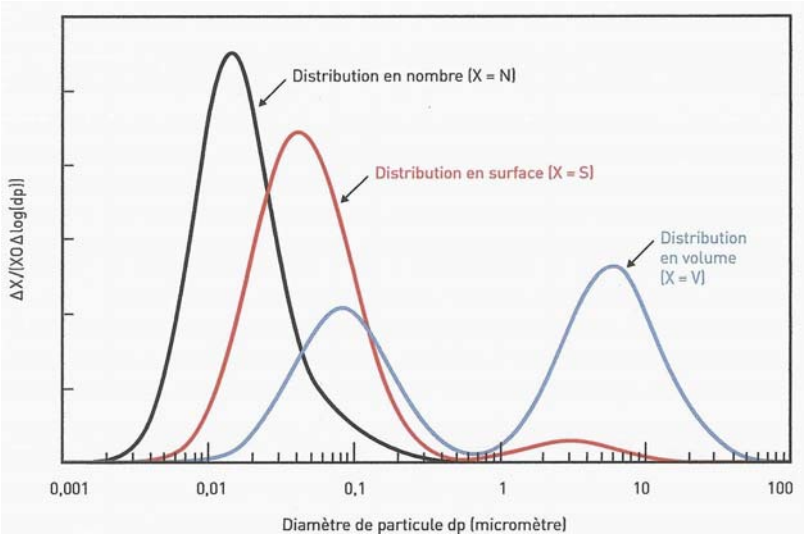


Dimension des particules présentent dans l'air (adapté de [71] p. 89).

([2] p. 1-2, [23] p. 38, [28] pp. 336-337, [37] p. 45, pp. 49-50, p. 151, [71] p. 89)

Quelle est la proportion relative des différentes tailles de particules ?

La proportion relative des différentes tailles de particules varie suivant que l'on mesure leur volume, leur surface ou leur nombre.



Distributions typiques des particules présentes dans l'atmosphère en ville (volume et masse sont des grandeurs équivalentes). L'ordonnée est une grandeur apparentée au pourcentage ([23] p. 39).

Les nanoparticules sont les plus nombreuses, mais elles constituent une masse négligeable. Les particules de quelques micromètres forment la moitié de la masse alors que leur nombre est négligeable (généralement entre dix et cent particules par centimètre cube). Enfin, les particules dont le diamètre est compris entre 10 et 100 nm sont responsables de la majeure partie de la surface de contact entre les particules et le milieu ambiant.

([22] pp. 38-39, [37] pp. 146-148, [74] pp. 3-4)

Quelle est la composition chimique des particules présentes dans l'air ?

On trouve dans l'air sous forme de particules (1) des composés carbonés : le noir de carbone (également appelé carbone-suie) et plusieurs centaines de composés organiques différents (notamment les *composés organiques volatils* ou COV et les *hydrocarbures aromatiques polycycliques* ou HAP) ; (2) des polluants basiques et acides (l'ammonium et les acides chlorhydrique, nitrique, sulfurique) ; (3) des composés d'origine biologique (ex : pollens, divers micro-organismes, débris bactériens) ; (4) de très nombreux métaux.

La composition chimique des particules évolue sous l'effet des oxydations et des réactions provoquées par le rayonnement solaire. Ces processus transforment des composés chimiques présents à l'état gazeux en des produits moins volatils qui se condensent en particules (les particules secondaires appelées aussi aérosols organiques secondaires).

([39] pp. 2-4, pp. 33-34, [53] p. 5, [58] pp. 13-15, [80] p. 58)

D'où proviennent les particules présentes dans l'air à l'intérieur des habitations ?

A l'intérieur des habitations, l'air est pollué par (1) des composés organiques volatils (COV) émis par les matériaux de construction (ex : panneaux de particules de bois aggloméré, isolants, moquettes), les produits d'entretien, les peintures, les solvants et par (2) des particules produites lors de la cuisson et, dans une moindre mesure, par la fumée de cigarette.

On regroupe sous l'appellation COV des composés très divers qui ont en commun de s'évaporer à la température ambiante. Les COV s'oxydent rapidement et se transforment alors en molécules peu volatiles qui se fixent sur les particules présentes dans l'air.

La pollution d'origine biologique est une autre source de particules dans les locaux (ex : déjections d'acariens, moisissures). Un mauvais entretien des climatiseurs / humidificateurs favorise la production de particules d'origine biologique.

Les particules finissent par se déposer sur le sol et les murs. Les polluants sont remis en suspension lorsqu'on remue la poussière.

([15] p. 3409, [35] pp. 958-961, [36] pp. 8-10, [45] pp. 8347-8351, [55])

Quelles sont les variations saisonnières de la composition chimique de l'aérosol urbain ?

La composition chimique de l'aérosol urbain varie beaucoup au cours des saisons. Elle varie aussi en fonction de la taille des particules et du lieu où sont faites les mesures. On peut tout au plus parler de composition moyenne pour un lieu et une période donnée.

Le tableau ci-dessous présente la composition moyenne des particules observée à Paris au cours de plusieurs campagnes de mesures en 2005.

	$PM_{0,1}$		$PM_{0,1\text{-}1}$		$PM_{1\text{-}2,5}$		$PM_{2,5\text{-}10}$	
	Hiver	Eté	Hiver	Eté	Hiver	Eté	Hiver	Eté
Noir de carbone	16 %	11 %	9 %	15 %	5 %	7 %	3 %	7 %
Composés organiques	65 %	60 %	41 %	39 %	32 %	43 %	19 %	43 %
Pollution acide	18 %	29 %	48 %	41 %	43 %	22 %	23 %	15 %
Sel de mer	0 %	0 %	1 %	1 %	9 %	9 %	15 %	9 %
Poussières minérales	0 %	0 %	1 %	4 %	11 %	19 %	40 %	26 %

Composition chimique moyenne des particules à Paris au cours de l'année 2005 ([38] pp. 66-68).
<u>Composants dus aux activités humaines :</u> noir de carbone, composés organiques et ions responsables de la pollution basique

et acide (l'ammonium et les acides chlorhydrique, nitrique et sulfurique).
Composants d'origine naturelle : sel de mer et poussières minérales.
$PM_{0,1}$: particules de moins de 0,1 µm
$PM_{0,1-1}$: particules comprises en 0,1 µm et 1 µm
$PM_{1-2,5}$: particules comprises en 1 µm et 2,5 µm
$PM_{2,5-10}$: particules comprises en 2,5 µm et 10 µm

Les composants majoritaires des particules sont les composés organiques et les ions responsables de la pollution basique et acide (l'ammonium et les acides chlorhydrique, nitrique et sulfurique). Les grosses particules (entre 2,5 µm et 10 µm) sont composées en grande partie de matériaux d'origine naturelle (sable, sel de mer).

A l'exception des nanoparticules, toutes les fractions contiennent des débris bactériens toxiques.

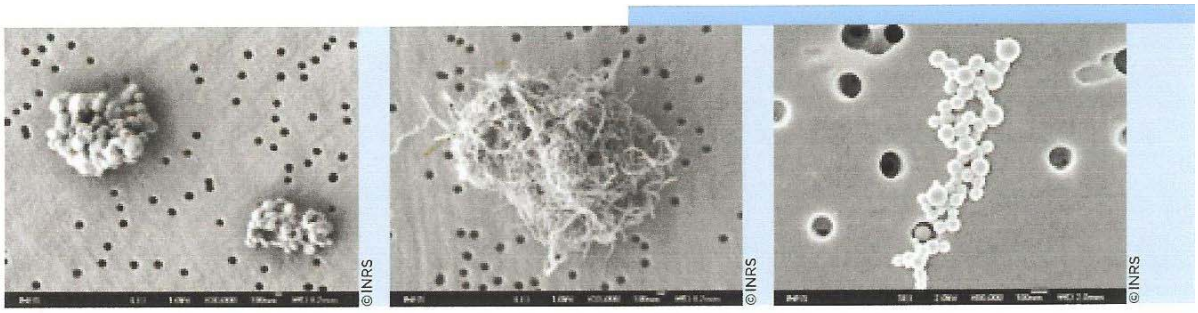
Les variations saisonnières de la composition chimique des particules s'expliquent par l'importance de la combustion en hiver et des réactions chimiques induites par le soleil en été.

([31] p. 238, pp. 241-243, p. 246, [58] p. 4, [38] pp. 66-68, [74] pp. 5-7)

La propagation des particules dépend de leur taille

Comment définir la taille d'une particule ?

La forme des particules est très variable. Certaines sont à peu près sphériques alors que d'autres forment des agrégats très irréguliers. C'est pourquoi on définit généralement la taille d'une particule par le diamètre d'une particule sphérique qui aurait les mêmes propriétés physiques. Ce n'est qu'une approximation dont le résultat dépend de la propriété physique retenue.



▲ Nanoparticules de dioxyde de titane observées en microscopie électronique à balayage

▲ Nanotubes de carbone multifeuillets observés en microscopie électronique à balayage

▲ Fumées de soudage observées en microscopie électronique à balayage

Il n'existe pas une limite de taille claire entre les molécules et les particules les plus petites composées de quelques dizaines de molécules. La différence tient plutôt à leurs propriétés physiques. Par exemple, les particules ont généralement tendance à se fixer lorsqu'elles heurtent une surface solide alors que les molécules ont tendance à rebondir.

([37] pp. 49-50, pp. 106-118, [49] p. 5)

La taille des particules influe-t-elle sur leur réactivité chimique ?

La réactivité chimique est due aux atomes qui sont à la surface de la particule. Elle est plus forte pour les nanoparticules car le pourcentage d'atomes présents à la surface des particules augmente lorsque la taille des particules diminue. Ainsi, la proportion de molécules à la surface d'une particule sphérique passe de moins de 1 % à près de 50 % lorsque le diamètre décroît de 500 nm à 5 nm.

Par exemple l'or, matériau réputé pour sa stabilité, devient réactif lorsqu'il est sous forme de nanoparticules. Un autre exemple de cette augmentation de la réactivité chimique est l'explosion de silos de farine ou de sucre lorsque la poussière forme un aérosol de particules de quelques dizaines de micromètres.

([22] pp. 22-23], [29] p. 8, p. 12, [37] 517-522, [49] p. 14)

Les particules changent-elles de taille au cours du temps ?

Les particules présentes dans l'air ont tendance à s'agréger lorsqu'elles se touchent. Les contacts se font au hasard avec une probabilité proportionnelle au nombre de particules. Les particules ne se touchent pratiquement jamais lorsqu'il y a moins de 10 000 particules par centimètre cube.

Les agrégats constitués de particules de quelques micromètres seront rares car il y a peu de grosses particules dans l'air.

La plupart des nanoparticules de 10 nm et plus se retrouvent rapidement piégées dans des agrégats. Les agrégats ressemblent généralement à des grappes de nanoparticules. Ils ont une taille voisine de 0,5 µm (généralement entre 0,1 µm et 0,8 µm). L'effet de l'agglomération des particules sur la surface en contact avec le milieu ambiant dépend de la forme de l'agrégat final. La surface diminue fortement si l'agrégat est sphérique alors qu'elle change peu si l'agrégat a une forme très irrégulière.

Les particules plus petites qu'un nanomètre se comportent comme des molécules à l'état gazeux. Elles ont tendance à rebondir au lieu de coller lorsqu'elles entrent en contact avec une surface solide.

([22] pp. 24-25, [37] pp. 60-64, pp. 146-148, p. 202)

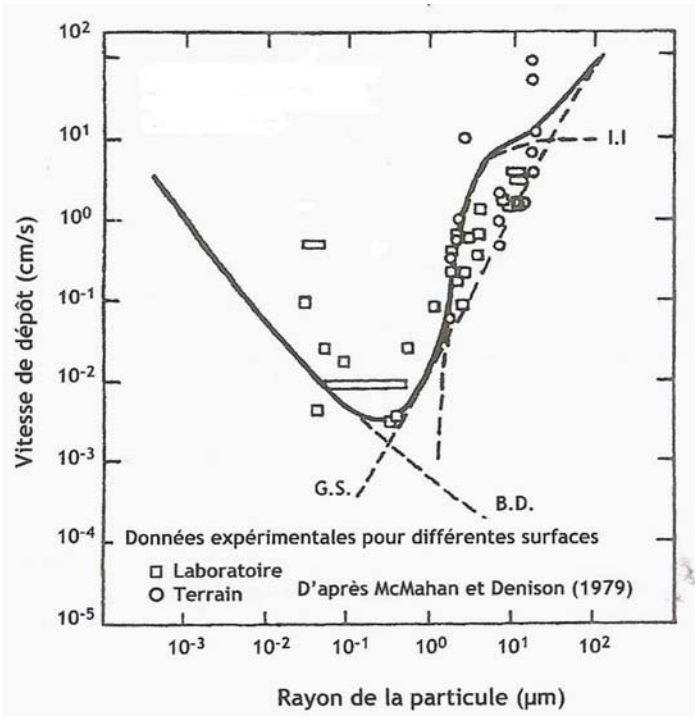
Les particules restent combien de temps en suspension dans l'air ?

Près du sol et dans les couches basses de l'atmosphère, les particules qui font entre 0,1 et 1 µm restent de quelques jours à quelques dizaines de jours dans l'air avant de se déposer.

Les particules sont entraînées par les mouvements de l'air dus aux différences de température (ex : turbulences, convection, courants d'air) ou à un brassage mécanique (ex : ventilation, déplacement des personnes). L'agitation thermique disperse les nanoparticules de façon homogène dans l'espace et les particules adhèrent aux parois lorsqu'elles les touchent.

Pour les particules qui font plus de 1 µm, l'agitation thermique est contrebalancée par l'inertie qui favorise le dépôt sur place des particules.

Les particules d'environ 0,3 µm restent longtemps en suspension car elles sont trop petites pour être sensibles à l'inertie et trop grosses pour être entraînées par l'agitation thermique.



Données expérimentales et modèles de vitesses de dépôt induites par l'agitation thermique (diffusion brownienne – B.D.), la pesanteur (sédimentation – G.S.) et l'inertie des particules (les grosses particules en tendance à aller tout droit – I.I.) ([37] p. 150).

Le dépôt est plus rapide lorsque les surfaces sont plus froides que l'air ambiant.

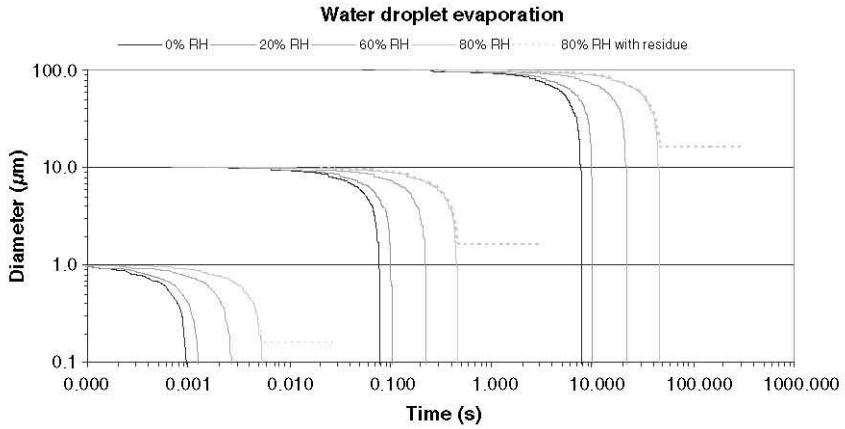
([22] pp. 23-27, [37] pp. 149-151)

Que deviennent les gouttelettes d'eau présentes dans l'air ?

Les gouttelettes d'eau disparaissent rapidement sous l'effet de l'évaporation. Leur durée de vie dépend de leur taille et, dans une moindre mesure, de l'humidité relative. La durée de vie est de quelques millièmes de seconde pour une gouttelette de 1 µm, de quelques dixièmes de seconde pour une gouttelette de 10 µm et autour d'une minute pour une gouttelette de 100 µm.

Une gouttelette de 100 µm tombe d'un mètre en trois secondes et une gouttelette de 10 µm d'un mètre en 300 secondes, ce qui revient à dire que les petites gouttelettes se sont généralement desséchées avant d'atteindre le sol.

Après évaporation, les matières non-volatiles contenues dans la gouttelette forment une particule qui reste en suspension dans l'air (sels, microbes).

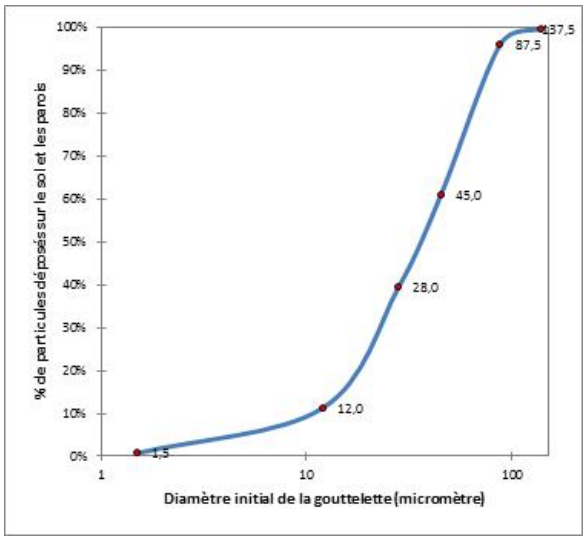


Changement de diamètre de gouttelettes d'eau pure au cours du temps sous l'effet de l'évaporation. La ligne en pointillés correspond au diamètre final de la particule lorsque la gouttelette est constituée d'une solution à 0,86 % de NaCl ([28] p. 341).

([28] pp. 339-341)

Que devient l'aérosol produit par un éternuement ou une toux ?

On émet de 10 000 à 100 000 gouttelettes lors d'une toux ou d'un éternuement ; 87 % d'entre elles font moins de 1 µm et moins de 0,1 % font plus de 5 µm. Elles se dessèchent en une fraction de seconde et les débris cellulaires, les microbes ou les virus qu'elles portaient forment une particule qui fait moins du quart du diamètre initial de la gouttelette. A partir de ce moment, les particules sont entraînées par les mouvements de l'air et elles peuvent rester une dizaine de jours en suspension.



Dépôt des particules sur les parois et le sol en fonction de leur taille initiale (adapté de [51] p. 389)

La toux contient aussi des gouttelettes plus grosses (50 à 100 µm) qui ont tendance à se déposer sur les parois ou le sol. La figure ci-dessus montre la relation entre le diamètre initial de la particule et le pourcentage de particules qui se déposent.

([28] pp. 339-341, [51] pp. 388-393, [68] pp. S757-758, [70] p. S785, [81])

Quelle est la survie des agents pathogènes dans les bioaérosols ?

A une température normale, la survie des agents pathogènes dans les bioaérosols dépend de l'humidité de l'air. Le critère important est l'humidité absolue (la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère) et pas l'humidité relative (la quantité actuelle de vapeur d'eau par rapport à la quantité maximale possible à cette température). L'humidité absolue maximale décroît très vite lorsque la température diminue.

Les virus comportant une enveloppe lipidique résistent plus longtemps lorsque l'air est sec. C'est le cas par exemple du virus de la grippe, du virus responsable du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS), du virus de la rougeole. Les virus sans enveloppe lipidique résistent mieux lorsque l'air est humide. C'est le cas par exemple du virus de la poliomyélite, des virus responsables des laryngites (para-influenza) ou des rhumes de cerveau (rhinovirus).

Les effets de l'humidité sont plus complexes dans le cas des bactéries. Ils dépendent notamment de l'état physiologique des bactéries au moment où se forme l'aérosol. De plus, les résultats des expériences varient selon la façon de mesurer la survie des bactéries (certaines bactéries restent infectieuses alors qu'on ne peut plus les cultiver dans les conditions habituelles).

([24] pp. 26-29, [63], [64] p. S699, [66] pp. S738-S742, [70] p. S788)

La ventilation : une solution pour améliorer la qualité de l'air dans les locaux

Quel profit tirer de l'expérience de l'industrie nucléaire dans la maîtrise de la contamination ?

La majorité des recherches sur les aérosols ont été faites pour l'industrie nucléaire et pour la protection des travailleurs. La France est très active dans ce domaine.

Un ensemble de normes et de bonnes pratiques visent à maintenir un excellent niveau de propreté dans les installations nucléaires. Ce corpus est, dans ses grandes lignes, applicable à l'amélioration de la qualité de l'air dans n'importe quel environnement. On peut en dégager quelques règles.

La première chose est de déterminer sous quelle forme se présentent les matières dangereuses, identifier les personnes à protéger et prévoir les situations normales ou accidentelles qui seraient susceptibles de disséminer des matières dangereuses. Il faut ensuite une bonne connaissance des phénomènes physiques mis en œuvre lors de la dispersion et de l'épuration.

Un autre acquis de l'expérience de l'industrie nucléaire est l'importance de la maîtrise des mouvements de l'air. Elle permet un confinement dynamique qui complète le confinement physique dû aux cloisons étanches et aux filtres. Les mouvements de l'air sont contrôlés par des différences de pression d'une pièce à l'autre. Pour que le système fonctionne correctement, il faut que les parois soient étanches et qu'on passe d'une pièce à l'autre par des sas.

Le confinement gêne le déplacement des personnes. Cette contrainte est acceptée lorsque la pollution de l'air peut provoquer des incidents ayant un fort impact économique (ex : industrie électronique, pharmacie, agroalimentaire). En revanche, en l'absence de risque tangible, les portes restent constamment ouvertes et l'air pollué circule partout (ex : les odeurs de cuisine envahissent tout l'appartement). C'est le cas dans les hôpitaux.

([21], [26], [69] p. S780, [71] pp. 104-107, [73] p. 93, p. 209, [77])

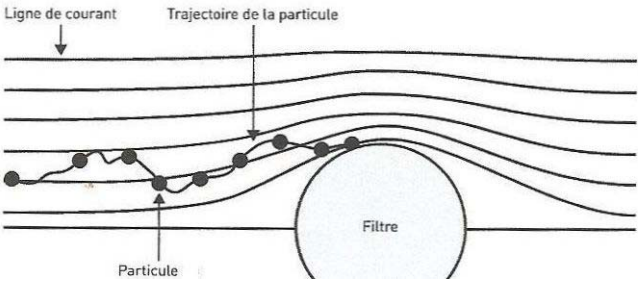
Peut-on éliminer les particules en filtrant l'air ?

Oui. On peut éliminer les particules, même les plus petites, en filtrant l'air.

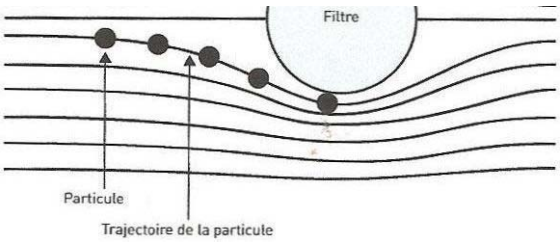
Un filtre à air ne fonctionne pas comme un tamis qui bloquerait le passage des particules plus grosses que les trous. Il arrête les particules parce qu'elles restent collées sur les fibres du filtre lorsqu'elles les touchent. Le parcours de l'air pollué à travers le filtre est suffisamment tortueux pour qu'il y ait de grandes chances pour qu'une particule finisse par toucher une fibre.

A quantité de matière constante, l'efficacité de la filtration augmente lorsque le diamètre des fibres diminue car la surface de contact entre l'air et les fibres, et donc la probabilité de capture, augmente.

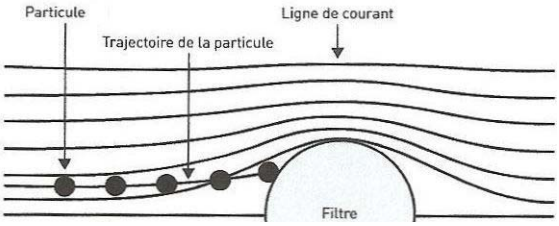
Capture d'une particule dont la trajectoire est erratique (mouvement brownien)



Capture d'une particule dont la trajectoire suit les lignes de courant d'air



Capture d'une particule dont la trajectoire est à peu près linéaire à cause de l'inertie



Une particule est stoppée lorsqu'elle touche une fibre du filtre. On distingue trois types de trajectoire : (1) la particule a un parcours erratique et touche une fibre par hasard (mécanisme de diffusion) ; (2) la trajectoire suit les lignes de courant d'air et les particules sont interceptées lorsqu'elles frôlent une fibre (mécanisme d'interception) ; (3) l'inertie fait que la particule se déplace en ligne droite et percute la fibre ([78]).

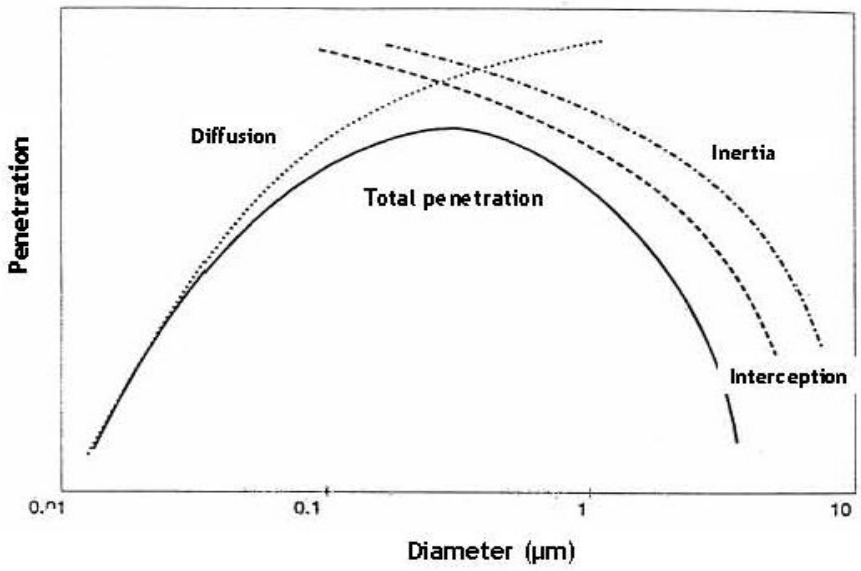
Les molécules passent au travers des filtres car elles ont tendance à rebondir lorsqu'elles touchent les fibres. Elles peuvent cependant finir par rester collées si les chocs sont très nombreux. Comme le nombre de chocs augmente avec la surface de contact entre l'air et le matériau constituant le filtre, il faut que les filtres aient une très grande surface spécifique. C'est le cas des filtres à charbon actif. Ils ont surface spécifique de 600 à 2 000 mètres carrés par gramme alors qu'un filtre à fibres a une surface spécifique inférieure au mètre carré par gramme.

Le charbon actif provient de matières végétales (ex : noix de coco) ayant subi un traitement thermique qui leur confère une très grande porosité et une surface spécifique importante.

([37] pp. 74-75, [71] pp. 92-101, [78])

La filtration de l'air est-elle efficace ?

Oui. Les particules de 0,1 µm à 0,6 µm sont les plus difficiles à stopper et l'efficacité de la filtration diminue lorsque la vitesse de l'air au travers du filtre augmente.



Probabilité pour qu'une particule passe à travers un filtre sans être retenue en fonction de la taille de la particule ([78]).

Les filtres sont classés en fonction de leur efficacité. Il existe quatre types de filtres : (1) les filtres grossiers (particules de taille supérieure à 1 µm) ; (2) les filtres fins (efficacité supérieure à 40 % pour les particules de 0,4 µm) ; (3) les filtres à haute efficacité (efficacité supérieure à 85 % pour la particule la plus difficile à stopper) ; (4) les filtres à très haute efficacité (efficacité supérieure à 99,9995 % pour la particule la plus difficile à stopper).

Il existe différentes classes d'efficacité au sein de chaque type. Par exemple un filtre fin F5 stoppe 40 % des particules de 0,4 µm et un filtre F9 en stoppe 95 %.

Les filtres doivent être changés régulièrement car leur efficacité diminue lorsqu'ils se bouchent.

([71] pp. 92-101, [78])

Peut-on purifier l'air efficacement avant de le faire pénétrer dans les bâtiments ?

On peut purifier l'air avant de le faire pénétrer dans les bâtiments. La complexité de l'installation dépend du niveau de pollution de l'air extérieur et de la qualité escomptée pour l'air intérieur.

Pour un air intérieur de qualité modérée (ex : bureaux, hôpitaux), le système comporte au minimum un filtre retenant 80 % des particules de 0,4 µm. Lorsque l'air extérieur est fortement empoussiéré, on utilise deux filtres en cascade, le premier retenant 60 % des particules de 0,4 µm et le second 80 %. Les filtres doivent être changés

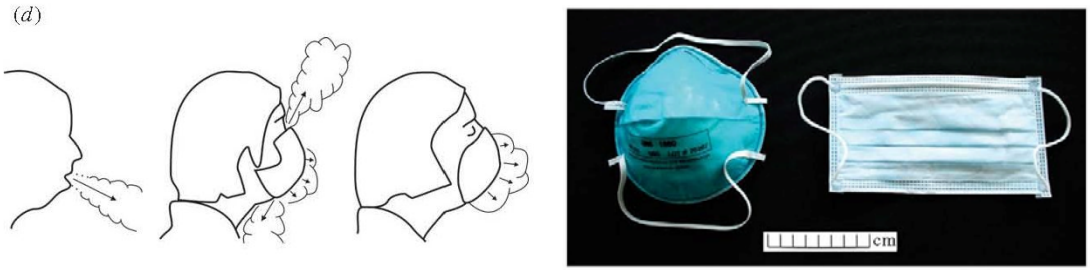
périodiquement pour que la purification de l'air reste efficace (tous les ans pour le premier filtre et tous les deux ans pour le second). On peut aussi changer les filtres lorsque le débit de l'air a baissé de 10 à 20 %.

Lorsque l'air doit être très propre (ex : salle d'opération, préparation des aliments dans l'industrie agroalimentaire), on utilise trois filtres en cascade, le premier retenant 80 % des particules de 0,4 µm et le second 95 %, le troisième retient 99,95 % des particules les plus difficiles à filtrer (celles qui font entre 0,1 et 0,2 µm).

([13] p. 13, [71] p. 95, pp. 98-103)

Les masques protègent-ils efficacement contre l'inhalation de particules ?

Il faut distinguer les masques utilisés par les travailleurs soumis à un environnement dangereux et les masques portés par le personnel de santé. Les premiers sont conçus pour que le travailleur n'inhale pas le produit dangereux alors que les seconds évitent que le personnel soignant contamine le malade.



Personne toussant avec un masque. Image de gauche : direction des émissions en absence de masque (gauche), avec un masque chirurgical (milieu), avec un masque N95 (droite) ([65] p. S732). Image de droite : masque standard (N95) et masque chirurgical ([65] p. S730).

Un masque chirurgical dévie les particules émises par une personne qui tousse alors qu'un masque N95 en retient une grande partie. En revanche, dans les deux cas, les particules pénètrent par l'interstice entre le masque et la peau lorsque les personnes respirent. Même correctement posés, la plupart des masques N95 laissent passer plus de 10 % des particules présentes dans l'air lorsqu'elles font entre 0,08 µm et 0,2 µm (c'est la taille des virus).

([65] p. S730, p. S732, [75] pp. 181-184, [79])

Quels sont les effets de la climatisation ou de la ventilation sur la pollution dans les bâtiments ?

En l'absence de ventilation, la pollution augmente au cours du temps à l'intérieur des locaux au point que l'air y est généralement plus pollué qu'à l'extérieur. La ventilation permet de diluer les polluants et de les ramener à leur concentration dans l'air extérieur (l'air est renouvelé par apport d'air neuf venant de l'extérieur).

Le renouvellement de l'air dans les locaux est une obligation. La réglementation fixe les débits minimaux d'air neuf par occupant en fonction du type de local et de l'activité des occupants. Par exemple, on considère que dans un environnement hospitalier, il faut renouveler l'air des pièces au moins douze fois par heure pour limiter la contagion. Alors qu'on recommande trois fois par heure pour les salles de classe car le but est seulement de maintenir la concentration de gaz carbonique à un niveau acceptable.

Le taux de renouvellement réel est le plus souvent très inférieur à la valeur réglementaire.

Renouveler l'air consomme de l'énergie car l'air neuf doit atteindre la même température et à la même humidité que l'air intérieur. On distingue deux types de systèmes pour limiter la consommation d'énergie : (1) un échange thermique entre l'air neuf et l'air rejeté sans mélange des deux flux d'air (c'est la ventilation à double flux) ; (2) un mélange de l'air neuf et de l'air intérieur dans une centrale de traitement de l'air. L'économie d'énergie est importante : une ventilation double flux ne récupérant la chaleur qu'en hiver est amortie en deux ans en Ile-de-France.

([11] p. 12, p. 16, [13] pp. 7-11, [16] pp. 14-16, [32] p. 48, [34] pp. 311-313, [35] pp. 958-959, [64] p. S697, [71] pp. 125-129, [87])

Comment lutter contre la propagation des maladies contagieuses ?

Pour prévenir les risques de contagion, il faut diluer dans l'air les particules infectieuses émises par les personnes contaminées. Ce résultat peut être obtenu en renouvelant l'air très souvent et en plaçant les personnes dans des pièces spacieuses et hautes de plafond (le facteur de dilution est proportionnel au volume d'air). On peut en complément stériliser avec des lampes UV l'air lorsqu'il circule près du plafond.

Pour prévenir les risques de contagion, il faut renouveler l'air au moins deux fois par heure dans les pièces ne présentant pas de risques particuliers. On observe d'ailleurs quatre fois plus de personnels soignants contaminés par la tuberculose dans les hôpitaux où l'air est renouvelé moins de deux fois par heure que dans les hôpitaux mieux aérés.

En plein air, le vent peut transporter des particules infectieuses sur plusieurs kilomètres sans qu'elles se dispersent. Leur concentration est alors suffisante pour qu'elles déclenchent des maladies (ex : légionelles dans le Pas-de-Calais, grippe du cheval en Australie).

([9] p. 787, [18] pp. 181-184, [34] pp. 313-314, [70] p. S783, pp. S786-787)

La climatisation favorise-t-elle la propagation des maladies contagieuses ?

On imagine souvent que les systèmes de climatisation utilisant de l'air recyclé sont susceptibles de favoriser la propagation des maladies contagieuses car elles transportent d'une pièce à l'autre de l'air contaminé.

Il est difficile de démontrer qu'un tel risque existe car il faudrait que plusieurs personnes desservies par la même climatisation soient infectées simultanément et qu'on puisse exclure qu'elles aient été contaminées autrement (par exemple dans l'ascenseur ou à la cantine).

Il est cependant peu probable que la climatisation propage des particules infectieuses. Si c'était le cas, elle propagerait aussi les autres particules de même taille comme par exemple la fumée de cigarette. En d'autres termes, l'odeur de cigarette envahirait toutes les pièces desservie par la même climatisation.

([47] pp. 257-260, [64] p. S700, [67] p. S747, p. S754, [70] p. S784)

Ouvrir les fenêtres est-elle une solution efficace contre la pollution de l'air intérieur ?

Oui. Il faut trois minutes pour que l'air se renouvelle lorsqu'on fait des courants d'air, environ vingt minutes en l'absence de courants d'air et de deux à dix heures lorsque les portes et les fenêtres sont fermées (il y a toujours des fuites). N.B. ces chiffres sont des ordres de grandeurs, ils varient en fonction du bâtiment et de la vitesse du vent à l'extérieur.

La ventilation mécanique a généralement une efficacité deux à trois fois plus faible que l'aération sans courants d'air.

L'efficacité d'une aération naturelle est souvent sous-estimée. Pourtant, une personne tuberculeuse risque quatre fois plus de contaminer une autre personne dans une petite chambre d'hôpital dotée d'une ventilation mécanique fonctionnant correctement que dans une grande salle où la circulation de l'air est due aux courants d'air.

([34] pp. 311-314, [64] p. S700)

Peut-on concilier renouvellement de l'air et économies de chauffage ?

La meilleure façon de concilier renouvellement de l'air et économie de chauffage est d'installer un dispositif où l'air sortant cède sa chaleur à l'air entrant. C'est la ventilation mécanique à double flux. Elle permet une économie de chauffage d'environ 30 % par rapport à la ventilation mécanique simple flux, où l'air extrait ne réchauffe pas l'air entrant. Ce résultat n'est obtenu qu'avec une très bonne étanchéité des parois pour que l'air ne pénètre que par le système de ventilation.

Les systèmes régulant la quantité d'air extrait en fonction du taux de pollution (en pratique, le taux d'humidité) permettent une économie d'environ 20 %. En général, ils n'assurent pas un renouvellement suffisant de l'air.

La ventilation naturelle (des conduits d'évacuation sans ventilateur) consomme entre 15 et 20 % d'énergie en plus que la ventilation mécanique simple flux.

([13] pp. 6-7, [73] p. 42, pp. 46-47, pp. 209-211)

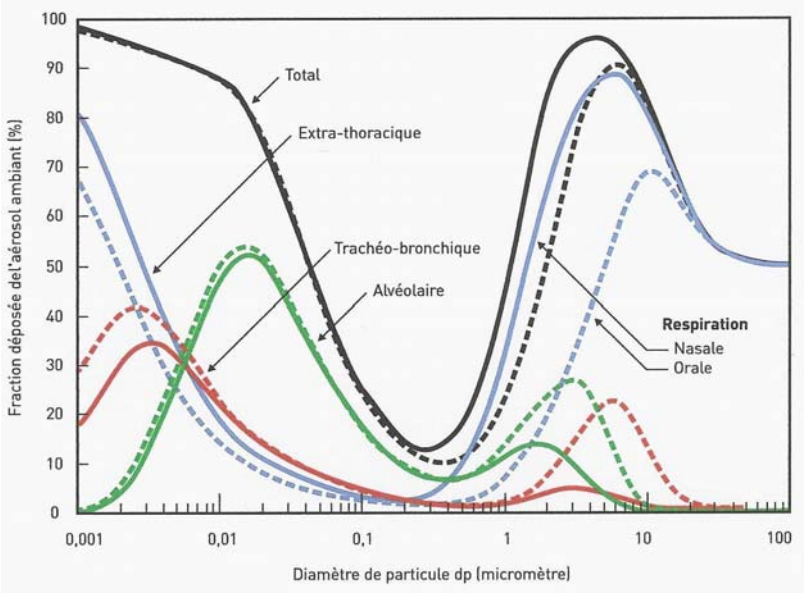
Le passage des particules dans le corps

Lorsqu'on respire que deviennent les particules présentes dans l'air ?

La plupart des particules qui font plus de 1 µm ou moins de 0,05 µm se déposent dans les voies respiratoires. En revanche, les particules qui font entre 0,1 µm et 0,6 µm ont une faible probabilité de se déposer.

Les particules de plus de 1 µm (ex : les bactéries) se déposent principalement dans la région extra-thoracique (nez, bouche, larynx). C'est aussi le cas des particules d'environ 1 nm.

Les nanoparticules de 10 à 100 nm (ex : les virus) pénètrent jusqu'aux alvéoles, là où se font les échanges gazeux avec le sang.



Pourcentage des particules déposées par rapport à celles qui sont inhalées chez un homme respirant majoritairement par le nez (ligne continue) ou par la bouche (pointillés) ([22] p. 28). La région extra-thoracique va du nez et de la bouche jusqu'au larynx. La région trachéo-bronchique va de la trachée jusqu'aux bronchioles terminales. La région alvéolaire est l'endroit où se font les échanges gazeux. Total : pourcentage total des particules déposées dans les voies respiratoires.

Cette figure correspond à la situation moyenne chez des personnes en bonne santé. Les dépôts sont beaucoup plus importants chez les personnes souffrant d'asthme ou de bronchite chronique.

([22] pp. 23-24, pp. 27-29, [37] pp. 74-77, p. 192, p. 197, p. 201, p. 203, p. 206)

Comment les particules sont-elles éliminées après s'être déposées dans les poumons ?

On connaît mal les mécanismes d'élimination des particules qui se déposent dans les poumons. En première approximation, on considère que :

- les particules solubles sont dissoutes et absorbées.
- les particules insolubles qui se sont déposées dans la région trachéo-bronchique sont mises en mouvement par les cils des cellules qui tapissent la surface des bronches et repoussées dans le tube

digestif (99 % des particules sont éliminées au bout de 48 heures). Une couche de mucus facilite le transport jusqu'au tube digestif.

- les particules insolubles qui se sont déposées dans les alvéoles sont phagocytées puis éliminées. Les nanoparticules fibreuses qui sont trop longues pour être phagocytées forment des points d'inflammation chronique (ex : amiante, grands nanotubes de carbone).

([22] p. 30, [37] pp. 89-91, pp. 217-225, [62] p. 141)

Qu'arrive-t-il lorsqu'on inhale des microbes ?

En fonction de leur taille, les microbes pénètrent plus ou moins profondément dans les voies respiratoires : les bactéries dépassent rarement le pharynx alors que les virus atteignent les bronches. Ils sont généralement éliminés comme n'importe quelle particule de même taille.

Pour que les virus (ex : grippe, rhume, laryngite) déclenchent une infection, il faut qu'ils pénètrent dans les cellules qui tapissent les voies respiratoires et qu'ils s'y multiplient beaucoup. La pénétration dans les cellules est basée sur une complémentarité des molécules qui sont à la surface du virus et celles qui sont à la surface de la cellule. Une fois que le virus a pénétré dans la cellule, sa multiplication dépend à son tour d'une complémentarité entre molécules virales et molécules de la cellule. Lorsque les deux étapes sont efficaces, les cellules produisent une très grande quantité de virus qui vont propager l'infection après avoir été relâchés dans les voies respiratoires.

Certaines des bactéries qui infectent les voies respiratoires suivent à peu près le même scénario (ex : agent de la légionellose). D'autres par contre prolifèrent sur l'abondante couche de mucus et de cellules mortes provoquée par une infection virale (ex : surinfection après une grippe).

([24] pp. 23-24, [64] p. S699, [70] p. S786)

Les particules peuvent-elles passer des voies respiratoires au reste du corps ?

Oui. Certaines nanoparticules qui se déposent sur la muqueuse nasale peuvent passer dans le nerf olfactif et de là au cerveau. C'est le cas par exemple du virus de la poliomyélite et des particules métalliques d'une dizaine de nanomètres.

Les nanoparticules peuvent aussi passer dans le sang au niveau des alvéoles pulmonaires. Dans certains cas, ce sont les composés chimiques présents dans la particule qui pénètrent après avoir été dissous et pas la particule elle-même.

Certains microbes pénètrent par les voies respiratoires et passent ensuite dans le reste du corps (ex : virus de la rougeole). Lorsque plusieurs voies d'infection sont possibles, la voie respiratoire est celle qui nécessite le moins de particules infectieuses pour déclencher la maladie.

([22] p. 30, [37] pp. 221-225, [44] p. 5)

Les particules peuvent-elles passer des voies digestives au reste du corps ?

La question a été très peu étudiée. En général, on ne sait pas si les particules passent directement dans le sang ou si les composés présents dans les particules passent dans le sang après avoir été dissous. Toutefois, des expériences suggèrent que certaines particules peuvent passer dans le sang au cours de leur transit dans le tube digestif.

D'un point de vue pratique, il reste que la pollution se disperse dans l'air en fonction de la taille des particules et que les produits nocifs présents dans les particules peuvent passer dans le sang s'ils sont solubles.

([37] pp. 222-223)

Les particules traversent-elles la peau ?

Les particules faisant plus d'un micromètre restent à la surface de la peau. Il semble en revanche que certaines nanoparticules pénètrent sous la peau, leur passage étant facilité par les flexions cutanées.

Toutefois, la réponse est un peu théorique car les expériences sont réalisées sur une peau saine et en bon état. N'importe quelle particule peut pénétrer sous la peau lorsque celle-ci est abîmée. C'est d'ailleurs ainsi que se déclenchent les infections cutanées (une bactérie est une particule d'environ un micromètre).

([25] pp. 44-45, [37] pp. 247-249)

Les effets de la pollution de l'air sur la santé

Danger ou risque, de quoi parle-t-on ?

Le risque est une notion qui tient compte de la nocivité du produit (son danger) et de la probabilité d'être exposé. Danger et risque ne sont pas synonymes : le lion est un animal dangereux alors qu'il présente un risque quasi-nul dans un zoo.

La toxicologie détermine le danger que présente une substance. Elle repose sur des expériences en laboratoire.

Il est beaucoup plus difficile d'évaluer l'exposition à une substance dangereuse. Dans la mesure du possible, l'évaluation est réalisée dans trois cas : (1) les personnes directement exposées à la source de pollution (ce sont généralement des personnes travaillant au contact de la substance nocive) ; (2) les personnes qui sont à proximité mais qui ne sont pas directement exposées ; (3) les personnes soumises à la concentration habituelle (qualifiée parfois de « normale ») de polluant. On connaît mieux l'exposition sur le lieu de travail que l'exposition « normale ».

Pour les effets à long terme, le critère pertinent est l'accumulation de polluants dans le corps. Cette accumulation dépend de la concentration moyenne du polluant et du temps pendant lequel les personnes sont exposées.

([59], [62] pp. 145-146, [77])

Quelle est l'influence de l'humidité sur la qualité de l'air dans les locaux ?

Une température de 18 à 22° C et une humidité relative de 40 à 70 % assurent de bonnes conditions de confort. Les conditions optimales pour la conservation des objets (musées, bibliothèques) sont 18° C et 55 % d'humidité relative (16° C et 40 % d'humidité relative pour les photographies et les microfilms).

Au-delà de 70 % d'humidité relative, on assiste à une prolifération rapide des moisissures et des acariens. Les moisissures produisent des polluants qui se retrouvent en suspension dans l'air (spores, fragments de mycélium, composés organiques volatils).

Un air trop sec (de 20 à 30 % d'humidité relative) provoque une irritation de la peau et des muqueuses (ex : picotement des yeux, rhinites, sinusites, toux irritative). L'air intérieur est souvent trop sec en hiver car l'air extérieur contient très peu de vapeur d'eau. Par exemple, un air extérieur à 3° C et 70 % d'humidité relative contient quatre grammes d'eau par mètre-cube. Lorsque cet air pénètre dans des locaux, sa température s'élève à 23° C mais il ne contient toujours que quatre grammes d'eau par mètre-cube. L'humidité relative est alors de 20 %. Pour atteindre 50 %, il faut vaporiser en plus six grammes d'eau par mètre-cube et par heure (une personne évapore 30 grammes d'eau par heure en hiver et 60 grammes en été).

Sauf cas particuliers, les systèmes de climatisation ne contrôlent pas l'humidité de l'air.

N.B. on parle plus souvent d'humidité relative que d'humidité absolue bien que cette dernière ait plus de sens d'un point de vue biologique ou physique. La différence importe peu ici car la température est à peu près constante. Par contre, l'humidité absolue maximale décroît très vite lorsque la température diminue.

([3], [4] pp. 22-23, [11] p. 12, [24] pp. 3-4, [32] pp. 37-38, pp. 47-48, [66] pp. S737-S738, p. S743, [71] pp. 9-11, pp. 34-35, p. 217, p. 219, [87])

Comment détermine-t-on la nocivité des polluants présents dans l'air ?

On détermine la nocivité des polluants par des expériences en laboratoire et en suivant l'état de santé de la population. Les deux approches ne donnent pas nécessairement le même résultat.

La nocivité est déterminée en laboratoire en utilisant des doses suffisamment importantes pour déclencher un effet visible en un temps court. Dans le cas de la pollution de l'air, la nocivité est estimée en mesurant l'activation des mécanismes moléculaires qui sont à l'origine de l'inflammation des voies respiratoires.

Cependant, les études en laboratoire ne permettent pas de déterminer la gravité de la maladie lorsque celle-ci n'apparaît que longtemps après l'inflammation. Par exemple, il s'écoule de quinze à vingt ans entre le moment où l'amiante provoque une inflammation chronique de la plèvre et l'apparition d'un cancer.

Le suivi de l'état de santé des populations apporte une information complémentaire. Il permet d'explorer les liens possibles entre la pollution de l'air et telle ou telle maladie. En revanche, en procédant de la sorte, il est difficile de mesurer le rôle d'un polluant particulier car il y a dans l'air des centaines de produits potentiellement nocifs.

Les spécialistes privilégient les polluants faciles à mesurer et ayant un lien fort avec la santé de la population, même si ce lien est indirect. C'est le cas par exemple de l'ozone. On observe une augmentation de la mortalité lorsque la concentration d'ozone est élevée. Mais (1) la synthèse d'ozone va de pair avec la production d'autres polluants (ex : oxydes d'azote, nanoparticules) ; (2) elle est concomitante des pics de chaleur et ceux-ci provoquent des problèmes de santé chez les personnes fragiles.

([52] pp. 8-9, [57] pp. 7-8, [59], [44] p. 6, [62] pp. 145-146, [80] pp. 58-59)

Quels sont les effets de la pollution de l'air sur la santé ?

On distingue les effets à long terme et les effets à court terme.

Pour le long terme, toutes les études sont d'accord sur un point : l'état de santé de la population se dégrade lorsque la pollution de l'air augmente. Plus précisément, la concentration de particules en suspension dans l'air est corrélée à la fréquence des maladies chroniques dans la population (ex : cancer du poumon, maladies cardiovasculaires, asthme).

Les pics de pollution urbaine sont associés à une augmentation des hospitalisations et des décès chez les personnes fragiles (ex : enfants, personnes âgées, patients atteints d'une maladie cardiaque ou respiratoire). On parle alors d'effet à court terme. Il est difficile de dire si le pic de pollution ne fait que précipiter un évènement qui se serait produit peu de temps après car la réponse dépend du laps de temps considéré.

([35] pp. 959-961, [52] p. 5, p. 8, [57] pp. 3-8, [80] pp. 58-61)

De quoi dépend la nocivité des particules ?

La nocivité des particules dépend de leur taille et de leur composition chimique.

Pour une composition chimique donnée, l'inflammation pulmonaire déclenchée par l'inhalation de particules est fonction de la surface des particules et pas de leur volume. Plus précisément, l'effet nocif est proportionnel à la dose de polluant lorsque celle-ci est mesurée par le rapport entre la surface des particules et la surface des cellules exposées.

La nocivité des particules dépend aussi de leur composition chimique. La fraction carbonée (noir de carbone et composés organiques) est probablement la plus nocive mais les données actuelles ne permettent pas de faire un lien avec des composés spécifiques. Les spécialistes soupçonnent aussi les métaux présents dans les particules, mais il y a trop peu d'études pour conclure. Les spécialistes ne savent pas si les polluants acides (nitrates, sulfates) ont un effet direct ou indirect, *via* par exemple la solubilisation de métaux.

Les observations ci-dessus valent pour les particules émises par le trafic routier et le chauffage. On ne sait pas si les particules produites lorsqu'on fait la cuisine ont un effet nocif sur la santé.

Par ailleurs, le système qui élimine les particules dans les poumons devient inefficace si la concentration de particules est excessive (il est surchargé). On constate alors que des particules habituellement sans effet sur la santé déclenchent une inflammation pulmonaire chronique.

([15], [22] pp. 31-32, [25] pp. 46-47, [37] pp. 218-219, pp. 598-602, [53] pp. 7-8, [74], [76], [80] p. 61)

Est-ce que les nanoparticules utilisées dans l'industrie présentent un danger ?

D'une façon générale, les nanoparticules utilisées dans l'industrie n'ont pas fait l'objet d'études spécifiques afin de déterminer leur toxicité.

On utilise les résultats des études réalisées avec des particules plus grosses ayant la même composition chimique en considérant que les nanoparticules sont probablement plus dangereuses. Par exemple, la *British Standards Institution* augmente la toxicité du produit de 50 % pour les nanoparticules insolubles et la double pour les nanoparticules solubles. Ceci n'est qu'une première approximation qui doit être modulée en fonction de la forme des nanoparticules et du traitement chimique qu'elles ont subi.

Les nanomatériaux fibreux (ex : grands nanotubes de carbone) présentent probablement le même type de danger que l'amiante.

([46] p. 51, [50] pp. 400-402, p. 408)

Quelles sont les spécificités de la pollution d'origine biologique ?

L'air transmet des maladies non-infectieuses (ex : allergie, asthme) et des maladies infectieuses virales (ex : grippe, gastro-entérites virales) ou bactériennes (ex : tuberculose, légionellose). Les polluants d'origine biologique se caractérisent par une forte nocivité à faible dose (une dizaine de bactéries ou de particules virales peuvent suffire à déclencher une maladie). Une autre spécificité est la diminution de la virulence au cours du temps à une vitesse qui dépend des conditions ambiantes (ex : température, humidité) et de l'organisme considéré.

En revanche, les polluants d'origine biologique se comportent comme n'importe quelles particules de même taille pour ce qui est des paramètres physiques (ex : dispersion dans l'air, temps pendant lequel les particules restent en suspension).

On désigne sous le nom de *bioaérosol* les polluants d'origine biologique en suspension dans l'air (ex : débris organiques, microbes, pollens). La pollution par les bioaérosols est généralement plus forte à l'intérieur des locaux qu'en plein air.

([2] pp. 1.3-1.6, [28] pp. 335-337, p. 340, [35] pp. 961-962, [64] p. S698, [66] pp. S739-S742)

Quelle est l'origine des agents pathogènes présents dans l'air ?

Les problèmes de santé sont dus aux particules infectieuses en suspension dans l'air (virus, bactéries, moisissures) et aux particules organiques qui déclenchent des problèmes respiratoires (ex : débris allergènes).

Les bioaérosols infectieux proviennent principalement des voies respiratoires (respiration, toux, éternuement), des vomissements et de la nébulisation d'eaux contaminées (ex : légionellose due à la climatisation).

Le nombre et la taille des particules émises par les voies respiratoires varient beaucoup d'une personne à l'autre.

Les gastro-entérites virales peuvent se transmettre par les bioaérosols générés lors du vomissement ou lorsqu'on tire la chasse d'eau aux toilettes. En effet, il se produit alors une nébulisation des eaux usées qui provoque la dispersion des bactéries et des virus fécaux dans l'air ambiant.

De nombreux systèmes présents dans la vie de tous les jours sont susceptibles de mettre en suspension des gouttelettes d'eau contaminées (ex : humidificateurs, douches, bains à remous). Il en résulte le plus souvent des problèmes respiratoires non infectieux (ex : fièvre des humidificateurs, allergie, rhume, bronchite chronique, asthme). Le risque de légionellose augmente si le système vaporise de l'eau qui stagne entre 25 et 40° C ou que les tuyaux sont entartrés (ex : climatiseur).

([2] pp. 1.3-1.6, [14] pp. 7-8, p. 23, [28] pp. 337-340, [42] p. 229, [55] pp. 533-534, [64] p. S697, p. S699)

Quels problèmes de santé peuvent apparaître lorsqu'on remue la poussière ?

Remuer la poussière remet en suspension les particules qui s'étaient déposées au cours du temps. L'aérosol peut atteindre alors une concentration élevée de polluants. Le problème se pose surtout pour les bioaérosols car la poussière ralentit l'inactivation des particules d'origine biologique (ex : le virus de la grippe reste infectieux quelques jours dans la poussière). Le problème n'est pas propre aux agents infectieux, il se pose aussi pour les agents allergènes (ex : poils de chat, déchets d'acariens).

A l'extérieur, la poussière remise en suspension par le vent ou par des engins (ex : tondeuse à gazon, soufflage de feuilles mortes, machines agricoles) contient des bactéries et des virus qui peuvent infecter les voies respiratoires des hommes et des animaux (ex : tularémie, fièvres hémorragiques).

A l'intérieur des locaux, la contamination se produit lorsque des agents infectieux qui s'étaient déposés sur le sol et les parois sont remis en suspension en faisant le ménage. Par exemple, il y a dix fois plus de bactéries dans l'air au moment où on passe l'aspirateur (la mesure a été faite dans une pièce très propre – un bloc opératoire).

Les bioaérosols produits par la remise en suspension de la poussière présentent un risque particulier pour les personnes travaillant dans la collecte et le traitement des déchets. Il existe une maladie pulmonaire associée spécifiquement à la production de compost.

([28] p. 339, p. 342, [35] p. 961, [42] p. 235, [64] pp. S697-S698, [69] pp. S775-S776, [85])

La protection des personnes contre la pollution de l'air à l'intérieur des locaux

Surveille-t-on la qualité de l'air chez les particuliers ?

Non. En France, la loi ne prévoit pas le suivi de la qualité de l'air chez les particuliers (maisons individuelles et parties privatives des immeubles). Toutefois, un état de présence ou d'absence d'amiante doit être annexé aux promesses et actes de vente.

Dans la province du Hainaut (Belgique), un médecin peut demander à un service public (le Laboratoire d'études et de prévention des pollutions intérieures – LPI) de réaliser une analyse au domicile d'un patient à des fins d'aide au diagnostic médical. L'intervention est gratuite. En plus de l'analyse proprement dire, le LPI propose des aménagements qui permettront au patient de réduire les pollutions intérieures et d'améliorer sa santé.

([59], [89], [90])

Comment éviter les problèmes de santé dus aux acariens et autres allergènes naturels ?

Les acariens prolifèrent dans les endroits tièdes et humides, dans la poussière et sur les moisissures. Les allergies ne sont pas dues aux acariens eux-mêmes, mais à leur déjection ou aux débris d'acariens morts qui se retrouvent en suspension dans l'air lorsqu'on remue la poussière.

La seule façon de prévenir les risques d'allergies dues aux acariens est de limiter leur prolifération en aérant et en évitant autant que possible de leur laisser des endroits favorables (moquette, tâches de moisi, terreau). Les produits qui tuent les acariens ne résolvent pas le problème car ce sont les débris d'acariens morts qui déclenchent les réactions allergiques.

Les moisissures peuvent provoquer des allergies chez les personnes sensibles et même de graves infections respiratoires chez les personnes immunodéprimées. Les moisissures se développent aux endroits où l'eau se condense sur les murs. Aérer fait baisser l'humidité mais ne résout pas entièrement le problème. Il faut aussi supprimer les remontées d'humidité par les murs et les points de condensation dus aux surfaces froides provoquées par un défaut d'isolation thermique.

([90])

Les systèmes de ventilation fonctionnent-ils correctement ?

Rarement. Peu de contrôles ou vérifications sont aujourd'hui effectués sur les installations de ventilation, et le peu qui est réalisé révèle d'importants défauts (conception, réalisation, maintenance). Les débits d'air sont presque systématiquement insuffisants.

Il ne faut pas perdre de vue qu'un système de ventilation est calculé dans l'hypothèse où les parois sont étanches et que le déplacement de l'air d'une pièce à l'autre ne se fait que par le vide qui est en bas des portes.

Il faut aussi que le système de ventilation soit entretenu régulièrement. Pour les particuliers, il est préconisé de nettoyer les bouches d'extraction des pièces de service une fois par trimestre et les filtres une fois par an. En plus, un spécialiste doit assurer un entretien complet tous les trois ans et mesurer le débit d'air neuf.

([48], [73] p. 93, p. 209, [97])

Quelles sont les maladies dues à la qualité de l'air des bureaux ?

L'air des bureaux propage des maladies infectieuses (ex : rhume, grippe, tuberculose), des maladies dues à la contamination des humidificateurs par des micro-organismes (ex : légionellose, pneumonie d'hypersensibilité, fièvre des humidificateurs), des allergies dues à la poussière et des irritations dues à la fibre de verre des faux-plafond ou à la fumée de cigarette.

En dehors de ces maladies bien identifiées, la mauvaise qualité de l'air dans les bureaux provoque le syndrome des bâtiments malsains. Il est caractérisé par la fatigue, des nausées, une difficulté à se concentrer et une irritation des voies respiratoires. Le syndrome du bâtiment malsain est dû à un renouvellement insuffisant de l'air et à une humidité relative trop faible. Il touche 30 % des bâtiments récents.

([32] pp. 38-39, p. 48)

La qualité de l'air est-elle surveillée dans les établissements recevant du public ?

La réglementation générale sur les établissements recevant du public porte presqu'exclusivement sur la prévention des risques d'incendie et de panique. La qualité de l'air n'est encadrée que dans le cas de l'amiante.

La loi impose de rechercher la présence d'amiante dans les flocages, calorifugeages et faux plafonds. Les propriétaires sont tenus de désamianter ou de confiner les matériaux contenant de l'amiante lorsqu'il y a plus de cinq fibres d'amiante par litre d'air.

N.B. les établissements recevant du public sont des bâtiments ou enceintes accueillant des personnes en plus des employés (ex : supermarchés, hôtels, écoles, salles de spectacles, stades).

([59], [89], [91], [92])

Comment prévenir une contamination accidentelle ou intentionnelle de l'air dans les bâtiments ?

Une contamination de l'air peut survenir accidentellement suite à un accident industriel ou routier. Le bâtiment se trouve environné d'air fortement pollué pendant un temps court et le contaminant diffuse dans le bâtiment par toutes les ouvertures, les prises d'air et les défauts d'étanchéité. L'air intérieur peut aussi être contaminé intentionnellement en introduisant un produit toxique dans le réseau de distribution de l'air depuis l'extérieur (ex : prise d'air) ou l'intérieur (ex : air recyclé).

Il est important de pouvoir bloquer instantanément la circulation de l'air d'une pièce à l'autre dans le bâtiment. Malgré tout, il est difficile d'agir efficacement une fois que le produit toxique a pénétré car il est diffusé par le système de ventilation en quelques minutes, même dans le cas où le renouvellement complet de l'air demande plus d'une heure.

Les mesures préventives diffèrent selon l'origine de la contamination. Dans le cas du passage d'un nuage toxique, il faut être sûr de l'étanchéité des parois, notamment au niveau des fenêtres. Pour prévenir l'introduction intentionnelle de toxiques, il faut que l'accès direct au réseau de distribution de l'air soit rendu très difficile (ex :

protection des prises d'air extérieures, accès contrôlé à la centrale de traitement d'air, bouches de reprise d'air cachées dans le faux-plafond).

([12])

La qualité de l'air sur le lieu de travail est-elle encadrée par la loi ?

Oui. La loi distingue les locaux où la pollution n'est due qu'à la présence humaine et les locaux où il y a en plus des émissions de polluants (locaux à pollution spécifique).

Les locaux à pollution non-spécifique peuvent être aérés en laissant les fenêtres ouvertes ou avec un système de ventilation mécanique. Le volume horaire minimal d'air neuf dépend du nombre de personnes et de leur activité. Dans les locaux à pollution spécifique, il faut en plus que la ventilation soit suffisante pour que la concentration de polluants ne dépasse pas les valeurs réglementaires.

La protection des travailleurs repose sur le captage des polluants au plus près possible de la source par un système d'aspiration. S'il est impossible d'éliminer les polluants par le système de ventilation, des équipements de protection individuelle doivent être fournis aux salariés. Le chef d'établissement doit prendre les mesures nécessaires pour que ces équipements soient effectivement utilisés.

Le système de ventilation doit être contrôlé au moins une fois par an (notamment : débit d'air neuf, efficacité des filtres). Il faut au moins deux contrôles par an lorsque l'air des locaux à pollution spécifique est recyclé.

([40] pp. 3-6)

Existe-t-il des maladies professionnelles liées à la pollution de l'air ?

Oui. Une part importante des maladies professionnelles est en relation directe avec la pollution de l'air. Il s'agit de cancers, de pathologies broncho-pulmonaires et pleurales, d'intoxications aigües et de pathologies gastro-intestinales ou cutanées. Les secteurs industriels les plus concernés sont l'industrie minière, le bâtiment et les travaux publics, la fonderie et la sidérurgie, l'industrie textile, le milieu céréalier (ouvriers des silos), la production laitière et l'élevage des porcs.

Conformément à la loi de 25 octobre 1919, une maladie est reconnue professionnelle si elle figure sur l'un des tableaux annexés au code de la Sécurité sociale. Ces tableaux créés et modifiés par décret (il en existe actuellement 114) comportent la liste des symptômes ou lésions que doit présenter le malade, les délais de prise en charge et la liste des travaux susceptibles de provoquer l'affection en cause.

Toute affection répondant aux conditions médicales, professionnelles et administratives répertoriées est présumée d'origine professionnelle sans qu'il soit nécessaire dans établir la preuve. Depuis 1993 une procédure complémentaire a été mise en place. Elle permet la reconnaissance des maladies professionnelles non inscrites dans un tableau ou ne présentant pas la totalité des conditions requises. Dans ce cas la présomption d'origine tombe et le lien direct avec l'activité professionnelle doit être prouvé.

([61], [98])

Comment mesurer l'exposition aux nanoparticules sur le lieu de travail ?

Pour estimer l'exposition des travailleurs aux particules, il faut au préalable identifier et localiser les sources de contamination et avoir une bonne connaissance des mouvements de l'air sur le lieu de travail. Ceci nécessite une campagne de mesures dans les conditions réelles d'activité (pour tenir compte par exemple des courants d'air provoqués par l'ouverture des portes). Une fois que l'on connaît la répartition et la concentration des particules, on calcule l'exposition des travailleurs en tenant compte du temps qu'ils passent dans chaque zone.

La campagne de mesures doit être assez longue pour estimer la variabilité au cours du temps de la composition et de la concentration des particules. En effet, les émissions sont généralement fugitives et instables.

([37] p. 136-138, [56] pp. 28-29)

Les nanomatériaux présentent-ils des risques particuliers pour les travailleurs ?

Les nanomatériaux sont constitués de nanoparticules et ce sont ces dernières qui posent potentiellement problème. Les risques pour les travailleurs sont de deux types : (1) le risque lié à la nature des nanoparticules constituant les nanomatériaux ; (2) le risque que les nanoparticules soient libérées accidentellement à des concentrations élevées dans l'air suite à un incident sur le lieu de travail (ex : renversement accidentel d'un récipient).

Le premier exemple de très graves problèmes respiratoires associés à un dysfonctionnement de la protection du poste de travail vient de Chine. Suite à la panne du système de ventilation, plusieurs ouvrières ont été exposées à de fortes concentrations de nanoparticules pendant plusieurs mois. Sept ont été hospitalisées et deux sont mortes.

Il n'est pas totalement démontré que les nanoparticules sont seules responsables de la maladie des ouvrières chinoises. Il est cependant raisonnable de prendre les mêmes précautions pour les nanoparticules que pour les produits chimiques dangereux. Il faut tenir compte en plus de la très longue persistance des aérosols de nanoparticules dans les locaux.

Le principe de précaution ne concerne à proprement parler que les pouvoirs publics. Pourtant, il a une influence indirecte sur les obligations de sécurité et les responsabilités civiles qui pèsent sur les personnes privées (employeurs, producteurs, vendeurs, etc.). Sa prise en compte dans l'élaboration des bonnes pratiques permet d'anticiper l'évolution de la réglementation.

([43] p. 19, [49] pp. 9-10, pp. 18-21, [54] p. 73, [62] p. 139, pp. 143-145, [82] p. 7)

La protection contre la pollution de l'air dans les établissements scolaires et les hôpitaux

La qualité de l'air est-elle surveillée dans les établissements scolaires et les hôpitaux ?

Les établissements d'enseignement et les hôpitaux sont soumis à la réglementation générale sur l'amiante. C'est-à-dire qu'il faut désamianter ou de confiner les matériaux contenant de l'amiante lorsqu'il y a plus de cinq fibres d'amiante par litre d'air.

Ils sont en plus soumis à une réglementation spécifique sur le radon. Les autorités locales doivent faire procéder à un dépistage du radon dans les départements où la concentration de radon est généralement élevée (ceci est dû à la nature du sol). Cette réglementation concerne les établissements d'enseignement, les établissements sanitaires et sociaux, les établissements thermaux et les établissements pénitentiaires.

Les responsables des établissements de santé, des établissements thermaux et des établissements hébergeant des personnes âgées doivent aussi prendre de mesures pour prévenir les risques de légionellose. Toutefois, bien que cette maladie soit transmise par bioaérosol, la réglementation ne porte pas sur la qualité de l'air mais sur la surveillance du réseau d'eau car c'est là que prolifèrent les légionelles.

([17], [20], [30], [59], [89], [91], [92])

Comment a-t-on déterminé les valeurs à ne pas dépasser pour le radon ?

Le radon est un gaz qui résulte de la transformation de l'uranium présent dans le sol. Il se transforme à son tour en particules radioactives qui se déposent dans les alvéoles pulmonaires. Ces particules (et donc, indirectement, le radon) sont la seconde cause de cancers du poumon, après le tabac. Le nombre de cancers du poumon augmente de 20 % lorsque l'exposition annuelle augmente de 100 Bq/m^3.

Il n'y a pas de concentration en dessous de laquelle le radon n'a pas d'effet et la solution raisonnable est de diminuer le plus possible l'exposition.

Il y a cependant des limites dues à la nature du sol. Par exemple, la concentration annuelle moyenne de radon dans l'habitat est de 20 Bq/m^3 au Royaume-Uni, de 63 Bq/m^3 en France et de 140 Bq/m^3 en République tchèque. A ces moyennes nationales se superpose une grande variabilité régionale. Ainsi, la concentration annuelle moyenne va de 22 Bq/m^3 à Paris à 264 Bq/m^3 en Lozère.

Comme les mesures pour diminuer la concentration de radon dans les locaux ont un coût, la plupart des pays ont choisi de s'occuper en priorité des cas où la concentration dépasse 400 Bq/m^3 (soit 2 % des logements en France et 7 % en Suisse).

([20] p. 7, [30], [72] pp. 1-3, p. 9, pp. 12-13, p. 21, pp. 49-51, pp. 89-91)

Que se passe-t-il lorsque la concentration de radon dépasse les valeurs tolérées ?

Si la concentration en radon dans les locaux dépasse en moyenne dans l'année 400 Bq/m^3, le propriétaire doit prendre des mesures simples. Si celles-ci ne suffisent pas pour passer en dessous de 400 Bq/m^3, le propriétaire doit entreprendre des travaux pour ramener la concentration de radon à un niveau aussi bas que possible. Le propriétaire doit agir sans délai si la concentration dépasse 1 000 Bq/m^3.

On peut réduire la concentration de radon en améliorant la ventilation dans les locaux et en l'empêchant de s'infiltrer (ex : étanchéité des sous-sols et des planchers, ventilation des vides sanitaires).

L'expérience montre que les mesures prises pour diminuer la concentration de radon ne suffisent pas toujours à rassurer le public, même si les mesures ont été efficaces. Par exemple, les pouvoirs publics ont dû fermer une école à Nogent-sur-Marne sous la pression de la population bien que les travaux aient permis de ramener la concentration de radon à 50 Bq/m^3 (avant les travaux, elle dépassait 400 Bq/m^3 en moyenne dans l'année avec des pics à plus de 1 000 Bq/m^3). Pour mémoire, environ 10 % des établissements scolaires de Franche-Comté présentent des teneurs en radon supérieures à 400 Bq/m^3 et 3 % à 1 000 Bq/m^3. La différence aux yeux de l'opinion publique est qu'en Franche-Comté les émissions sont dues à la géologie particulière de cette région alors qu'à Nogent-sur-Marne, le radon est émis par des déchets industriels.

([7], [17], [30], [96])

L'architecture hospitalière est-elle conçue pour éviter les contaminations par l'air ?

Les modes de prévention des risques d'infection dus aux bioaérosols ont changé au cours des siècles. Actuellement, l'architecture ne joue pas un rôle déterminant dans la fréquence des maladies infectieuses contractées lors d'un séjour à l'hôpital. Elles sont dues principalement à la contamination du matériel de soin.

De la fin du XVIII^e siècle jusqu'au milieu du XX^e siècle, l'architecture hospitalière était conçue pour assurer une forte ventilation naturelle car la prévention de la contagion était au cœur des préoccupations.

Depuis, l'amélioration de l'hygiène et les antibiotiques ont fait reculer les risques de contagion. La priorité est donnée à la rationalisation du fonctionnement et des coûts. Ceci a conduit à la conception de l'hôpital bloc où la ventilation est entièrement assurée par une centrale de traitement de l'air.

([5] pp. 29-31, [10] pp. 10-11, [99])

Quel est le taux minimal de renouvellement de l'air dans un hôpital ?

Le taux de brassage, c'est-à-dire le nombre de fois par heure où l'air est complètement renouvelé, varie selon l'utilisation des locaux. Il est compris entre 6 (vestibules, aires communes, chambres) et 25 (salles de chirurgie, salles d'accouchement). Il est de 12 dans les salles où il y a un risque particulier de contagion (ex : salle d'attente des urgences, salle d'attente de radiologie).

En règle générale, le système de ventilation évacue l'air directement à l'extérieur. Une climatisation en circuit partiellement fermé n'est envisageable que si l'air passe par des filtres à haute efficacité.

Les salles de traitement par des produits radioactifs posent un problème particulier car elles nécessitent un fort renouvellement de l'air (taux de brassage de 15 dans une salle de curiethérapie) alors qu'il faut éviter le rejet de produits radioactifs à l'extérieur.

N.B. le terme technique pour le renouvellement de l'air est *taux de brassage*. Le taux de brassage est le nombre de fois par heure où le volume d'air de l'enceinte est soufflé. C'est aussi le rapport du débit volume horaire soufflé sur le volume de l'enceinte. Le terme équivalent dans la littérature anglo-saxonne est ACH (*air changes/hour*). La réglementation française impose le plus souvent le débit d'air neuf par heure en m^3 pour un occupant.

([19] pp. 24-34, p. 37, [71] p. 104)

La protection des personnes contre la pollution de l'air à l'extérieur

Quelles sont les origines des particules présentes dans l'air à l'extérieur ?

Les particules de quelques micromètres proviennent en partie de l'érosion et de l'aérosol marin. Même dans un point aussi éloigné de la mer que Paris, les particules faisant entre 2,5 µm et 10 µm sont composées pour moitié de matériaux d'origine naturelle (sable, sel de mer).

En ville, la combustion est probablement la principale source de particules moins de 0,5 µm. On les retrouve dans les gaz d'échappement et dans la fumée des chauffages. L'usure due aux frottements est une autre source importante de nanoparticules (ex : usure des moteurs et des pneus – l'usure des freins génère des particules plus grosses, environ 1 µm).

Il ne faut pas non plus négliger les particules émises directement par les habitants : une personne émet un million de particules de plus de 0,3 µm à la minute (ex : usure des vêtements, desquamation de la peau, gouttelettes émises lors de la respiration). A titre d'exemple, on estime que dans une ville comme Paris, l'usure des chaussures génère 1,5 tonne de particules par jour et l'usure des pneus 8 tonnes.

Le métro cumule la pollution urbaine ordinaire (l'air du métro est pris au niveau de la rue) et celles issues des sources spécifiques (ex : particules émises lors du freinage, particules émises par les voyageurs, érosion du ballast et des rails).

([6] pp. 24-28, [23] p. 38, [37] pp. 144-146, [53] p. 5, [58], [74] pp. 5-7)

A quoi correspondent les informations sur la qualité de l'air extérieur ?

La mesure de la qualité de l'air extérieur a deux buts : (1) évaluer la pollution générale à laquelle la population est soumise jour et nuit quelle que soit son activité au cours de la journée ; (2) évaluer le risque maximal d'exposition du public à proximité du trafic routier.

Le mode de calcul de la qualité de l'air est fixé par la loi. La pollution générale est mesurée par la qualité de l'air ambiant loin de toute source de pollution. La pollution produite par le trafic routier est mesurée sur le trottoir, à deux ou trois mètres des pots d'échappement. Elle est environ deux fois plus faible que la pollution mesurée à l'intérieur des voitures.

Dans les deux cas, on mesure : (1) le dioxyde de soufre (qui reflète la pollution d'origine industrielle) ; (2) le poids de particules de taille inférieure à 10 µm (elles proviennent de l'activité industrielle, des transports et du chauffage) ; (3) le dioxyde d'azote (lié aux transports, à la combustion et au chauffage) ; (4) l'ozone (polluant secondaire dû principalement aux transports et à l'utilisation des solvants et des hydrocarbures). Pour la pollution due au trafic routier on mesure en plus l'oxyde de carbone et des composés résultant de la combustion incomplète des carburants.

([84], [88])

Comment mesurer les particules en suspension dans l'air ambiant ?

Il n'existe pas une méthode unique faisant référence pour mesurer les particules. Le choix de la méthode dépend des objectifs : fait-on la mesure en laboratoire ou sur le terrain ? veut-on mesurer la masse, le nombre ou la surface ?

Seules les mesures de la masse et du nombre sont faciles à réaliser. La mesure de la masse est la plus ancienne et permet un suivi historique de l'état de la pollution. Elle a l'inconvénient de donner plus d'importance aux particules les plus grosses. La mesure du nombre de particules est, quant à elle, biaisée par la prédominance des nanoparticules faisant une dizaine de nanomètres.

Il n'existe pas de méthodes standards pour la mesure de la surface, de la taille ou de la forme des particules.

([37] p. 137, [56] p. 22, p. 29)

De combien faut-il s'éloigner des routes pour éviter la pollution automobile ?

L'expérience montre qu'à 500 m d'une route à grande circulation, la pollution de l'air a retrouvé son niveau normal. Les barrières antibruit protègent efficacement contre la pollution due à la circulation automobile car elles repoussent l'air pollué en altitude. Les nanoparticules ont le temps de s'agréger en particules de quelques centaines de nanomètres et de se diluer dans l'air avant de revenir au sol.

Des particules de quelques nanomètres se forment à partir des oxydes de soufre contenus dans les gaz d'échappement. Elles sont riches en polluants acides et en composés organiques. Il se forme aussi des particules de noir de carbone de 20 à 200 nm qui résultent d'une combustion incomplète. Les nanoparticules s'agrègent lorsqu'elles se dispersent dans l'air. Leur nombre diminue de moitié lorsque l'éloignement de la route passe de 30 m à 100 m et il rejoint le niveau normal à 300 m. Les oxydes d'azote se propagent un peu plus loin.

La production de nanoparticules augmente lors des démarrages à froid ou des accélérations. Les particules de noir de carbone sont dix fois moins nombreuses lorsque le véhicule est équipé d'un filtre à particules.

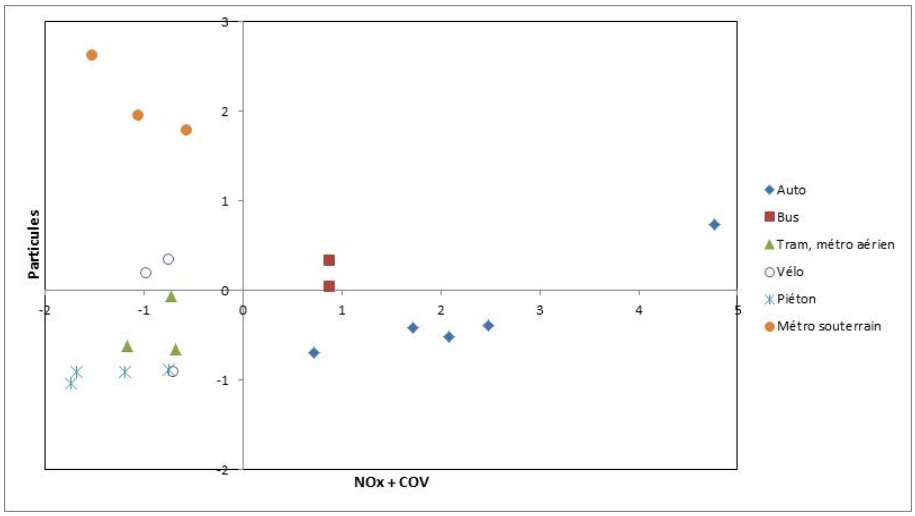
N.B. le changement de taille des particules ne supprime pas la pollution, mais il influe sur sa répartition et sur ses effets sur la santé.

([33] p. 8, [58] pp. 14-15, [86])

Quels sont les modes de transports urbains où l'on est le plus exposé à la pollution ?

A Paris, la voiture et l'autobus sont les modes de déplacement où l'on est le plus exposé à la pollution et la marche à pied celui où on est le moins exposé. La pollution est intermédiaire lorsqu'on se déplace en vélo et en métro aérien (ou en tram). Le métro souterrain se caractérise par une très forte pollution par les particules.

Il suffit de s'éloigner de trois mètres de la chaussée pour que la pollution soit deux fois plus basse que dans les voitures.



La pollution est estimée par la concentration de particules de moins de 2,5 µm et par un indicateur rendant compte de la concentration d'oxydes d'azote (NOx) et de composés organiques volatiles (COV). Le point le plus à droite correspond à l'exposition dans une voiture sur le boulevard périphérique. Le point en haut à gauche à l'exposition dans la partie souterraine du RER. Les deux points en bas à gauche à des piétons se promenant dans Paris.

Ce sont les personnes qui se déplacent en voiture sur le boulevard périphérique qui sont les plus exposées à la pollution. Ceci vient probablement de ce que la prise d'air d'une voiture est au niveau du pot d'échappement de la voiture qui la précède et que les voitures sont très proches sur le périphérique.

([84])

Les émissions atmosphériques des entreprises sont-elles réglementées ?

Les émissions de polluants dans l'atmosphère sont réglementées pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Les exploitants des plus grosses ICPE, celles soumises à autorisation, sont tenus de remettre aux pouvoirs publics un rapport annuel sur les quantités de polluants émises.

N.B. Une ICPE est une installation qui peut présenter des dangers ou des inconvénients pour : (1) la commodité du voisinage, (2) la santé, la sécurité, la salubrité publiques, (3) l'agriculture, (4) la protection de la nature et de l'environnement, (5) la conservation des sites et monuments. En Ile-de-France les plus grosses ICPE (3 000) sont soumises à autorisation alors que 16 000 sont soumises à une simple déclaration car elles ne présentent pas de gros dangers (ex : les pressings sont des ICPE car ils utilisent des solvants).

([93], [94])

Quels sont les risques de contamination par les légionelles dus aux tours de réfrigération ?

Les systèmes de refroidissement fonctionnant par pulvérisation de l'eau dans l'air (ex : tours aéroréfrigérantes des centrales électriques, climatisation des locaux de grande taille) sont susceptibles de disperser des légionelles dans l'atmosphère. La distance de contamination atteint typiquement plusieurs centaines de mètres. On a observé des contaminations à plusieurs kilomètres sous l'effet du vent (cas groupés de légionellose dans le Pas-de-Calais).

Les systèmes de refroidissement fonctionnant par pulvérisation de l'eau dans l'air sont des ICPE soumises à autorisation.

([18] pp. 181-184, [95])

Quel est le rôle des aérosols dans la pollution par les dioxines ?

Les dioxines sont des polluants qui se forment lors d'une combustion. Les molécules se fixent sur les particules présentes dans la fumée et se dispersent ainsi dans l'atmosphère puis se déposent sur les plantes. Les dioxines entrent dans la chaîne alimentaire humaine lorsque les plantes sont mangées par le bétail. Les dioxines s'accumulent dans les graisses et se retrouvent ensuite dans la viande et les produits laitiers que nous mangeons.

Les dioxines ont un effet nocif sur la reproduction et le développement et elles sont cancérigènes.

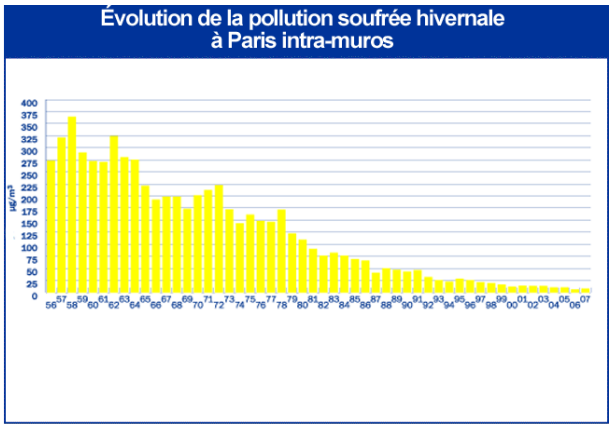
Plus d'un tiers des émissions de dioxines sont dues aux particuliers (ex : chauffage et cuisson au bois, feu à l'air libre pour brûler des déchets).

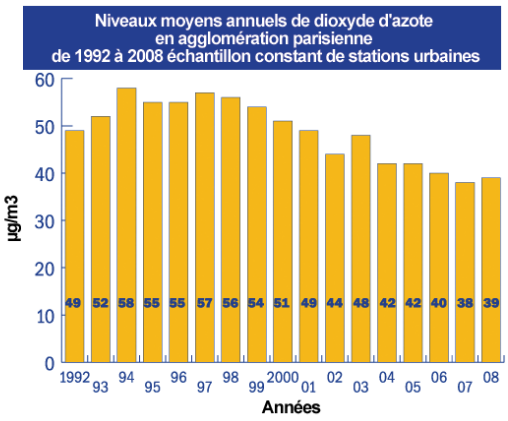
([27] pp. 29-41, [60] pp. 2-3, p. 6, p. 10, [83] p. 2, p. 28)

La qualité de l'air s'est-elle améliorée en ville ?

Oui. On observe une très forte baisse de la pollution d'origine industrielle et une diminution de la pollution due au trafic automobile.

La très forte baisse de la pollution d'origine industrielle observée depuis une cinquantaine d'année s'est traduite par la réapparition des lichens dans le centre des villes.





La pollution industrielle est caractérisée par les émissions d'oxydes de soufre. Elle a très fortement diminuée ces cinquante dernières années. La pollution due au trafic est caractérisée par les émissions d'oxydes d'azote. Elle a diminuée de 30 % au cours de ces quinze dernières années ([88]).

L'évolution de la pollution automobile varie selon les polluants. Le plomb a quasiment disparu depuis qu'il est interdit d'en ajouter dans les carburants. La concentration de monoxyde de carbone (CO) a baissé de 65 % en dix ans (l'émission de CO des véhicules fait l'objet de contrôles techniques réguliers et obligatoires). En revanche, les émissions d'oxydes d'azote n'ont diminué que de 30 % au cours de ces quinze dernières années.

([41] pp. 263-264, [84], [88])

Quels sont les responsabilités et le rôle des pouvoirs publics en matière de qualité de l'air ?

La qualité de l'air est une compétence de l'Etat. Elle est exercée par les collectivités territoriales au travers d'un dispositif de surveillance et de protection.

Les Plans régionaux pour la qualité de l'air fixent les objectifs de qualité et les grandes orientations en termes de prévention et de réduction de la pollution atmosphérique. Ils sont élaborés par les préfets. Ces derniers doivent également élaborer les Plans de protection de l'atmosphère pour les agglomérations de plus de 250 000 habitants. C'est la procédure qui permet, en cas de dépassement, de ramener la concentration en polluants à un niveau inférieur aux seuils légaux.

Les pouvoirs publics peuvent agir en restreignant ou en suspendant les activités polluantes. Ils peuvent aussi prescrire des limitations à la circulation des véhicules conformément au Plan de déplacement urbain.

C'est au préfet, titulaire d'un pouvoir de police spécial (lutte contre la pollution de l'air), qu'il incombe de prendre les mesures d'urgence en cas de pollution atmosphérique.

Mais le maire dispose également d'un pouvoir de police général (salubrité publique) sur le territoire de sa commune. Il peut à ce titre « prévenir et faire cesser les pollutions de toute nature » et prendre, en cas de péril imminent ou d'urgence, « les mesures de sûreté exigées par les circonstances ».

N.B. les Installations classées pour la protection de l'environnement sont exclusivement sous contrôle préfectoral.

([93], [100], [101])

Références

[1] Grand dictionnaire encyclopédique Larousse. 1982. ISBN 2-03-102300-4

[2] Jacques LAVOIE, Louis LAZURE. Guide de prévention contre la prolifération microbienne dans les systèmes de ventilation. Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec. Octobre 1994. http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/RG-088.pdf

[3] Mme Marie- France ROQUEBERT. Les moisissures : nature, biologie et contamination. Ministère de la culture. Juin 1997. http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/cours/roqueber.htm

[4] Jean-Marie ARNOULT. Protection et mise en valeur du patrimoine des bibliothèques – Recommandations techniques. Direction du livre et de la lecture. Ministère de la culture. 1998. http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/preventi/documents/conservation_dll.pdf

[5] Serge GOTTOT. Des infections hospitalières aux infections nosocomiales. Haut Conseil de la santé publique. Actualité et dossier en santé publique n° 23. Juin 1998. http://www.hcsp.fr/explore.cgi/ad234247.pdf

[6] Sophie MAZOUE. Elaboration et validation d'un système de traitement d'air pour les espaces souterrains du métropolitain parisien. Université Paris XII. 10 septembre 1998.

[7] Marie-Christine ROBE. La contamination au radium de l'école Marie Curie à Nogent sur Marne. IRSN. 1999. http://www.irsn.fr/FR/larecherche/Information_scientifique/Publications_Documentation/BDD_publi/Pages/La-contamination-au-radium-de-l-ecole-Marie-Curie-a-Nogent-sur-Marne-856.aspx

[8] Martyna KUSKE, Jacques NICOLAS. Les pollutions dans l'air à l'intérieur des bâtiments – Diagnostic – Incidences sur la santé. Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Province de Luxembourg, département Prévention-Santé. 2000. http://www.province.luxembourg.be/servlet/Repository/Les_pollutions_de_l'air_%C3%A0_l'i.PDF?IDR=3880

[9] Dick MENZIES, Anne FANNING, Lilian YUAN, J. Mark FITZGERALD, and the Canadian Collaborative Group in Nosocomial Transmission of TB. Hospital Ventilation and Risk for Tuberculous Infection in Canadian Health Care Workers. *Annals of Internal Medicine* **133** (2000) 779-789.

[10] Catherine FERMAND. Pour une histoire urbaine et architecturale de l'hôpital. Colloque « Hôpital, urbanisme et architecture ». 3 avril 2002. http://www.millenaire3.com/uploads/tx_ressm3/textes_fermand.pdf

[11] Confort thermique. Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques. CERTU. Juillet 2003. http://www.cnrs.fr/aquitaine-limousin/IMG/pdf/Confort_Thermique.pdf

[12] Prévention des contaminations exceptionnelles de nature chimique ou biologique dans les bâtiments. Etat des lieux des systèmes de traitement d'air et des installations de ventilation. Informations destinées aux opérateurs. CSTB. Janvier 2004.

[13] Qualité de l'air dans les installations aérauliques – guide pratique. CETIAT. Janvier 2004. http://www.cetiat.fr/fr/downloadpublic/index.cfm?docname=guide_qair.pdf

[14] Légionelles et systèmes de refroidissement – Guide technique à l'usage des professionnels du bâtiment, de la climatisation et de la réfrigération. Agence méditerranéenne de l'environnement. Avril 2004. http://www.ame-lr.org/publications/sante/legionelles/legionelles.pdf

[15] Congrong HE, Lidia MORAWSKA, Jane HITCHINS, Dale GILBERT. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric Environment* **38** (2004) 3405–3415. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.03.027

[16] Séverine KIRCHNER, Olivier RAMALHO, Jacques RIBERON, Claire SEGALA, Patrick O'KELLY, Eric PILCH. Impact énergétique et sanitaire du renouvellement d'air dans deux écoles primaires. Observatoire de la qualité de l'air intérieur. 2004. http://www.air-interieur.org/userdata/documents/Document_40.pdf

[17] Arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public. Journal officiel. http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=634FF5D5CC61E6D5EADF7508D1F2DBD5.tpdjo03v_3?cidTexte=LEGITEXT000021240937&dateTexte=20100618

[18] Numéro spécial consacré à la légionellose. Bulletin épidémiologique hebdomadaire n°36-37. Institut de veille sanitaire. 7 septembre 2004. http://www.invs.sante.fr/beh/2004/36_37/beh_36_37_2004.pdf

[19] La qualité de l'air intérieur dans les établissements du réseau de la santé et des services sociaux – Guide. Santé et services sociaux. Québec. 19 avril 2005. http://publications.msss.gouv.qc.ca/acrobat/f/documentation/2004/04-602-01w.pdf

[20] Grégoire A. G. DUBOIS. An overview of radon surveys in Europe. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities. 2005 (EUR 21892 EN). http://rem.jrc.ec.europa.eu/uploads/tx_pppublication/EUR_RADON.pdf

[21] Denis BOULAUD, André RENOUX. History of Aerosol Science at the Institute of Nuclear Protection and Safety and the University of Paris (1980 – 2001). In *History & Reviews of Aerosol Science*, edited by Gilmore J. SEM, Denis BOULAUD, Peter BRIMBLECOMBE, David S. ENSOR, James W. GENTRY, Johannes C.M MARIJNISSEN, Othmar PREINING. American Association for Aerosol Research. 2005. ISBN 0-9742299-1-1.

[22] Olivier WITSCHGER, Jean-François FABRIES. Particules ultra-fines et santé au travail. 1. Caractéristiques et effets potentiels sur la santé. INRS, *Hygiène et sécurité du travail* – Cahiers de notes documentaires. ND 2227. Deuxième trimestre 2005. http://www.hst.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/ND%202227/$File/ND2227.pdf

[23] Olivier WITSCHGER, Jean-François FABRIES. Particules ultra-fines et santé au travail. 2. Sources et caractérisation de l'exposition. INRS, *Hygiène et sécurité du travail* – Cahiers de notes documentaires. ND 2228. Deuxième trimestre 2005. http://www.hst.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/ND%202228/$File/ND2228.pdf

[24] Evaluation des risques sanitaires liés aux proliférations de Legionella dans l'eau des tours aéroréfrigérantes des centres nucléaires de production électrique d'EDF. Rapport du groupe de travail Afsset « Legionella CNPE ». Saisine n° 2004/015. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. Février 2006. http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/240608572358735827155240528299/legionella_CNPE.pdf

[25] Joyce S. TSUJI, Andrew D. MAYNARD, Paul C. HOWARD, John T. JAMES, Chiu-wing LAM, David B. WARHEIT, Annette B. SANTAMARIAK. Research Strategies for Safety Evaluation of Nanomaterials, Part IV: Risk Assessment of Nanoparticles. *Toxicological Sciences* 2006 **89**: 42–50. doi:10.1093/toxsci/kfi339

[26] Critères pour la conception et l'exploitation des systèmes de ventilation des installations nucléaires autres que les réacteurs nucléaires. Norme française NF ISO 17873. Avril 2006.

[27] Dioxines. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. INERIS. 24 avril 2006. http://www.ineris.fr/index.php?module=doc&action=getFile&id=2582

[28] Lidia MORAWSKA. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air*. 2006 **16**:335-347. doi:10.1111/j.1600-0668.2006.00432.x

[29] Jean-Michel PETIT. Les mélanges explosifs. Partie 2 : poussières combustibles. INRS. ED 944. Septembre 2006. ISBN 2-7389-1386-5. http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_pc_view/6745F056DF8B910CC125721200321477/$File/ed944.pdf

[30] Le radon. IRSN. 2006. http://www.irsn.fr/FR/base_de_connaissances/librairie/Documents/publications_grand_public/irsn_livret_le_radon.pdf

[31] L'environnement en France – Edition 2006. IFEN. Octobre 2006. http://www.ifen.fr/publications/syntheses/PDF/ree2006.pdf

[32] S. LAFOSSAS, F. BARAT, C. VERDUN-ESQUER. Qualité de l'air – Résultats d'enquêtes dans un bâtiment récent. INRS. *Documents pour le Médecin du Travail* n° 109. 1er trimestre 2007. http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/TF%20157/$file/tf157.pdf

[33] Ying ZHOU, Jonathan I LEVY. Factors influencing the spatial extent of mobile source air pollution impacts: a meta-analysis. *BMC Public Health* 2007, **7**:89. doi:10.1186/1471-2458-7-89

[34] A. Roderick ESCOMBE, Clarissa C. OESER, Robert H. GILMAN, Marcos NAVINCOPA, Eduardo TICONA, William PAN, Carlos MARTINEZ, Jesus CHACALTANA, Richard RODRIGUEZ, David A. J.

MOORE, Jon S. FRIEDLAND, Carlton A. EVANS. Natural Ventilation for the Prevention of Airborne Contagion. *PLoS Medicine* 2007, **4**(2), e68. doi:10.1371/journal.pmed.0040068

[35] Clifford S. MITCHELL, Junfeng (Jim) ZHANG, Torben SIGSGAARD, Matti JANTUNEN, Paul J. LIOY, Robert SAMSON, Meryl H. KAROL. Current State of the Science: Health Effects and Indoor Environmental Quality. *Environ Health Perspect* 2007 **115**:958–964. doi:10.1289/ehp.8987

[36] Campagne nationale logements : Etat de la qualité de l'air dans les logements français. Rapport final. Observatoire de la qualité de l'air intérieur. Mai 2007. http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/901096605168212697057874284367/qualite_air_interieur_oqai_2006.pdf

[37] Benoît HERVE-BAZIN. *Les nanoparticules : Un enjeu majeur pour la santé au travail ?* EDP Sciences. 5 juillet 2007. ISBN-10: 2-86883-995-9. ISBN-13: 978-2-86883-995-4.

[38] Armelle BAEZA, Laurent MARTINON. Caractérisation physico-chimique et effets biologiques des fractions fines (PM2.5 et PM1) et ultra-fines (PM0.1) de l'aérosol urbain de fond. Contrat ADEME / PRIMEQUAL n° 0462C0056. Juillet 2007.

[39] Bénédicte PICQUET-VARRAULT. Génération, vieillissement et analyse des aérosols organiques secondaires. PRIMEQUAL PREDIT-2 « Aérosol ». 2007. http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_scientifique_Picquet-Varrault_2007.pdf

[40] Anne LE ROY. Aération et assainissement des lieux de travail – Aide-mémoire juridique. INRS. Juillet 2007. http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_pc_view/BC59B8C674A34467C1256CC600461922/$File/tj5.pdf

[41] Deborah ISOCRONO, Enrica MATTEUCCI, Alessio FERRARESE, Elena PENSI, Rosanna PIERVITTORI. Lichen colonization in the city of Turin (N Italy) based on current and historical data. *Environmental Pollution* 2007 **145**:258-265. doi:10.1016/j.envpol.2006.03.031

[42] N. ROSENBERG. Affections respiratoires professionnelles non infectieuses dues aux agents biologiques. Secteur des déchets : collecte, tri et valorisation. INRS. *Document pour le médecin du travail* n° 110, 2e trimestre 2007. http://www.dmt-prevention.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/TR%2039/$File/TR39.pdf

[43] Bertrand HONNERT, Raymond VINCENT. Production et utilisation industrielle des particules nanostructurées. INRS, *Hygiène et sécurité du travail* – Cahiers de notes documentaires. ND 2277. Quatrième trimestre 2007. http://www.travail-et-securite.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/ND%202277/$File/ND2277.pdf

[44] Francelyne MARANO. A-t-on raison de considérer que les particules atmosphériques fines et ultrafines sont dangereuses pour la santé ? Institut de veille sanitaire. *Pollution atmosphérique* n° 195, *Extrapol* n° 33, Décembre 2007. http://www.invs.sante.fr/publications/extrapol/33/extrapol33.htm

[45] Evelyne GEHIN, Olivier RAMALHO, Séverine KIRCHNER. Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities. *Atmospheric Environment*, 2008 **42**:8341-8352. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.021

[46] Myriam RICAUD, Dominique LAFON, Frédérique ROOS. Les nanotubes de carbone : quels risques ? Quelle prévention ? INRS, *Hygiène et sécurité du travail* – Cahiers de notes documentaires. ND 2286. Premier trimestre 2008. http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/ND%202286/$file/nd2286.pdf

[47] Véronique EZRATTY, Fabien SQUINAZI. Virus influenza pandémique à l'intérieur des bâtiments : quel risque de transmission par les systèmes de ventilation ou de climatisation ? *Environnement, Risques & Santé* – 2008 **7**(4). doi: 10.1684/ers.2008.0157

[48] Faisons respirer notre maison avec la ventilation. ADEME. Avril 2008. http://www.ademe.fr/particuliers/fiches/ventilation/ventilation.pdf

[49] Myriam RICAUD, Olivier WITSCHGER. Les nanomatériaux. Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention. INRS. ED 6050. Juin 2008. http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_search_view/E304C3A89A4AD570C12575EC004A77E0/$File/ed6050.pdf

[50] F. MERAT-TAGNARD, A. POIVEY-BELLAGAMBA, F. MICHIELS. Nanoparticules : un enjeu pour la prévention. Actes du symposium INRS-CRAM Centre. 30e Congrès national de médecine et santé au travail. Tours. Juin 2008. INRS. *Document pour le médecin du travail* n° 115, 3e trimestre 2008. http://www.dmt-prevention.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/TD%20162/$File/TD162.pdf

[51] C. Y. H. CHAO, M. P. WAN, G. N. SZE TO. Transport and Removal of Expiratory Droplets in Hospital Ward Environment. *Aerosol Science and Technology* 2008 **42**:377–394. doi: 10.1080/02786820802104973. http://pdfserve.informaworld.com/880881__793491380.pdf

[52] Bernard FESTY. Les particules grossières (PM "coarses") participent-elles à la nocivité des particules et/ou de l'aérosol ambiant ? Institut de veille sanitaire. *Pollution atmosphérique* n° 197, *Extrapol* n° 34, Juin 2008. http://www.invs.sante.fr/publications/extrapol/34/extrapol34.htm

[53] Valérie PERNELET-JOLY. La composition chimique des particules atmosphériques : quels composants participent à la nocivité des particules ? Institut de veille sanitaire. *Pollution atmosphérique* n° 198-199, *Extrapol* n° 35. Septembre 2008. http://www.invs.sante.fr/publications/extrapol/35/extrapol35.htm

[54] Sonia DESMOULIN. Evolution du droit et développement des nanotechnologies. Actualité et dossier en santé publique n° 64. Haut Conseil de la santé publique. Septembre 2008. http://www.hcsp.fr/docspdf/adsp/adsp-64/ad647173.pdf

[55] N. ROSENBERG. Affections respiratoires professionnelles non infectieuses dues aux humidificateurs / climatiseurs. INRS. *Document pour le médecin du travail* n° 116, 4e trimestre 2008. http://www.dmt-prevention.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/TR%2044/$File/TR44.pdf

[56] Olivier WITSCHGER. Nanoparticules : quelles possibilités métrologiques pour caractériser l'exposition des personnes ? SPECTRA ANALYSE n° 264 Novembre 2008. http://spectrabiology.com/archivana.aspx

[57] Patrick KINNEY. Ozone troposphérique et santé humaine : un renouveau de la recherche. Institut de veille sanitaire. *Pollution atmosphérique* n° 201, *Extrapol* n° 36, Décembre 2008. http://www.invs.sante.fr/publications/extrapol/36/extrapol36.htm

[58] Christian SEIGNEUR. Current Understanding of Ultrafine Particulate Matter Emitted from Mobile Sources. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2009 **59**:3–17. doi:10.3155/1047-3289.59.1.3

[59] Amiante : l'essentiel. Dossier Web. INRS. 14 avril 2009. http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/dossier%20amiante%20index%202/$file/visu.html

[60] Reduction of dioxin emissions from domestics sources. European Commission. April 2009. http://ec.europa.eu/environment/dioxin/pdf/brochure09.pdf

[61] Les maladies professionnelles, régime général – Aide-mémoire juridique. INRS. Juin 2009. http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/TJ%2019/$file/tj19.pdf

[62] Tian XIA, Ning LI, Andre E. NEL. Potential Health Impact of Nanoparticles. *Annu. Rev. Public Health*. 2009 **30**:137–50. doi: 10.1146/annurev.publhealth.031308.100155

[63] Jeffrey SHAMAN, Melvin KOHN. Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 2009 **106**, 3243–3248. doi:10.1073/pnas.0806852106

[64] I. EAMES, J. W. TANG, Y. LI, P. WILSON. Airborne transmission of disease in hospitals. *J. R. Soc. Interface* 2009 **6**, S697–S702. doi:10.1098/rsif.2009.0407.focus

[65] Julian W. TANG, Thomas J. LIEBNER, Brent A. CRAVEN, Gary S. SETTLES. A schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control. *J. R. Soc. Interface* 2009 **6**, S727–S736. doi:10.1098/rsif.2009.0295.focus

[66] Julian W. TANG. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. *J. R. Soc. Interface* 2009 **6**, S737-S746. doi: 10.1098/rsif.2009.0227.focus

[67] Peter V. NIELSEN. Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces. *J. R. Soc. Interface* 2009 **6**, S747–S755. doi:10.1098/rsif.2009.0228.focus

[68] I. EAMES, D. SHOAIB, C. A. KLETTNER, V. TABAN. Movement of airborne contaminants in a hospital isolation room. *J. R. Soc. Interface* 2009 **6**, S757–S766. doi:10.1098/rsif.2009.0319.focus

[69] Raymond P. CLARK, Mervyn L. de CALCINA-GOFF. Some aspects of the airborne transmission of infection. *J. R. Soc. Interface* 2009 **6**, S767-S782. doi: 10.1098/rsif.2009.0236.focus

[70] Raymond TELLIER. Aerosol transmission of influenza A virus: a review of new studies. *J. R. Soc. Interface* 2009 **6**, S783-S790. doi: 10.1098/rsif.2009.0302.focus

[71] Jacques BOUTELOUP, Michel LE GUAY, Jean LIGEN. Processus de traitement de l'air. Editions parisiennes. Juin 2009. ISBN 978-2-86243-093-5.

[72] Hajo ZEEB, Ferid SHANNOU. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. OMS. 2009. ISBN 978-92-4-154767-3. http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf

[73] Juslin KOFFI. Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles. Thèse Université de la Rochelle. 8 juillet 2009. http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/43/33/48/PDF/These_J_Koffi.pdf

[74] Kiran RAMGOLAM, Olivier FAVEZ, Hélène CACHIER, Annie GAUDICHET, Francelyne MARANO, Laurent MARTINON, Armelle BAEZA-SQUIBAN. Size-partitioning of an urban aerosol to identify particle determinants involved in the proinflammatory response induced in airway epithelial cells. *Particle and Fibre Toxicology*. 2009, **6**:10. doi:10.1186/1743-8977-6-10

[75] SA GRINSHPUN, H HARUTA, RM ENINGER, T REPONEN, RT MCKAY, SA LEE. Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: two pathways for particle penetration. *J Occup Environ Hyg.* 2009 **6**, 593-603.

[76] Tina M SAGER, Vincent CASTRANOVA. Surface area of particle administered versus mass in determining the pulmonary toxicity of ultrafine and fine carbon black: comparison to ultrafine titanium dioxide. *Particle and Fibre Toxicology* 2009, **6**:15. doi:10.1186/1743-8977-6-15

[77] Pierre CORTES. Démarche normative dans le domaine de la maîtrise de la contamination radioactive dans les installations nucléaires. Contaminexpert 2009.

[78] J. VENDEL, J.C. LABORDE, N. MICHIELSEN, F. GENSDARMES. Lessons learnt over 30 years of air filtration in the nuclear industry. *Journal of Physics: Conference Series* 2009 **170**:012-026 doi:10.1088/1742-6596/170/1/012026.

[79] Ronald E. SHAFFER, Æ Samy RENGASAMY. Respiratory protection against airborne nanoparticles: a review. *J Nanopart Res* **11** (2009) 1661–1672. doi: 10.1007/s11051-009-9649-3

[80] Hong CHEN, Mark S. GOLDBERG. The effects of outdoor air pollution on chronic illnesses. *McGill Journal of Medicine* 2009 **12**:58-64.
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2687917/pdf/mjm12_1p58.pdf

[81] P.G. KNOTT. Transmission of Influenza Virus by Inhalation pathways – An Occupational Hygienists' view. 27th Annual Conference of the Australian Institute of Occupational Hygienists. 5-9 December 2009. Canberra. http://www.aioh.org.au/conference/2009/Downloads/ConcurrentAbstracts/3_1PKnott.pdf

[82] Environmental, Health and Safety Impacts of Nanoparticles. Risk Assessment of Engineered Nanoparticles. February 2010. http://www.enpra.eu/LinkClick.aspx?fileticket=8xn4IMPJon8%3D&tabid=58

[83] Results of the monitoring of dioxin levels in food and feed. European Food Safety Authority. 28 février 2010. http://www.efsa.europa.eu/fr/scdocs/doc/1385.pdf

[84] Etude d'exposition des citadins lors de leur déplacement quotidien entre leur domicile et leur lieu de travail avec différents moyens de transport : bus, métro, RER, véhicules particuliers, vélo et marche. Laboratoire central de la préfecture de police, Laboratoire d'hygiène de la Ville de Paris, RATP. Programme PRIMEQUAL-PREDIT. 2010.

[85] Les fièvres hémorragiques. Institut Pasteur. http://www.pasteur.fr/ip/easysite/go/03b-00000j-0h4/presse/fiches-sur-les-maladies-infectieuses/fievres-hemorragiques-virales

[86] Karine SARTELET. Cours VET « Environnement atmosphérique et qualité de l'air » Particules atmosphériques. Ecole des Ponts. http://cerea.enpc.fr/fich/support_cours/POLU1/VET-Particules.pdf

[87] Techniques de climatisation et de conditionnement de l'air humide. DIMCLIM.
http://www.dimclim.fr/index.php?PHPSESSID=2659af42d7587a6f2322473772c16d88

[88] Site de AIRPARIF. http://www.airparif.asso.fr/

[89] Infos Amiante. http://www2.logement.gouv.fr/infos/amiante/

[90] Le Laboratoire d'études et de prévention des Pollutions Intérieures. Province du Hainaut. http://www.hainaut.be/sante/hvs/template/template.asp?page=lpi&navcont=16,0,0&branch=6

[91] Page d'accueil de Hygiène – Sécurité – Conditions de Travail en Collectivité Territoriale. http://hsct2.free.fr/

[92] Amiante. Chambre de commerce et d'industrie de Paris. http://www.environnement.ccip.fr/Thematique/Sante-Securite/Amiante

[93] La création d'une ICPE – Installation Classée pour la Protection de l'environnement. Chambre de commerce et d'industrie de Paris. http://www.environnement.ccip.fr/Thematique/ICPE-et-Sites-et-sols/Creation-d-une-ICPE/Definition-et-nomenclature-ICPE/Qu-est-ce-qu-une-ICPE

[94] Entreprises : comment réduire vos émissions atmosphériques ? Chambre de commerce et d'industrie de Paris. http://www.environnement.ccip.fr/Thematique/Air/Entreprises-comment-reduire-vos-emissions-atmospheriques

[95] La légionellose. Chambre de commerce et d'industrie de Paris. http://www.environnement.ccip.fr/Thematique/Sante-Securite/Legionellose

[96] Le radon, un gaz radioactif présent dans l'habitat. Directions régionale et départementales des affaires sanitaires et sociales de Franche-Comté. http://www.franche-comte.sante.gouv.fr/sante/sante-environnement/le-radon-un-gaz-radioactif-present-dans-l.html

[97] Bâtiment / Bâtiment - enveloppe et composants / Ventilation - perméabilité / Principes généraux. ADEME. http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15882

[98] Tableau des maladies professionnelles, guide d'accès et commentaires. INRS. http://inrsmp.konosphere.com/cgi-bin/mppage.pl?

[99] L'architecture hospitalière. Histoire et Patrimoine des hôpitaux de l'Assistance Publique - Hôpitaux de Paris. http://www.aphp.fr/site/histoire/architecture.htm

[100] Code de l'environnement : Titre II : Air et atmosphère (Articles L220-1 à L220-2)

[101] Code Général de Collectivité Territoriales (CGCT) (Articles L2212-2 al.5 et L2212-4)

Valentina LAZAROVA, François BRISSAUD. Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, **299** (2007) 29-39.

Gwenaëlle LAVISON, Laurent MOULIN. Réutilisation des eaux usées : réglementation actuelle et paramètres d'intérêt. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, **299** (2007) 41-46.

Pierre CORSIN, Patricia LE STRAT. Les effluents des stations d'épuration : comment les rendre aptes à une seconde vie. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, **299** (2007) 47-52.

Les procédés d'épuration des petites collectivités du Bassin Rhin-Meuse. Eléments de comparaison technique et économique. Agence de l'Eau Rhin-Meuse. Juillet 2007. http://www.eau-rhin-meuse.fr/tlch/procedes_epuration/doc_entier.pdf

Les fonctions environnementales des zones tampons. Les bases scientifiques et techniques des fonctions de production des eaux. CORPEN. Septembre 2007. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_fonctions_environn_zones_temp_bd.pdf ; http://www.developpement-durable.gouv.fr/Productions-de-la-Corpen.html

Ronan COLIN. Les perturbateurs endocriniens dans l'eau : Un enjeu environnemental et sanitaire. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, **319** (2009) 63-67.

Environmental Health Criteria 240 – Principles and Methods for the Risk Assessment of Chemicals in Food. Organisation mondiale de la Santé. ISBN 978 92 4 157240 8. 2009. http://whqlibdoc.who.int/ehc/WHO_EHC_240_15_eng_summary_fre.pdf

Synthèse du projet ANR AMPERES. Analyse de micropolluants prioritaires et émergents dans les rejets et les eaux superficielles 2006-2009. 29 janvier 2010. https://projetamperes.cemagref.fr/illustrations/AMPERES_synthese_2009.pdf.1-7

Eau de consommation humaine – réglementation. Administrations Sanitaires et Sociales de l'Etat en Ile-de-France. 10 mars 2010. http://ile-de-france.sante.gouv.fr/sante-publique/environnement-et-sante/eau-potable-52/reglementation.html

Journée Micropolluants Aquatiques. ONEMA. 10-12 Mars 2010. http://www.onema.fr/Retour-sur-les-Journees?archives=2010

L'évaluation du risque toxique dans les milieux aquatiques. Quels outils pour quelles perspectives ? *Sciences Eaux & Territoires*. 10 mai 2010. http://www.set-revue.fr/levaluation-du-risque-toxique-dans-les-milieux-aquatiques

L'eau et son droit. Rapport public 2010. Conseil d'Etat. 4 juin 2010. http://www.conseil-etat.fr/cde/media/document/eau_droit_rapport.pdf

L'environnement en France – Edition 2010. Commissariat général au développement durable du ministère chargé de l'environnement. Juin 2010. http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/publications/nos-publications/references/2010/l-environnement-en-france-edition-2010.html

Gérer l'eau dans l'entreprise. Chambre de commerce et de l'industrie de Paris. Dossier thématique mis à jour le 23 septembre 2010. http://www.entreprises.ccip.fr/web/environnement/eau/gerer-l-eau-dans-l-entreprise

Le savoir-faire français dans le domaine de la dépollution des sols et des eaux souterraines. Collection : Données et références. ADEME / MEDDTL / Ubifrance. Janvier 2011. http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=85AB89EC705B13319475B422D71FAC831296206756007.pdf

Portail d'information sur l'assainissement communal. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement. Mars 2011. http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/recueil.php

Protection et gestion des eaux. DG Environnement. Synthèses de la législation de l'Union européenne. http://europa.eu/legislation_summaries/environment/water_protection_management/index_fr.htm