
Cours VET

« Environnement atmosphérique et qualité de l'air »

Effets sanitaires et réglementations

Christian Seigneur

Cerea

Plan

- Identification et caractérisation des effets sanitaires des polluants atmosphériques
- Calcul des risques sanitaires
- Réglementations des polluants atmosphériques pour les effets sanitaires

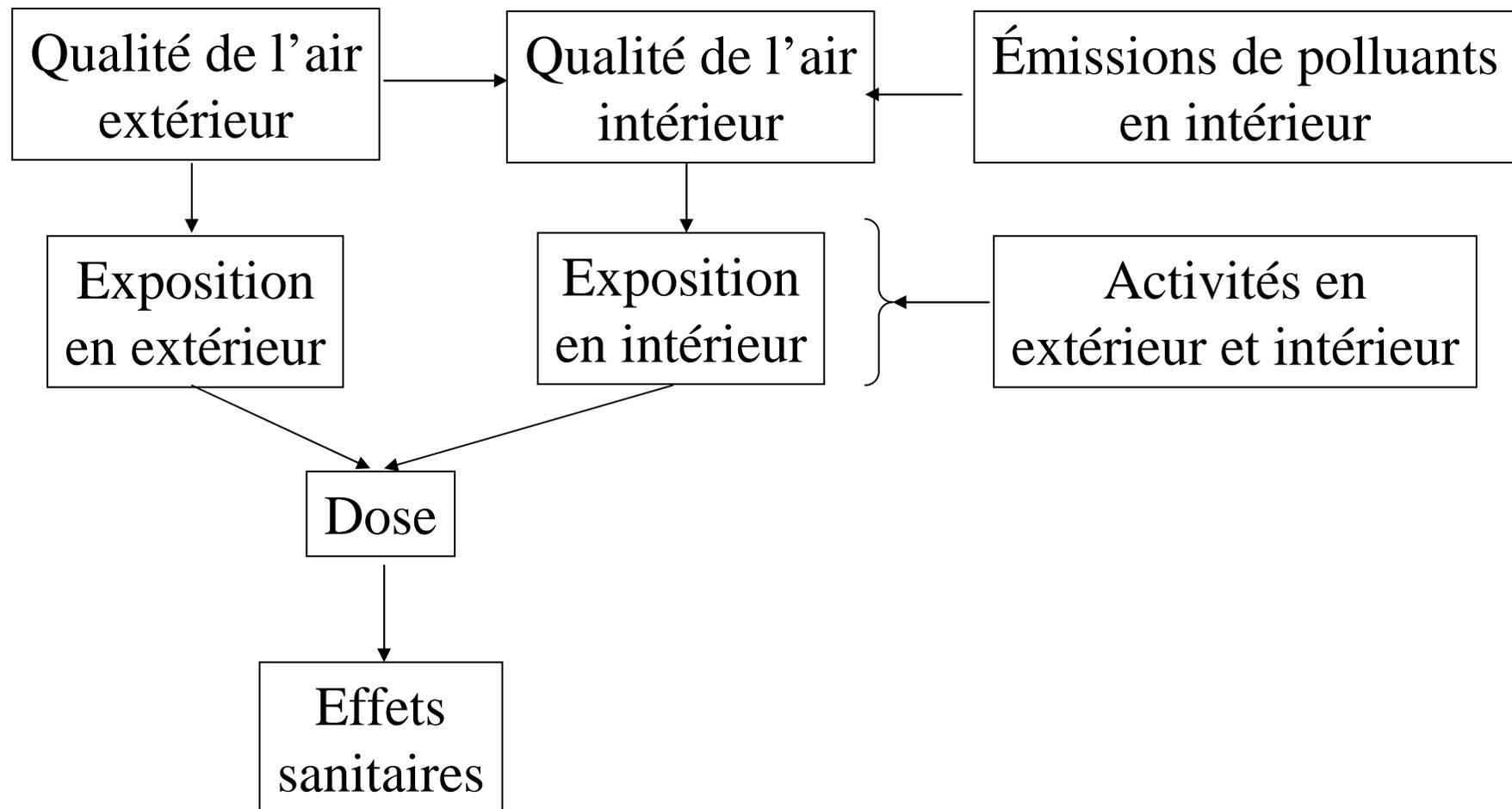
Estimation des effets sanitaires

- Exposition
- Toxicologie
- Epidémiologie
- Analyse des effets sanitaires
- Bases de données

Exposition

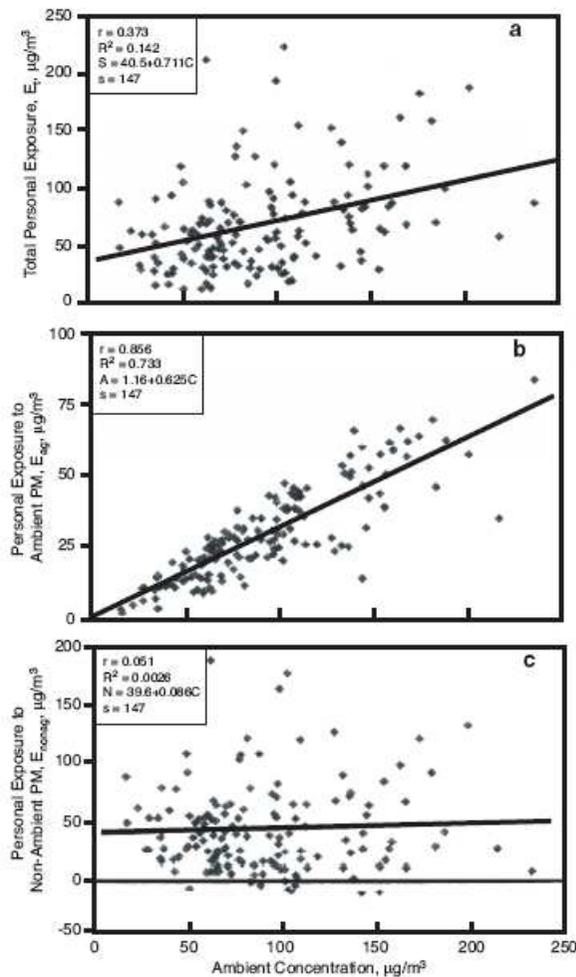
- L'exposition aux polluants atmosphériques comprend la pollution extérieure et la pollution intérieure
- La pollution intérieure dépend de la pénétration des polluants extérieurs et des sources de pollution intérieure
- Certaines études sanitaires sur la pollution atmosphériques ciblent préférentiellement la pollution extérieure (par exemple pour documenter des seuils pour les réglementations) mais d'autres études prennent en compte l'exposition totale des individus.

Exposition



Exposition

Air extérieur et air intérieur



← Une corrélation (faible) existe entre les concentrations de l'air extérieur et l'exposition totale

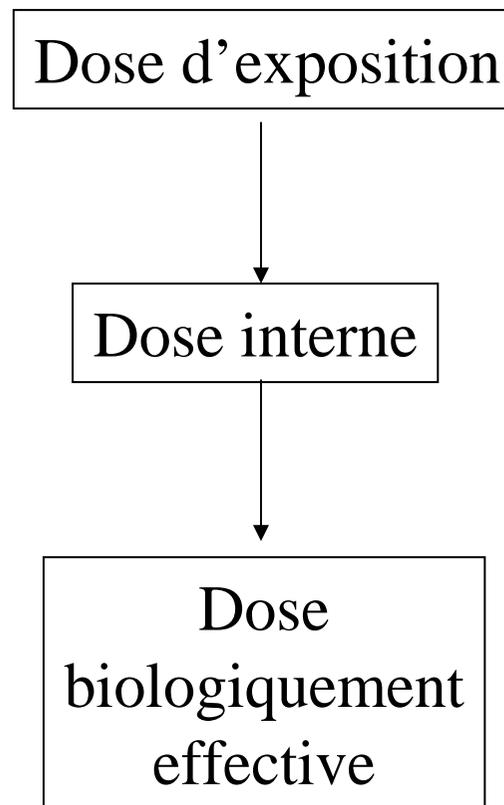
← Bonne corrélation entre les concentrations de l'air extérieur et l'exposition en extérieur

← Pas de corrélation entre les concentrations de l'air extérieur et l'exposition en intérieur

Dose

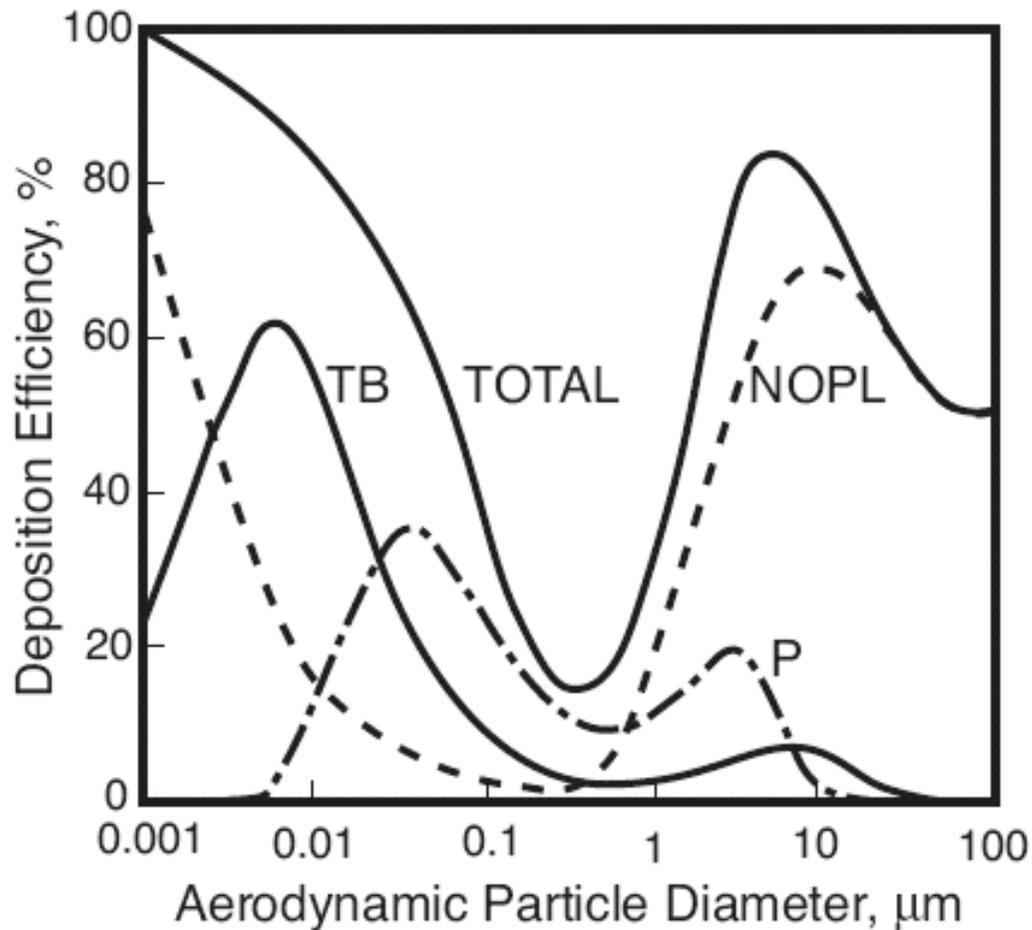


Mesure de la dose d'exposition
« Personal multipollutant sampler »



Dose pour les polluants particulaires

Influence de la granulométrie



NOPL : voies aériennes supérieures (région oto-rhyno-pharyngo-laryngienne)

TB : arbre trachéo-bronchique

P : région pulmonaire

Source : Phalen , 2002

Toxicologie

- La toxicologie permet d'obtenir une compréhension des phénomènes qui mènent aux effets sanitaires
 - Études in vitro
 - Elles sont effectuées avec des cultures cellulaires
 - Études in vivo
 - Études cliniques avec des individus
 - Extrapolation de l'animal à l'homme

Toxicologie

Études in vitro

- Études effectuées avec des cultures cellulaires
- Elles permettent d'étudier les mécanismes biologiques fondamentaux
- Un exemple est le test de Ames pour identifier les substances chimiques mutagènes
- En pollution atmosphérique, les études in vitro peuvent permettre d'identifier des processus d'inflammation, d'oxydation ou de transfert des particules dans les tissus cellulaires

Toxicologie

Études cliniques avec des individus

- L'exposition à des polluants déterminés est contrôlée dans le laboratoire
- Le polluant étudié peut être un polluant spécifique ou de l'air prélevé dans l'atmosphère et concentré pour le but de l'étude
 - Les tests comprennent généralement la fonction pulmonaire mais aussi divers paramètres liés à la fonction cardiaque

Toxicologie

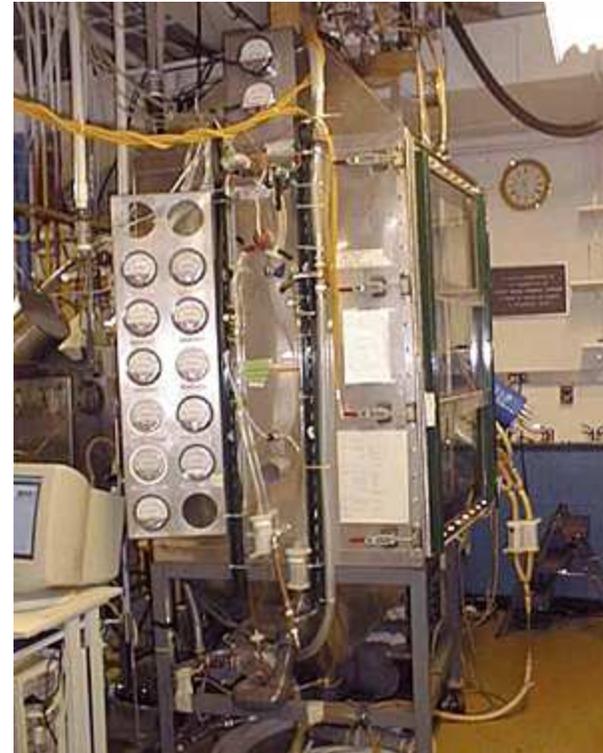
Avantages et inconvénients

- Avantages
 - Pour les tests effectués sur l'homme, les résultats sont directement applicables à la protection de la santé publique
 - Utilisation de composés chimiques spécifiques
- Inconvénients
 - Les nombres d'individus étudiés sont faibles
 - Les individus les plus sensibles ne sont généralement pas étudiés
 - Périodes d'exposition assez courtes
 - Utilisation de concentrations plus élevées que dans l'atmosphère
 - Utilisation de polluants spécifiques sans interactions avec les autres polluants atmosphériques (sauf dans les études utilisant de l'air ambiant)
 - Besoin de laboratoires spécialisés

Toxicologie

Études sur des animaux

- Avantages : Elles permettent d'obtenir des données qui ne peuvent pas être obtenues avec des individus
 - Concentrations plus élevées
 - Autopsies
- Inconvénients : Il faut extrapoler de l'animal à l'homme
 - Modèles du système respiratoire



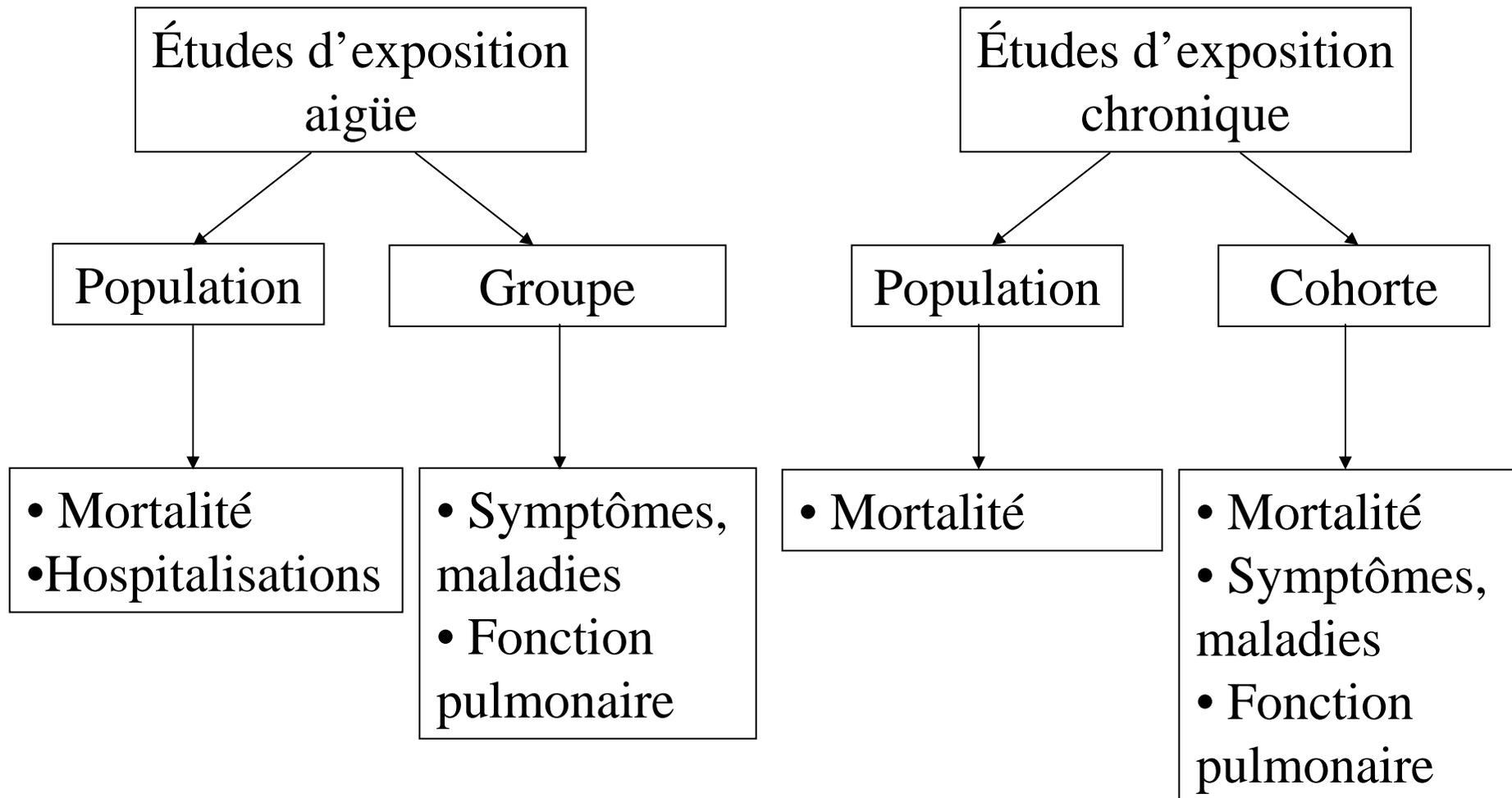
Source : HSPH, 2006

Épidémiologie

- Analyse de l'effet de la pollution atmosphérique sur la santé
- Relation statistique entre le niveau de pollution et l'effet sanitaire
- Identification des effets sanitaires chez les populations sensibles

Épidémiologie

Différents types d'études



Épidémiologie

Différents types d'études

- Population (études transversales)
 - Par exemple, comparaison d'effets sanitaires entre des populations situées dans des régions différentes et exposées à des niveaux de pollution différents (études écologiques)
- Cohorte
 - L'exposition d'un groupe d'individus (cohorte) est estimée de façon directe ou indirecte et est comparée aux effets sanitaires
 - L'étude peut être prospective ou rétrospective

Épidémiologie

Différents types d'études

- Groupe (« panel »)
 - Semblable à une étude de cohorte mais effectuée de façon plus détaillée (exposition, effets sanitaires) et, généralement, pour un groupe d'individus à risque
- Cas-témoins
 - Une comparaison est effectuée entre un groupe qui présente un effet sanitaire et un groupe témoin qui ne le présente pas

Épidémiologie

Facteurs à prendre en compte

- Age
- Climat et météorologie (température)
- Aspects socio-culturels
- Profession
- Éducation
- Activités extra-professionnelles
- Habitudes individuelles (consommation de tabac, etc.)

Épidémiologie

Association statistique

- L'étude épidémiologique fournit une association statistique entre l'exposition et l'effet sanitaire et non pas une relation de cause à effet
- Cette association peut être plus ou moins probable
- Importance de cette association statistique entre la cause et l'effet
 - Valeur de la corrélation statistique
 - Cohérence parmi plusieurs études
 - Spécificité (une cause est associée à un seul effet)
 - Temporalité (l'exposition précède l'effet)
 - Plausibilité (l'association statistique est compatible avec les données biologiques pertinentes)

Épidémiologie

Mesures de risque

- Il existe différentes mesures de risque utilisées en épidémiologie :
 - Le risque relatif utilisé par exemple dans les études de cohorte
 - Le rapport de cotes (« odds ratio ») utilisé par exemple dans les études de cas-témoins

Taux d'incidence et risque

- Le taux d'incidence est défini comme le nombre de nouvelles personnes malades (a ou b) divisé par la durée de l'exposition intégrée sur toute la cohorte :
 - $I_E = a / (N_E D)$ pour les personnes exposées
 - $I_0 = b / (N_0 D)$ pour les personnes non-exposéesoù D est la durée de l'exposition (prise comme identique ici pour toutes les personnes exposées et non-exposées), N est le nombre de personnes
- On définit le risque :
 - $R = I D$; donc
 - $R_E = a / N_E$ et $R_0 = b / N_0$

Taux d'incidence et risque

- Le risque relatif est :

$$RR = R_E / R_0 = I_E / I_0$$

- L'excès de risque absolu est : $(R_E - R_0)$

- L'excès de risque relatif est : $(R_E - R_0) / R_0 = RR - 1$

- La fraction attribuable est définie est définie comme la différence des risques avec et sans le polluant divisée par le risque de la population exposée au polluant :

$$FA = (R_E - R_0) / R_E = (RR - 1) / RR$$

si l'excès de risque $(R_E - R_0)$ est faible :

$$FA \sim (RR - 1)$$

Tableau de contingence

Étude de cas-témoin

	Nombre de personnes malades (cas)	Nombre de personnes non-malades (témoins)
Nombre de personnes exposées	a	c
Nombre de personnes non-exposées	b	d
Nombre total	a + b	c + d

Rapport de cotes (Odds ratio)

- Le rapport de cotes (ou rapport de chances) est défini comme le rapport de la « chance » qu'une personne exposée a d'être malade et de la « chance » qu'une personne non-exposée a d'être malade :

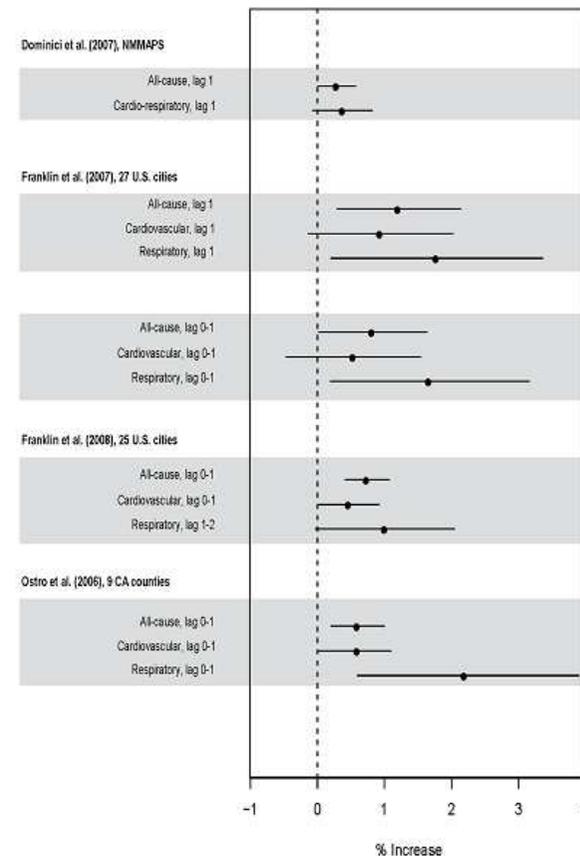
$$\text{OR} = (a / c) / (b / d)$$

- Si les personnes du groupe « témoin » ont été sélectionnées astucieusement pour bien représenter la fréquence d'exposition de toute la population (cohorte) dont les « cas » font partie, alors :

$$c / d = N_E / N_0 \text{ et on a } \text{OR} = \text{RR}$$

Incertitudes

- Il y a de nombreuses incertitudes qui doivent être prises en compte lors du calcul du RR ou du OR lors d'une étude épidémiologique. Par conséquent, des fourchettes d'erreur sont associées aux risques estimés :



Excès de risque pour l'association entre mort prématurée et exposition au PM_{2.5} (incrément de 10 µg/m³) avec les intervalles de confiance (95%)

Épidémiologie

Limites

- Le mécanisme biologique n'est pas identifié
- La relation entre l'exposition et les concentrations de PM en extérieur est incertaine
- Les effets d'autres polluants peuvent affecter l'analyse

(Source : Pope & Dockery, 1999)

Épidémiologie

Avantages et inconvénients

- Avantages
 - Elle permet d'étudier les effets sanitaires chez l'homme dans son milieu sans perturbation
- Inconvénients
 - Problème des effets simultanés de différents polluants
 - Effets de confusion d'autres facteurs : les facteurs confondants (météorologie, facteurs socio-culturels, etc.)

Question du seuil

- Les résultats des études épidémiologiques suggèrent une augmentation du risque sanitaire avec la concentration de PM de façon à peu près linéaire
- Un seuil au dessous duquel il n'y aurait pas d'effets sanitaires n'est pas évident ; cependant, les réglementations sont fondées sur l'existence d'un seuil

Bases de données

- Les études sur les effets sanitaires des PM nécessitent des informations sur plusieurs aspects
 - Qualité de l'air (concentrations de polluants)
 - Effets sanitaires (morbidité, mortalité, incidences de cancers)
 - Météorologie (température, etc.)
 - Population (résidence, travail, catégorie socio-professionnelle, etc.)
 - Autres données pertinentes (émissions locales, par exemple)

Exemples d'effets sanitaires néfastes de polluants atmosphériques

Polluant	Effet sanitaire
Plomb	Saturnisme (retard mental)
Monoxyde de carbone	Intoxication (carboxy-hémoglobine => hypoxie)
Dioxyde de soufre	Effets respiratoires
Dioxyde d'azote	Effets respiratoires
Ozone	Effets respiratoires
Particules fines	Effets respiratoires et cardio-vasculaires
Benzène	Cancérogène (leucémie)

Calcul de risques sanitaires

- Les études de risques sanitaires utilisent généralement des formulations simples pour les relations dose-réponse
- Elles sont constituées de deux types de polluants
 - Polluants cancérogènes
 - Polluants non-cancérogènes
- et deux types d'effets
 - Effets chroniques
 - Effets aigus

Calcul de risques sanitaires

Étape 1 : identification du risque

- Quels sont les polluants qui dans une étude présentent un risque pour la santé humaine ?
 - Liste des polluants émis par les sources de pollution
 - Liste des polluants néfastes pour la santé
 - Liste des polluants qui doivent être pris en compte dans l'étude

Calcul de risques sanitaires

Étape 2 : calcul de la dose

- Pour chaque polluant et chaque durée d'exposition, la dose absorbée est calculée
 - Dose = masse de polluant par masse de l'individu par unité de temps
(par exemple, g par kg par an)
 - Dose : inhalation, ingestion et absorption dermique
 - Prise en compte des micro-environnements
 - Besoin des activités individuelles
 - Deux types de calculs :
 - Individu ou population à un point fixe (avec exposition maximale ou raisonnable)
 - Individu ou population évoluant à travers différents micro-environnements

Calcul de risques sanitaires

Étape 3 : calcul de la réponse dose-effet

- Pour les polluants cancérogènes, on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de seuil pour le risque de cancer et que la fonction de réponse dose-réponse est linéaire. On définit donc un excès de risque unitaire qui correspond à l'excès de risque pour une unité de dose ou de concentration
 - ERU $(\text{mg/kg/an})^{-1}$ pour la dose
 - ERU $(\mu\text{g/m}^3)^{-1}$ pour la concentration
- Des valeurs des ERU sont disponibles dans des bases de données en ligne telles que IRIS (U.S. EPA), CIRC (OMS), etc.

Calcul de risques sanitaires

Étape 4 : calcul du risque sanitaire

- Pour les polluants cancérogènes, la fonction dose- réponse étant supposée linéaire, le risque est calculé ainsi :

$$\text{Risque : } R_i = \text{dose (mg/kg/an)} \times \text{ERU (mg/kg/an)}^{-1}$$

$$\text{Risque : } R_i = \text{concentration } (\mu\text{g/m}^3) \times \text{ERU } (\mu\text{g/m}^3)^{-1}$$

- On calcule ensuite le risque total (R) pour tous les polluants cancérogènes en faisant la somme des R_i pour tous les polluants :

$$- R = \Sigma R_i$$

- Note : ces calculs peuvent aussi prendre en compte la fréquence de l'exposition (sans unité, 1 ou <1) et le rapport entre la durée de l'exposition et la durée de vie (prise par défaut comme égale à 70 ans)

Calcul de risques sanitaires

Étape 3 : calcul de la réponse dose-effet

- Pour les polluants non-cancérogènes, on fait l'hypothèse qu'il y a un seuil en dessous duquel il n'y a pas d'effets sanitaires néfastes et au-dessus duquel l'effet sanitaire est « constant ». On définit soit une concentration de référence pour les polluants inhalés, soit une dose de référence pour les polluants ingérés ou absorbés par la peau.
- Des valeurs références sont disponibles dans des bases de données en ligne telles que IRIS (U.S. EPA). On peut aussi utiliser les valeurs limites des réglementations de la pollution atmosphérique.

Calcul de risques sanitaires

Étape 4 : calcul du risque sanitaire

- Pour les effets non-cancérogènes des polluants, on définit le ratio de danger (RD) :
- Pour les polluants inhalés, on fait le calcul avec les concentrations
$$RD = \text{concentration calculée} / \text{concentration de référence}$$
- Pour les polluants ingérés ou absorbés par la peau, on fait le calcul avec les doses
$$RD = \text{dose calculée} / \text{dose de référence}$$

On calcule ensuite pour chaque chemin d'exposition l'index de risque (IR) pour tous les polluants non-cancérogènes en faisant la somme des RD pour tous les polluants :

$$SRD = \sum RD_i$$
- On calcule finalement un risque total en faisant la somme sur les trois chemins d'exposition
- Note : ces calculs peuvent aussi prendre en compte la fréquence de l'exposition (sans unité, 1 ou <1) dans le calcul de la concentration et de la dose d'exposition

Calcul de risques sanitaires

Étape 4 : calcul du risque sanitaire

- On considère généralement que le risque de cancer est acceptable s'il est inférieur à une valeur entre 10^{-6} (un par million) et 10^{-4} (un par dix milles).
- Pour une étude de risque sur toute une population dans une région, le risque de cancer pour toute la population (« cancer burden ») doit en général être inférieur à un (moins d'une personne aura un cancer dû à la pollution atmosphérique).
- On considère généralement que le risque dû aux effets non-cancérogènes des polluants est négligeable si $SRD < 1$. Dans le cas où $SRD > 1$, on peut affiner le calcul en groupant les RD_i par organe et en calculant des SRD spécifiques à chaque organe. Si $SRD_o < 1$ pour tous les organes, le risque est donc généralement acceptable.

Calcul de risques sanitaires

Étape 5 : estimation des incertitudes

- Dans une étude de risque sanitaire, il faut estimer les incertitudes liées à ce calcul. Cette estimation peut être faite de manière qualitative (discussion des sources majeures d'incertitude) ou de manière quantitative (calcul probabiliste qui prend en compte les probabilités de distribution des données d'entrée, des paramètres des différents modèles et la formulation des différents modèles)

Réglementations des polluants atmosphériques

- Il y a cinq éléments dans une réglementation
 - Le polluant indicateur
 - La durée d'exposition
 - La forme statistique de la réglementation
 - Le seuil
 - L'emplacement des stations de mesure

Réglementation

Polluant indicateur

- Pour qu'une réglementation soit mise en place pour un polluant, il faut que les études de risque sanitaire démontrent qu'il y a une relation de cause à effet entre le polluant et un effet sanitaire. Cette démonstration s'appuie en général sur des résultats d'études toxicologiques (qui peuvent démontrer une relation plausible de cause à effet ainsi que des seuils) et d'études épidémiologiques (qui documentent les effets sur la population en milieu ambiant). En général, plusieurs points doivent être validés :
 - Plausibilité : une relation de cause à effet qui est plausible physiologiquement doit être démontrée
 - Cohérence : les études toxicologiques et épidémiologiques doivent être qualitativement cohérentes pour documenter l'effet
 - Constance : les études épidémiologiques doivent principalement donner des résultats quantitatifs similaires

Réglementation

Polluant indicateur

- Une réglementation peut concerner un polluant précis ou une catégorie de polluants. Dans le dernier cas, un polluant indicateur est utilisé comme suppléant de la catégorie de polluants.
 - Plomb (Pb)
 - Monoxyde de carbone (CO)
 - Dioxyde d'azote (NO₂) pour les oxydes d'azote
 - Dioxyde de soufre (SO₂) pour les oxydes de soufre
 - Ozone (O₃) pour les oxydants photochimiques
 - PM_{2,5} et PM₁₀ pour les polluants particulaires

Réglementation

Durée de l'exposition

- Les études épidémiologiques sont utilisées pour déterminer si le polluant (ou la catégorie de polluants) présente des risques aigus ou chroniques (ou les deux). Exemples de durées réglementaires :
 - Pb : 3 mois et 1 an
 - CO : 1 heure et 8 heures
 - NO₂ : 1 heure et 1 an
 - SO₂ : 1 heure et 3 heures
 - O₃ : 8 heures
 - PM_{2,5} et PM₁₀ : 24 heures et 1 an

Réglementation

Forme statistique

- La forme statistique de la réglementation vise à donner une certaine robustesse telle que des événements extrêmes n'influencent pas trop la valeur moyenne mesurée des concentrations. Ceci permet d'éliminer les concentrations les plus élevées qui pourraient être dues à une météorologie extrême et qui ne se produisent que de façon aléatoire.
 - Pour les concentrations liées à une exposition chronique, la valeur moyenne amortit les effets de ces valeurs extrêmes.
 - Pour les concentrations liées à une exposition aigue, on peut choisir par exemple le 99^{ème} centile de la distribution des concentrations journalières.
- Par ailleurs, pour tenir compte de la variabilité inter-annuelle de la météorologie, il est souhaitable de moyennner sur plusieurs années

Réglementation

Forme statistique

- Exemples de formes statistiques de réglementations : Ozone
 - O₃ en France : 120 µg/m³ pour le centile 93 (25 jours de dépassement autorisés)
 - O₃ aux États-Unis : 147 µg/m³ pour le centile 99 (3 jours de dépassement autorisés)
- Ces deux réglementations ne sont pas directement comparables et, par conséquent, il faut bien prendre en compte non seulement la valeur limite mais aussi la forme statistique quand on évalue une réglementation.

Réglementation

Stations de mesure

- Localisation des stations de mesure
 - Stations de proximité des sources
 - Stations urbaines de fond
 - Stations périurbaines ou rurales

Réglementation

Mise en place aux États-Unis

- Au niveau fédéral, c'est l'U.S. Environmental Protection Agency qui est responsable des réglementations
 - « Integrated scientific assessment » rédigé par EPA (et des prestataires)
 - Relecture par CASAC*, remarques des autres acteurs concernés
 - « Risk and exposure assessment » rédigé par EPA (et prestataires)
 - Relecture par CASAC, remarques des autres acteurs concernés
 - Proposition de réglementation préparée par l'U.S. EPA
 - Relecture par CASAC, remarques des autres acteurs concernés
 - Promulgation de la réglementation : « National ambient **air quality standards** » ou **NAAQS**
 - Possibilité de procès par certains acteurs concernés

* CASAC (Clean Air Scientific Advisory Committee) Review Panel

Réglementation

Mise en place aux États-Unis

- L'U.S. Environmental Protection Agency délègue aux états l'implémentation de la réglementation
- La surveillance des concentrations de polluants doit suivre un protocole déterminé par EPA : instrument de mesure, normes des stations, réseau de stations, chaîne de prélèvement, etc.
- L'analyse des concentrations mesurées est transmise à EPA qui détermine l'état d' « attainment » ou de « non-attainment » de chaque région.
- L'état doit alors proposer un plan d'action pour atteindre les seuils réglementaires dans un délai raisonnable (c'est effectué avec modélisation) : EPA accepte ce plan ou demande des modifications
- Dans la plupart des états, c'est l'agence de l'environnement de l'état qui a la responsabilité des sources fixes ; les sources mobiles sont réglementées au niveau fédéral par EPA

Réglementation

Mise en place aux États-Unis

- La Californie est une exception car elle peut réglementer elle-même ses sources mobiles. L'état délègue aussi la réglementation des sources fixes aux régions (« districts »). Les agences régionales ont la responsabilité de la surveillance de la qualité de l'air et de la réduction des émissions des sources fixes pour respecter les seuils réglementaires.
- Si l'état n'atteint pas les objectifs prévus, EPA peut mettre en place des sanctions (annulation de fonds fédéraux pour le réseau routier par exemple) et peut prendre en main la gestion du plan d'action (annulation de la délégation)

Réglementation

Mise en place en Europe

- En Europe, le processus se déroule en deux phases
 - Mise en place d'une directive au niveau de la commission européenne
 - Mise en place au niveau national avec promulgation d'une loi qui reflète la directive européenne
 - La directive européenne prend en compte les effets sanitaires d'un polluant, mais sa mise en application tient aussi compte des niveaux de pollution et la mise en place de la réglementation correspond généralement à une succession de seuils qui baissent en fonction d'un calendrier s'étendant sur plusieurs années afin de permettre aux différents pays d'atteindre ces seuils.

Réglementation

Mise en place en France

- En France, une fois que la directive européenne a été transcrite en loi française par décret (code de l'environnement), l'implémentation est déléguée aux régions.
- Les seuils pour les polluants atmosphériques comprennent :
 - des « objectifs » de qualité (à atteindre dans le long terme)
 - des « valeurs cibles » de protection sanitaire (à atteindre dans un délai donné)
 - des « **valeurs limites** » ; ces dernières sont les valeurs réglementaires qui correspondent aux directives européennes
 - des « seuils d'information » (obligation d'informer le public) ; ils correspondent souvent aux valeurs limites
 - des « seuils d'alerte » ; ils correspondent généralement à une valeur plus élevée que la valeur limite et peuvent mener à des mesures de réduction des émissions immédiates. S'ils proviennent d'une directive européenne, le dépassement du seuil doit être documenté pour l'administration européenne.

Réglementation

Mise en place en France

- La surveillance de la qualité de l'air est effectuée par les AASQA* qui transmettent les résultats dans une base de données (BDQA#). Elle doit respecter certaines normes établies par l'administration européenne.
- La réduction des émissions est décidée par les régions (responsabilité des DRIREs\$). C'est une différence fondamentale avec la procédure américaine car en France l'organisme qui gère la surveillance de la qualité de l'air est différent de celui qui gère le plan d'action pour atteindre les seuils réglementaires (cependant l'AASQA est souvent très proche de la DRIRE).
- Chaque état doit démontrer à l'administration européenne que les concentrations de polluants sont en dessous des valeurs limites, sinon un plan d'action pour atteindre ces valeurs limites dans un délai raisonnable doit être soumis à l'administration européenne.

* AASQA : Association agréée (loi de 1901) de surveillance de la qualité de l'air

BDQA : Base de données sur la qualité de l'air

\$ DRIRE : Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement

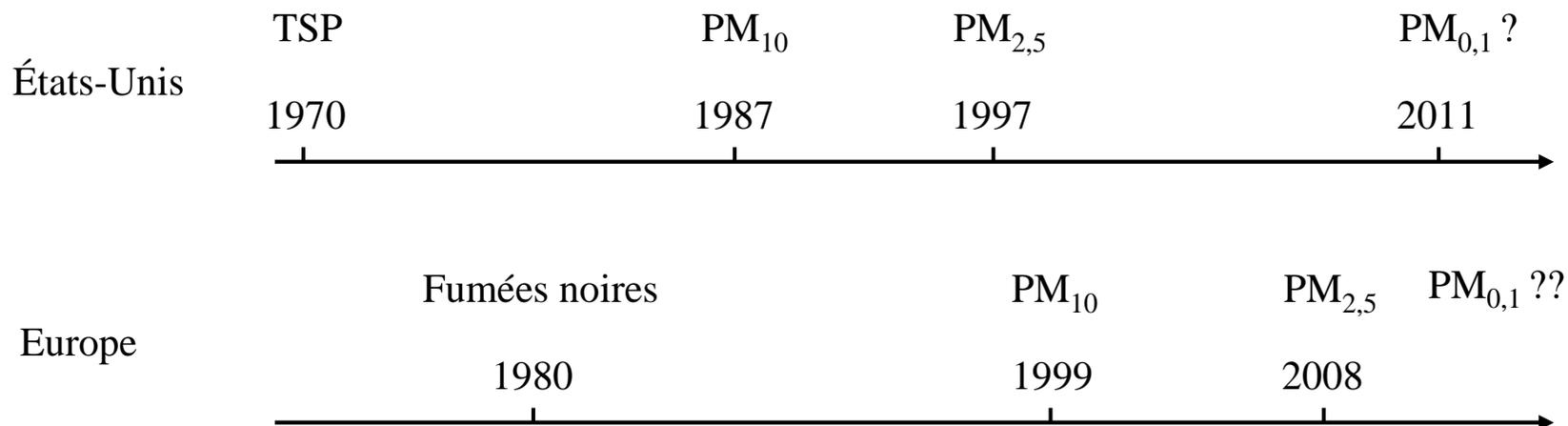
Réglementation

Mise en place en France

- Les principaux plans d'action issus de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) de 1996 sont :
 - Les Plans de déplacements urbains (PDU) gérés par les 59 agglomérations de plus de 100 000 habitants ; ils ont peu d'impacts sur la qualité de l'air
 - Les Plans régionaux de la qualité de l'air (PRQA) gérés par les régions, sous l'autorité du Conseil régional et la responsabilité du préfet ; ils sont soumis à consultation publique. Ils sont élaborés tous les 5 ans. Le PRQA est un outil d'orientation.
 - Les Plans de protection de l'atmosphère (PPA) sont développés pour les 24 agglomérations de plus de 250 000 habitants et sont la responsabilité du préfet. Celui de Paris a été élaboré par la DRIRE Île-de-France. Le PPA est un outil de réglementation. Ils sont élaborés tous les 5 ans.
- Il doit y avoir compatibilité entre ces trois plans

Réglementations : Europe vs. États-Unis

Exemple des particules atmosphériques



L'U.S. EPA révisera la réglementation des particules en 2011 et la pertinence d'une réglementation pour les particules ultrafines sera alors étudiée