

**Cours SGE**  
**« Pollution et aérocontamination -  
Atmosphère et air intérieur »**

**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

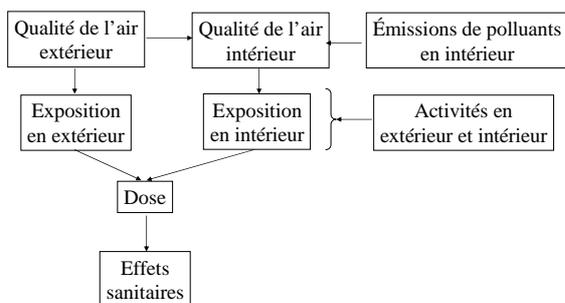
**Estimation des effets sanitaires**

- 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 : différence entre exposition individuelle et concentrations mesurées**



Mesure de l'exposition individuelle  
« Personal multipollutant sampler »

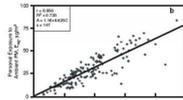


Mesure de la qualité de l'air par un  
réseau de surveillance

Source : HSPH, 2006

Source : AIRFOBEP, 2010

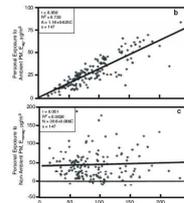
## Exposition Air extérieur et air intérieur



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

Source : Clayton et al., 1993

## Exposition Air extérieur et air intérieur

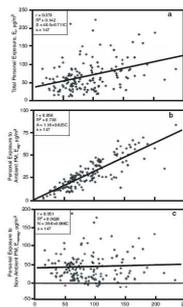


Bonne corrélation  
entre les concentrations  
de l'air extérieur et  
l'exposition en extérieur

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

Source : Clayton et al., 1993

## Exposition Air extérieur et air intérieur



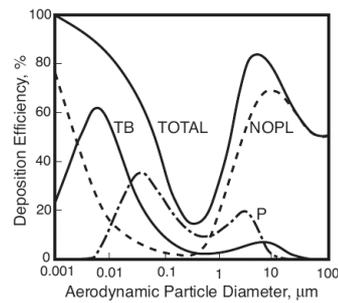
Une corrélation (faible) existe  
entre les concentrations  
de l'air extérieur et  
l'exposition totale

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

Source : Clayton et al., 1993

## 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

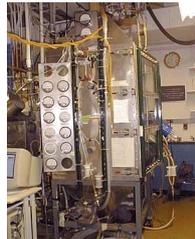
- L'exposition à des polluants déterminés est contrôlée dans le laboratoire
- Le polluant étudié peut être un polluant spécifique ou de l'air prélevé dans l'atmosphère et concentré pour le but de l'étude
  - Les tests comprennent généralement la fonction pulmonaire mais aussi divers paramètres liés à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

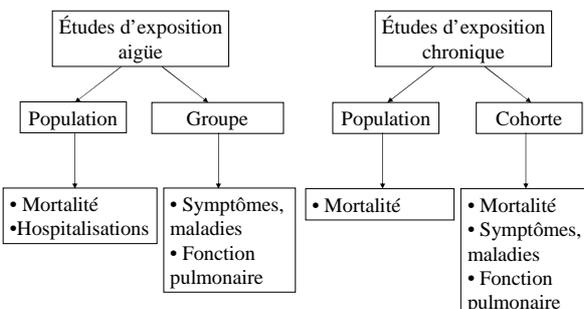


Source : HSPH, 2006

## 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 (études longitudinales)
  - 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

- Âge
- 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
  - Force de l'association statistique (corrélation)
  - Constance entre plusieurs études (les résultats de plusieurs études sont similaires)
  - 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-exposées
 où 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 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 :
 
$$FA \approx (RR - 1)$$

## 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)

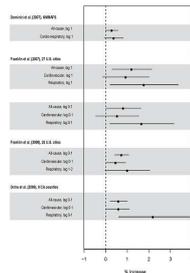
- Le rapport de cotes (ou rapport de chances) est défini comme le rapport de la probabilité (la « chance ») qu'une personne exposée a d'être malade et de la probabilité qu'une personne non-exposée a d'être malade :  

$$OR = (a / c) / (b / d)$$
- Si les personnes du groupe « témoin » ont été sélectionnées judicieusement pour bien représenter la fréquence d'exposition de toute la population (cohorte) dont les « cas » font partie, alors :  

$$c / d = N_E / N_0$$
 et on a  $OR = RR$

## 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  $10 \mu g/m^3$ ) 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)

## Réglementations

Études toxicologiques et/ou épidémiologiques => réglementations

Par exemple :

- Valeurs seuils au-dessous desquelles il n'y a pas d'effet sanitaire, si possible avec une marge de sécurité
- Relations dose / effet (ou exposition / effet) pour les polluants n'ayant pas de seuil (par exemple, polluants cancérogènes) ou pour les valeurs au-dessus du seuil

## Évaluation quantitative de risques sanitaires

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

## Évaluation quantitative 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

## Évaluation quantitative 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

## Évaluation quantitative de risques sanitaires Étape 3 : calcul de la réponse dose-effet

- Pour les polluants cancérigènes, 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. La **valeur toxicologique de référence (VTR)** est donc un **excès de risque unitaire (ERU)** qui correspond à l'excès de risque pour une unité de dose ou de concentration
  - ERU (mg/kg/an)<sup>-1</sup> pour la dose
  - ERU (µg/m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> 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. La base de données Furetox (Faciliter l'usage des ressources toxicologiques) de l'Institut de veille sanitaire (InVS) donne accès à la plupart des valeurs disponibles ([www.furetox.fr](http://www.furetox.fr))

## Évaluation quantitative de risques sanitaires Étape 4 : calcul du risque sanitaire

- Pour les polluants cancérigènes, la fonction dose- réponse étant supposée linéaire, l'**excès de risque individuel (ERI)** est calculé ainsi :

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

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

- On calcule ensuite l'excès de risque individuel total (ERI) pour tous les polluants cancérigènes en faisant la somme des  $R_i$  pour tous les polluants :

$$ERI = \sum ERI_i$$

- 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)

## Évaluation quantitative de risques sanitaires Étape 3 : calcul de la réponse dose-effet

- Pour les polluants non-cancérigènes, 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 ». La **valeur toxicologique de référence (VTR)** est alors définie soit comme une concentration de référence pour les polluants inhalés, soit comme 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). La base de données Furetox ([www.furetox.fr](http://www.furetox.fr)) donne accès à des VTR de plusieurs bases de données.
- L'utilisation de valeurs cibles de l'OMS ou de valeurs limites des réglementations de la pollution atmosphérique doit être faite avec prudence et n'est pas toujours recommandée.

## Évaluation quantitative de risques sanitaires Étape 4 : calcul du risque sanitaire

- Pour les effets non-cancérigènes des polluants, on définit le quotient de danger (QD) :
- Pour les polluants inhalés, on fait le calcul avec les concentrations  

$$QD = \text{concentration calculée} / \text{concentration de référence}$$
- Pour les polluants ingérés ou absorbés par la peau, on fait le calcul avec les doses  

$$QD = \text{dose calculée} / \text{dose de référence}$$
 On calcule ensuite pour chaque chemin d'exposition la somme des quotients de danger pour tous les polluants non-cancérigènes :  

$$SQD = \sum QD_i$$
- On peut aussi calculer une somme des QD en faisant la somme sur les trois chemins d'exposition (inhalation, ingestion, absorption)

- 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

## Évaluation quantitative 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<sup>-6</sup> (un par million) et 10<sup>-4</sup> (un par dix milles).
- Pour une étude de risque sur toute une population dans une région, le risque de cancer pour toute la population (**impact sanitaire** ; « 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-cancérigènes des polluants est négligeable si SQD < 1. Dans le cas où SQD > 1, on peut affiner le calcul en groupant les QD, par organe et en calculant des SQD spécifiques à chaque organe. Si SQD<sub>i</sub> < 1 pour tous les organes, le risque est donc généralement acceptable.

## Évaluation quantitative 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 (NO<sub>2</sub>) pour les oxydes d'azote
  - Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) pour les oxydes de soufre
  - Ozone (O<sub>3</sub>) pour les oxydants photochimiques
  - PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> 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
  - NO<sub>2</sub> : 1 heure et 1 an
  - SO<sub>2</sub> : 1 heure, 3 heures et 1 an
  - O<sub>3</sub> : 8 heures
  - PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> : 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 aiguë, on peut choisir par exemple le 99<sup>ème</sup> centile de la distribution des concentrations journalières.
- Par ailleurs, pour tenir compte de la variabilité inter-annuelle de la météorologie, il est souhaitable de moyenniser sur plusieurs années

## Réglementation Forme statistique

- Exemples de formes statistiques de réglementations : Ozone
  - O<sub>3</sub> en France : 120 µg/m<sup>3</sup> pour le centile 93 (25 jours de dépassement autorisés)
  - O<sub>3</sub> aux États-Unis : 147 µg/m<sup>3</sup> pour le centile 99 (3 jours de dépassement autorisés)

## 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<sup>®</sup>). Elle doit respecter certaines normes établies par l'administration européenne.
- La réduction des émissions est décidée par les régions (responsabilité de la DRIEE en Île de France<sup>®</sup>). 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 Division régionale du ministère, DRIEE...).
- 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.

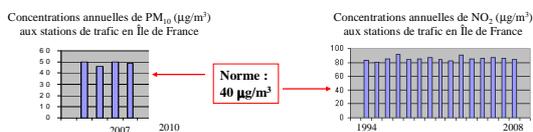
\* AASQA : Association agréée (loi de 1901) de surveillance de la qualité de l'air  
 # BDQA : Base de données sur la qualité de l'air  
 \$ DRIEE : Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie

## 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 Schémas régionaux climat air énergie (SRCAE) ont remplacés les Plans régionaux de la qualité de l'air (PRQA) à la suite de Grenelle de l'Environnement de 2007 et des lois Grenelle I (2009) et II (2010). Ils sont gérés par les régions, conjointement par le Conseil régional et le préfet de région ; ils sont soumis à consultation publique. Ils sont évalués tous les 5 ans. Le SRCAE 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

## Réglementation Les ZAPAs

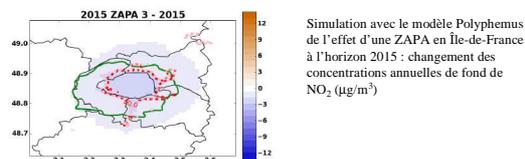
- Des Zones d'action prioritaire pour l'air (ZAPAs) sont proposées pour plusieurs grandes agglomérations en France qui ne respectent pas les normes de qualité de l'air, principalement pour les PM<sub>10</sub> et NO<sub>2</sub>.



ZAPA = « Low emission zone » ou LEZ

## Réglementation Les ZAPAs

- Certains véhicules (essentiellement les plus polluants) n'auront pas le droit d'accès à une zone de l'agglomération => amélioration de la qualité de l'air dans cette zone



## Réglementations : Europe vs. États-Unis Exemple des particules atmosphériques

	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>0,1</sub> ?
États-Unis	1970	1987	1997	2011
Europe	Fumées noires 1980	PM <sub>10</sub> 1999	PM <sub>2,5</sub> 2008	PM <sub>0,1</sub> ??

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

**Cours SGE**  
**« Pollution et aérocontamination -  
Atmosphère et air intérieur »**

**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

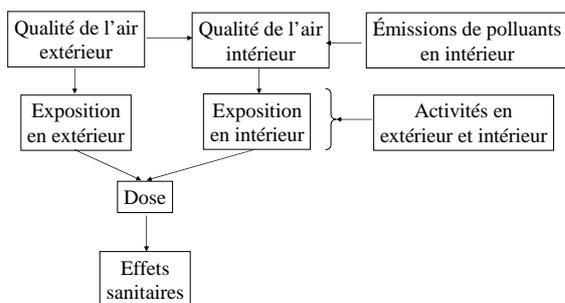
**Estimation des effets sanitaires**

- 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 : différence entre exposition individuelle et concentrations mesurées**



Mesure de l'exposition individuelle  
« Personal multipollutant sampler »

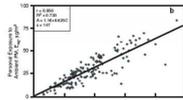


Mesure de la qualité de l'air par un  
réseau de surveillance

Source : HSPH, 2006

Source : AIRFOBEP, 2010

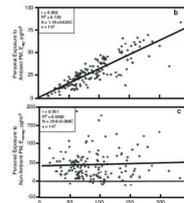
## Exposition Air extérieur et air intérieur



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

Source : Clayton et al., 1993

## Exposition Air extérieur et air intérieur

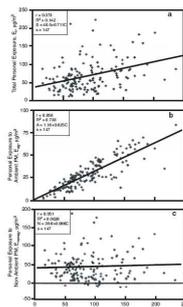


Bonne corrélation  
entre les concentrations  
de l'air extérieur et  
l'exposition en extérieur

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

Source : Clayton et al., 1993

## Exposition Air extérieur et air intérieur



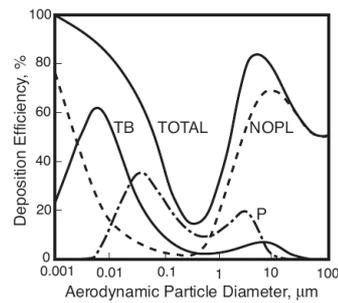
Une corrélation (faible) existe  
entre les concentrations  
de l'air extérieur et  
l'exposition totale

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

Source : Clayton et al., 1993

## 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

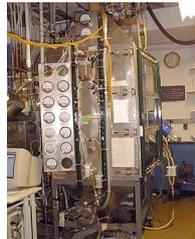
- L'exposition à des polluants déterminés est contrôlée dans le laboratoire
- Le polluant étudié peut être un polluant spécifique ou de l'air prélevé dans l'atmosphère et concentré pour le but de l'étude
  - Les tests comprennent généralement la fonction pulmonaire mais aussi divers paramètres liés à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

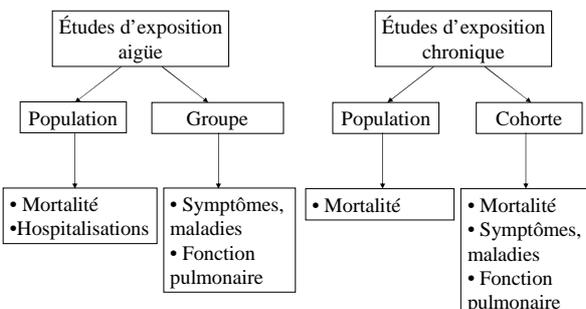


Source : HSPH, 2006

## 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 (études longitudinales)
  - 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

- Âge
- 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
  - Force de l'association statistique (corrélation)
  - Constance entre plusieurs études (les résultats de plusieurs études sont similaires)
  - 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 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 :
$$FA \approx (RR - 1)$$

## 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)

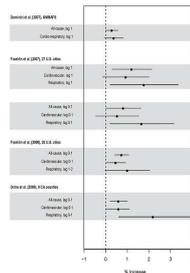
- Le rapport de cotes (ou rapport de chances) est défini comme le rapport de la probabilité (la « chance ») qu'une personne exposée a d'être malade et de la probabilité qu'une personne non-exposée a d'être malade :  

$$OR = (a / c) / (b / d)$$
- Si les personnes du groupe « témoin » ont été sélectionnées judicieusement pour bien représenter la fréquence d'exposition de toute la population (cohorte) dont les « cas » font partie, alors :  

$$c / d = N_E / N_0$$
 et on a  $OR = RR$

## 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  $10 \mu g/m^3$ ) 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)

## Réglementations

Études toxicologiques et/ou épidémiologiques => réglementations

Par exemple :

- Valeurs seuils au-dessous desquelles il n'y a pas d'effet sanitaire, si possible avec une marge de sécurité
- Relations dose / effet (ou exposition / effet) pour les polluants n'ayant pas de seuil (par exemple, polluants cancérogènes) ou pour les valeurs au-dessus du seuil

## Évaluation quantitative de risques sanitaires

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

## Évaluation quantitative 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

## Évaluation quantitative 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

## Évaluation quantitative de risques sanitaires Étape 3 : calcul de la réponse dose-effet

- Pour les polluants cancérigènes, 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. La **valeur toxicologique de référence (VTR)** est donc un **excès de risque unitaire (ERU)** qui correspond à l'excès de risque pour une unité de dose ou de concentration
  - ERU (mg/kg/an)<sup>-1</sup> pour la dose
  - ERU (µg/m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> 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. La base de données Furetox (Faciliter l'usage des ressources toxicologiques) de l'Institut de veille sanitaire (InVS) donne accès à la plupart des valeurs disponibles ([www.furetox.fr](http://www.furetox.fr))

## Évaluation quantitative de risques sanitaires Étape 4 : calcul du risque sanitaire

- Pour les polluants cancérigènes, la fonction dose- réponse étant supposée linéaire, l'**excès de risque individuel (ERI)** est calculé ainsi :

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

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

- On calcule ensuite l'excès de risque individuel total (ERI) pour tous les polluants cancérigènes en faisant la somme des  $R_i$  pour tous les polluants :

$$ERI = \sum ERI_i$$

- 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)

## Évaluation quantitative de risques sanitaires Étape 3 : calcul de la réponse dose-effet

- Pour les polluants non-cancérigènes, 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 ». La **valeur toxicologique de référence (VTR)** est alors définie soit comme une concentration de référence pour les polluants inhalés, soit comme 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). La base de données Furetox ([www.furetox.fr](http://www.furetox.fr)) donne accès à des VTR de plusieurs bases de données.
- L'utilisation de valeurs cibles de l'OMS ou de valeurs limites des réglementations de la pollution atmosphérique doit être faite avec prudence et n'est pas toujours recommandée.

## Évaluation quantitative de risques sanitaires Étape 4 : calcul du risque sanitaire

- Pour les effets non-cancérigènes des polluants, on définit le quotient de danger (QD) :
- Pour les polluants inhalés, on fait le calcul avec les concentrations  
QD = concentration calculée / concentration de référence
- Pour les polluants ingérés ou absorbés par la peau, on fait le calcul avec les doses  
QD = dose calculée / dose de référence
- On calcule ensuite pour chaque chemin d'exposition la somme des quotients de danger pour tous les polluants non-cancérigènes :  
 $SQD = \sum QD_i$
- On peut aussi calculer une somme des QD en faisant la somme sur les trois chemins d'exposition (inhalation, ingestion, absorption)

- 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

## Évaluation quantitative 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<sup>-6</sup> (un par million) et 10<sup>-4</sup> (un par dix milles).
- Pour une étude de risque sur toute une population dans une région, le risque de cancer pour toute la population (**impact sanitaire** ; « 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-cancérigènes des polluants est négligeable si SQD < 1. Dans le cas où SQD > 1, on peut affiner le calcul en groupant les QD, par organe et en calculant des SQD spécifiques à chaque organe. Si SQD<sub>i</sub> < 1 pour tous les organes, le risque est donc généralement acceptable.

## Évaluation quantitative 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 (NO<sub>2</sub>) pour les oxydes d'azote
  - Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) pour les oxydes de soufre
  - Ozone (O<sub>3</sub>) pour les oxydants photochimiques
  - PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> 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
  - NO<sub>2</sub> : 1 heure et 1 an
  - SO<sub>2</sub> : 1 heure, 3 heures et 1 an
  - O<sub>3</sub> : 8 heures
  - PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> : 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 aiguë, on peut choisir par exemple le 99<sup>ème</sup> centile de la distribution des concentrations journalières.
- Par ailleurs, pour tenir compte de la variabilité inter-annuelle de la météorologie, il est souhaitable de moyenniser sur plusieurs années

## Réglementation Forme statistique

- Exemples de formes statistiques de réglementations : Ozone
  - O<sub>3</sub> en France : 120 µg/m<sup>3</sup> pour le centile 93 (25 jours de dépassement autorisés)
  - O<sub>3</sub> aux États-Unis : 147 µg/m<sup>3</sup> pour le centile 99 (3 jours de dépassement autorisés)

## 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<sup>®</sup>). Elle doit respecter certaines normes établies par l'administration européenne.
- La réduction des émissions est décidée par les régions (responsabilité de la DRIEE en Île de France<sup>®</sup>). 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 Division régionale du ministère, DRIEE...).
- 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.

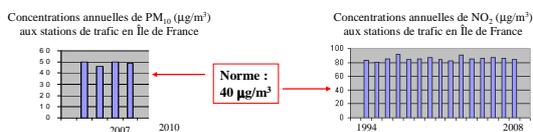
\* AASQA : Association agréée (loi de 1901) de surveillance de la qualité de l'air  
 # BDQA : Base de données sur la qualité de l'air  
 \$ DRIEE : Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie

## 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 Schémas régionaux climat air énergie (SRCAE) ont remplacés les Plans régionaux de la qualité de l'air (PRQA) à la suite de Grenelle de l'Environnement de 2007 et des lois Grenelle I (2009) et II (2010). Ils sont gérés par les régions, conjointement par le Conseil régional et le préfet de région ; ils sont soumis à consultation publique. Ils sont évalués tous les 5 ans. Le SRCAE 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

## Réglementation Les ZAPAs

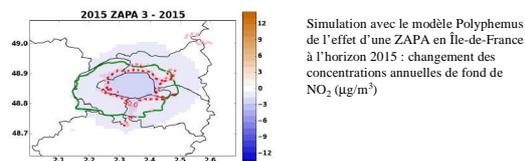
- Des Zones d'action prioritaire pour l'air (ZAPAs) sont proposées pour plusieurs grandes agglomérations en France qui ne respectent pas les normes de qualité de l'air, principalement pour les PM<sub>10</sub> et NO<sub>2</sub>.



ZAPA = « Low emission zone » ou LEZ

## Réglementation Les ZAPAs

- Certains véhicules (essentiellement les plus polluants) n'auront pas le droit d'accès à une zone de l'agglomération => amélioration de la qualité de l'air dans cette zone



## Réglementations : Europe vs. États-Unis Exemple des particules atmosphériques

	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>0,1</sub> ?
États-Unis	1970	1987	1997	2011
Europe	Fumées noires 1980	PM <sub>10</sub> 1999	PM <sub>2,5</sub> 2008	PM <sub>0,1</sub> ??

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